CONTENT

Cesare Sposito, Francesca Scalisi (editorial) — *Il contributo delle discipline dell'Architettura su Acqua, Energia, Lavoro Dignitoso e Crescita Economica* — 3
The contribution of the disciplines of Architecture to Water, Energy, Decent Work and Economic Growth

Cesare Sposito, Gernot Mittersteiner — *Riciclo idrico e raffrescamento urbano – Un nuovo paradigma metabolico Acqua / Energia / Cibo per le città temperate* — 22
Water recycling and urban cooling – A new Water / Energy / Food metabolic paradigm for temperate cities

Antonella Falzetti — *Oltre la funzione – L'acqua come principio di equità, cura e identità urbana e paesaggistica* — 72
Beyond function – Water as a principle of equity, care, and urban and landscape identity

Sara Radi Ahmed, Alessandra Capuano — *Infrastrutture blu per la rigenerazione ecologica – Il recupero di siti estrattivi ad Amburgo e Roma* — 84
Blue infrastructures for ecological regeneration – The recovery of mining sites in Hamburg and Rome

Matteo D'Ambros, Stefano Tornieri — *Futuri galleggianti – Ripensare le relazioni tra acqua, energia e lavoro attraverso l'idrologia culturale* — 98
Floating features – Rethinking the relationships between water, energy, and labour through cultural hydrology

Elan Redekop van der Meulen, Emanuela Cammarata, Ina Macaione, Bianca Andaloro, Alessandro Raffa — *Progettare con l'acqua in ambito urbano – L'esperienza dello studio Felixx* — 114
Designing with water in urban contexts – The experience of Felixx

Anna Mangiatordi — *Investire nelle residenze per anziani – Verso una tassonomia ESG per la rigenerazione immobiliare* — 130
Investing in housing for the elderly – Towards an ESG taxonomy for building regeneration

Alexandra Eika D'Amore — *Gemello digitale e processo edilizio – Riflessioni su produttività, energia e salute* — 144
The digital twin and the building process – Reflections on productivity, energy, and health

Filippo Angelucci, Armen Shatvoryan — *Riconnettere le dimensioni di acqua, città e comunità – Una sperimentazione a Yerevan (Armenia)* — 162
Reconnecting the dimensions of water, city, and community – An experiment in Yerevan (Armenia)

Tiziana Campisi, Luisa Lombardo — *Progettare con l'acqua – Strategie, protocolli e progetti nell'architettura e per le città* — 178
Designing with water – Strategies, protocols, and projects in architecture and for cities

Philippe Marin, Lidia Maria Giannini, Fabrizio Tucci — *Gestione resiliente delle acque meteoriche – Uno strumento a supporto della progettazione* — 196
Resilient management of stormwater – A tool to support design

Michela Barosio, Martina Crapolicchio, Rossella Gugliotta, Marco Trisciuoglio — *Parametri di morfologia urbana e distretti a energia positiva – I Campus universitari motori delle transizioni urbane* — 212
Urban morphology parameters and positive energy districts – University Campuses as drivers of urban transitions

Valentina Dessì, Matteo Clementi, Erpinio Labrozzi, Filippo Oppimitti, Michele D'Ostuni et alii — *Agricoltura urbana e architettura – L'acqua per ottimizzare la sinergia edificio-vegetazione* — 224
Urban agriculture and architecture – Water for optimising the building-vegetation synergies

Josep Eixerés Ros — *Habitat collettivi per la rigenerazione rurale – Una cooperativa edilizia ad Almenara (Spagna)* — 238
Collective habitats for rural regeneration – A housing cooperative in Almenara (Spain)

Fabrizio Tucci, Kristina Mitrik, Lavinia Montagner — *Muro di Trombe e labirinto termico – Strategie bioclimatiche per il clima mediterraneo* — 250
Trombe wall and thermal labyrinth – Bioclimatic strategies for the Mediterranean climate

Massimo Lauria, Maria Azzalin, Francesca Giglio, Giovanna Maria La Face — *Efficienza energetica e smartness degli edifici nelle politiche ambientali pubbliche* — 264
Energy efficiency and smart buildings in public environmental policies

Maria Chiara Capasso — *LCA e domanda energetica complessiva dei prodotti edili in canapa* — 276
LCA and cumulative energy demand of hemp buildings products

Elisabetta Palumbo, Irene Mazzei, Martina Perpetua, Francesco Pomponi — *Impatti ambientali e sociali nel ciclo vita per una progettazione a basso carbonio* — 294
Environmental and social life cycle for low-carbon design

Federica Marandino — *Paesaggi produttivi in trasformazione – Sistemi agro-energetici e benefici ambientali* — 304
Productive landscapes in transformation – Agro-energy systems and environmental benefits

Francesca Thiébat, Alice Masoero, Fiamma Morselli, Elena Fregonara, Chiara Senatore et alii — *Fibre naturali e circolarità in architettura – Sostenibilità ambientale, economica e sociale* — 316
Natural fibres and circularity in architecture – Environmental, economic, and social sustainability

Stefano Follesa, Leila Farahbakhsh, Xinxin Song — *Energie rinnovabili e agricoltura urbana – Strategie multidisciplinari per città resilienti* — 332
Renewable energy and urban agriculture – Multidisciplinary strategies for resilient cities

Paolo Franzo, Andrea Quartu, Margherita Tufarelli — *Re-shaping fashion in Italy – Sistemi circolari, scenari phygital e formazione informale* — 344
Re-shaping fashion in Italy – Circular systems, phygital scenarios, and informal education

Elif Süyük Makakli, Ebru Yücesan Altay — *Reinterpretare il ruolo ecologico dell'acqua – Materiali viventi e design inclusivo* — 358
Reinterpreting water's ecological role – Integrating living materials for inclusive design

Ilaria Fabbri — *PUNTOnet H_2O – Dall'indagine sul campo al prototipo di una stazione multifunzionale per l'acqua* — 370
PUNTOnet H_2O – From field investigation to the prototype of a multifunctional water station

Laura Badalucco, Rosa Chiesa, Giorgio Gaino, Elisa Marchetto, Chiara Silvestri — *Discoil e durabilità – Redesign di un sistema per ridurre l'inquinamento idrico da idrocarburi* — 384
Discoil and durability – Redesign of a system to reduce water pollution by hydrocarbons

Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Federico Rossi, Michela Meschini — *Sistemi innovativi per lo stoccaggio dell'idrogeno (HEHS) – Visual design e AI per la comunità* — 398
Innovative systems for hydrogen storage (HEHS) – Visual design and AI for community engagement

LetteraVentidue

ISSN print 2464-9309
ISSN online 2532-683X

18

International Journal of Architecture Art and Design

18 | 2025

AGATHÓN

SDGs 6, 7, 8 | PROGETTI, RICERCHE, SINERGIE, COMPROMESSI | PROJECTS, RESEARCH, SYNERGIES, TRADE-OFFS

ACQUA (SDG 6), ENERGIA (SDG 7), LAVORO DIGNITOSO E CRESCITA ECONOMICA (SDG 8)

PROGETTI, RICERCHE, SINERGIE, COMPROMESSI

WATER (SDG 6), ENERGY (SDG 7), DECENT WORK AND ECONOMIC GROWTH (SDG 8)

PROJECTS, RESEARCH, SYNERGIES, TRADE-OFFS

AGATHÓN

18
2025

AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

AGATHÓN is indexed on

Scientific Directors
Giuseppe De Giovanni, Cesare Sposito (University of Palermo, Italy)

Managing Director
Micaela Maria Sposito

International Scientific Committee
Alfonso Acocella (University of Ferrara, Italy), **Jose Ballesteros** (Polytechnic University of Madrid, Spain), **Salvatore Barba** (University of Salerno, Italy), **Cristina Bianchetti** (Polytechnic University of Torino, Italy), **Françoise Blanc** (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse, France), **Roberto Bologna** (University of Firenze, Italy), **Tarek Brik** (University of Tunis, Tunisia), **Tor Broström** (Uppsala University, Sweden), **Josep Burch i Rius** (University of Girona, Spain), **Maurizio Carta** (University of Palermo, Italy), **Alicia Castillo Mena** (Complutense University of Madrid, Spain), **Pilar Chias Navarro** (Universidad de Alcalà, Spain), **Jorge Cruz Pinto** (University of Lisbon, Portugal), **Maria Antonietta Esposito** (University of Firenze, Italy), **Emilio Faroldi** (Polytechnic University of Milano, Italy), **Francesca Fatta** ('Mediterranea' University of Reggio Calabria, Italy), **Francisco Javier Gallego Roca** (University of Granada, Spain), **Maria Luisa Germanà** (University of Palermo, Italy), **Vicente Guallart** (IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Spain), **Javier García-Gutiérrez Mosteiro** (Polytechnic University of Madrid, Spain), **Fakher Kharrat** (Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme, Tunis), **Motomi Kawakami** (Tama Art University, Japan), **Walter Klasz** (University of Art and Design Linz, Austria), **Paolo La Greca** (University of Catania, Italy), **Inhee Lee** (Pusan National University, South Corea), **Mario Losasso** ('Federico II' University of Napoli, Italy), **Maria Teresa Lucarelli** ('Mediterranea' University of Reggio Calabria, Italy), **Cristiana Mazzoni** (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Belleville, France), **Renato Teofilo Giuseppe Morganti** (University of L'Aquila, Italy), **Stefano Francesco Musso** (University of Genova, Italy), **Olimpia Niglio** (University of Pavia, Italy), **Marco Rosario Nobile** (University of Palermo, Italy), **Patrizia Ranzo** ('Luigi Vanvitelli' University of Napoli, Italy), **Laura Ricci** ('Sapienza' University of Roma, Italy), **Andrea Rolando** (Polytechnic University of Milano, Italy), **Dominique Rouillard** (National School of Architecture Paris Malaquais, France), **Roberto Pietroforte** (Worcester Polytechnic Institute, USA), **Carmine Piscopo** ('Federico II' University of Napoli, Italy), **Luigi Sansone** (Art Reviewer, Milano, Italy), **Andrea Sciascia** (University of Palermo, Italy), **Federico Soriano Pelaez** (Polytechnic University of Madrid, Spain), **Benedetta Spadolini** (University of Genova, Italy), **Conrad Thake** (University of Malta), **Francesco Tomaselli** (University of Palermo, Italy), **Maria Chiara Torricelli** (University of Firenze, Italy), **Fabrizio Tucci** ('Sapienza' University of Roma, Italy)

Editor-in-Chief
Francesca Scalisi (University of Palermo, Italy)

Editorial Board
Tiziano Aglieri Rinella (IUAV, Italy), **Fabrizio Aimar** (Texas A&M University, USA), **Silvia Barbero** (Polytechnic University of Torino, Italy), **Carmelina Bevilacqua** ('Sapienza' University of Roma, Italy), **Mario Bisson** (Polytechnic University of Milano, Italy), **Luca Bullaro** (Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia), **Tiziana Campisi** (University of Palermo, Italy), **Nicola Valentino Canessa** (University of Genova, Italy), **Chiara Catalano** (National Centre of Research – IRET, Italy), **Clice de Toledo Sanjar Mazzilli** (University of São Paulo, Brazil), **Giuseppe Di Benedetto** (University of Palermo, Italy), **Santina Di Salvo** (University of Palermo, Italy), **Ana Esteban-Maluenda** (Polytechnic Univeristy of Madrid, Spain), **Raffaella Fagnoni** (IUAV, Italy), **Antonella Falzetti** ('Tor Vergata' University of Roma, Italy), **Elisa Mariarosaria Farella** (Bruno Kessler Foundation, Italy), **Rubén García Rubio** (Tulane University, USA), **Manuel Gausa** (University of Genova, Italy), **Toufic Haidamous** (American University in the Emirates, UAE), **Pilar Cristina Izquierdo Gracia** (Polytechnic Univeristy of Madrid, Spain), **Daniel Ibañez** (IAAC – Institute for Advanced Architecture of Catalonia, Spain), **Pedro António Janeiro** (University of Lisbon, Portugal), **Massimo Lauria** ('Mediterranea' University of Reggio Calabria, Italy), **Ina Macaione** (University of Basilicata, Italy), **Francesco Maggio** (University of Palermo, Italy), **Fernando Moral-Andrés** (Universidad Nebrija in Madrid, Spain), **Nuria Nebot Gómez de Salazar** (University of Malaga, Spain), **David Ness** (University of South Australia, Australia), **Elodie Nourrigat** (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Montpellier, France), **Elisabetta Palumbo** (University of Bergamo, Italy), **Frida Pashako** (Municipality of Tirana, Albania), **Julio Cesar Perez Hernandez** (University of Notre Dame du Lac, USA), **Valerio Perna** (Epoka University, Albania), **Pier Paolo Perruccio** (Polytechnic University of Torino, Italy), **Rosa Romano** (University of Firenze, Italy), **Daniele Ronsivalle** (University of Palermo, Italy), **Monica Rossi-Schwarzenbeck** (Leipzig University of Applied Sciences, Germany), **Dario Russo** (University of Palermo, Italy), **Michele Russo** ('Sapienza' University of Roma, Italy), **Jörg Schröder** (Leibniz University Hannover, Germany), **Marichela Sepe** ('Sapienza' University of Roma, Italy), **Marco Sosa** (Zayed University, UAE), **Zeila Tesoriere** (University of Palermo, Italy), **Antonella Trombadore** (World Renewable Energy Network, UK), **Alessandro Valenti** (University of Genova, Italy), **Gaspare Massimo Ventimiglia** (University of Palermo, Italy), **Antonella Violano** ('Luigi Vanvitelli' University of Campania, Italy), **Alessandra Zanelli** (Polytechnic University of Milano, Italy)

Assistant Editors
Maria Azzalin ('Mediterranea' University of Reggio Calabria, Italy), **Giorgia Tucci** (University of Genova, Italy)

Graphic Designer
Michele Boscarino

Web Editor
Pietro Artale

Publisher

LetteraVentidue Edizioni S.r.l.
Via Luigi Spagna, 50P | 96100 Siracusa (IT)
P.IVA 01583340896
E-mail: info@letteraventidue.com

Il vol. 18 è stato stampato nel dicembre 2025 da
Issue 18 was printed in December 2025 by
The Factory S.r.l.
via Triburtina n. 912 | 00156 Roma (IT)

AGATHÓN è un marchio di proprietà di Cesare Sposito
AGATHÓN is a trademark owned by Cesare Sposito

Le immagini pubblicate nella rivista rispondono alla pratica del Copyright Act 17 U.S.C. 107 recepita in Italia dall'art. 70 della Legge sul Diritto d'Autore che ne consente l'uso a fini di critica, insegnamento e ricerca scientifica a scopi non commerciali.
The images published in the journal comply with the Copyright Act 17 U.S.C. 107, which allows their use for criticism, teaching and scientific research for non-commercial purposes.

Il Journal è stampato con il contributo degli Autori che mantengono i diritti sull'opera originale senza restrizioni.
The Journal is published with fund of the Authors whom retain all rights to the original work without any restrictions.

AGATHÓN adotta il sistema di revisione del double-blind peer review. I saggi nella sezione 'Focus' non sono soggetti al suddetto processo di revisione in quanto a firma di Autori invitati dalla Direzione nella qualità di esperti sul tema.
The AGATHÓN Journal adopts a double-blind peer review. The essays on 'Focus' section are not subjected to double-blind peer review process because the Authors are invited by the Directorate as renowned experts in the subject.

AGATHÓN | International Journal of Architecture Art and Design
Issues for year: 2 | ISSN print: 2464-9309 | ISSN online: 2532-683X

Registrazione n. 12/2017 del 13/07/2017 presso la Cancelleria del Tribunale di Palermo
Registration number 12/2017 dated 13/07/2017, registered at the Palermo Court Registry

Editorial Office
Via Filippo Cordova n. 103 | 90143 Palermo (ITA) | E-mail: redazione@agathon.it

AGATHÓN è stata inclusa nella lista ANVUR delle riviste di classe A per l'area 08 a partire dal volume 1 del 2017 ed è indicizzata in SCOPUS e in SCIMAGO dal 2023.
AGATHÓN has been included in the Italian ANVUR list of Class A Journals for area 08 starting from volume no. 1, June 2017, and is indexed in SCOPUS and SCIMAGO since 2023.

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

Il contributo delle discipline dell'Architettura su Acqua, Energia, Lavoro Dignitoso e Crescita Economica

The contribution of the disciplines of Architecture to Water, Energy, Decent Work and Economic Growth

Editoriale | Editorial

Cesare Sposito
Co-Scientific Director
Associate Professor in Technological and Environmental Design of Architecture
University of Palermo

Arch. Ph.D. Francesca Scalisi
Editor-in-Chief
Assistant Professor in Industrial Design
University of Palermo

pp. 3-21 | doi.org/10.69143/2464-9309/1802025

Il volume 18 di AGATHÓN dà seguito a quanto avviato nel precedente volume dedicato ai primi cinque Obiettivi dell'Agenda 2030, spostando ora il focus sui successivi tre SDG che, per densità di interdipendenze e urgenza della crisi, agiscono come snodi strutturali della transizione: Acqua pulita e servizi igienico-sanitari (SDG 6), Energia pulita e accessibile (SDG 7), Lavoro dignitoso e Crescita economica (SDG 8). I tre temi fanno parte dei 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), adottati nel settembre 2015 dagli Stati membri delle Nazioni Unite (UN, 2015) e promossi come appello a un'azione urgente in grado di coniugare prosperità, sviluppo equo e protezione del nostro Pianeta, tutto ciò mettendo in valore la cooperazione e i partenariati tra i diversi Paesi, tra Governi nazionali e Amministrazioni locali, tra Istituzioni pubbliche e Imprese private e tra società civile e singoli individui. Tuttavia, a distanza di soli cinque anni dalla data indicata per il loro raggiungimento, l'appello sembra non essere stato pienamente accolto, se non addirittura disatteso, e pertanto la comunità scientifica non può e non deve esimersi dal riflettere su 'dove siamo arrivati', 'dove stiamo andando' e 'dove ancora potremmo essere in grado di arrivare'. Una valutazione dei progressi basata sui dati è stata fatta dal Global Sustainable Development Report che, in due successivi documenti (IGS, 2019, 2023), ha sollecitato un'adeguata correzione e un'urgente accelerazione delle politiche attuative senza le quali l'umanità si troverà ad affrontare periodi prolungati di crisi e incertezza, mettendo ulteriormente a rischio a livello globale il principio di 'non lasciare indietro nessuno' e la salvaguardia dell'intero ecosistema. Se il Rapporto del 2019 aveva rilevato che per alcuni obiettivi la comunità internazionale avrebbe dovuto accelerare il passo, mentre per molti altri aveva confermato che il mondo era sulla buona strada, la situazione fotografata dal Rapporto 2023 è estremamente differente in quanto denuncia che su alcuni obiettivi non si è accelerato abbastanza e su altri – sicurezza alimentare, azione per il clima e protezione della biodiversità – il mondo si sta ancora muovendo nella direzione sbagliata.

Rispetto a questo scenario appare quanto mai urgente valutare 'cosa è necessario fare e come è possibile farlo in modo strategico', considerando che, secondo quanto affermato dalle Nazioni Unite al momento della definizione dei SDG (UN, 2015) e confermato dallo stesso Rapporto 2019, la maggior parte degli obiettivi sono sinergici e che quelli sociali e ambientali in particolare hanno impatti sistemici che guidano il progresso complessivo verso il raggiungimento di tutti gli altri SDG. Nonostante la letteratura scientifica sulle interconnessioni tra gli SDG sia cresciuta rapidamente e numerosi studi sostengano che le sinergie superano i compromessi, esiste un potenziale elevato e non ancora pienamente indagato e sfruttato per realizzare progressi simultanei su più obiettivi attraverso una pianificazione integrata e strategie adeguate; in particolare gli Obiettivi 1 (sconfiggere la povertà), 2 (sconfiggere la fame), 3 (salute e benessere), 4 (istruzione di qualità), 5 (parità di genere), 6 (acqua pulita e servizi igienico-sanitari), 7 (energia pulita e accessibile) e 17 (partnership per gli obiettivi) sono identificati come strategici in quanto capaci di generare benefici su molti altri obiettivi (Barbier and Burgess, 2019; Randers et alii, 2019; Pham-Truffert et alii, 2020). Ciononostante, il raggiungimento degli SDG impone necessariamente anche dei compromessi che spesso si traducono in criticità non risolte dalle prassi correnti; ne sono esempi le azioni e le strategie di promozione dell'Obiettivo 2 (sconfiggere la fame), laddove la coltivazione di terreni e le pratiche agricole intensive generano degrado del suolo, inquinamento e perdita di biodiversità, o quelle relative all'Obiettivo 8 (lavoro dignitoso e crescita economica) quando crescita e sviluppo incontrollati determinano uno sfruttamento delle risorse naturali oltre i limiti sostenibili. Tali criticità sono confermate dal recente Global Sustainable Development Report (IGS, 2023) secondo il quale i progressi sugli Obiettivi 14 (vita sott'acqua) e 15 (vita sulla terra) sono maggiormente influenzati negativamente dai progressi in altri settori che non in positivo dalle azioni specifiche.

È da rilevare che la natura delle connessioni in termini di sinergie e compromessi tra i diversi obiettivi può variare sensibilmente in funzione delle dimensioni 'spazio' e 'tempo', ma anche all'interno di differenti redditi e gruppi di popolazione: la letteratura scientifica ad esempio mostra come la riduzione della povertà generi effetti positivi complessivi sull'Agenda 2030 nei Paesi a basso reddito, ma anche come le strategie integrate che affrontano il cambiamento climatico e le disuguaglianze siano più decisive per il raggiungimento degli obiettivi nei Paesi ad alto reddito. Questi ultimi tuttavia sembrano dover affrontare più compromessi rispetto agli altri, il che potrebbe in parte spiegare la loro lentezza nel raggiungere gli SDG (Lusseau and Mancini, 2019; Nilsson et alii, 2022; Kostetckaia and Hametner, 2022). Non è poi da trascurare che molte interconnessioni hanno un carattere transfrontaliero: secondo la OECD (2019, 2024) il 57% dei 169 target raggiungibili in un Paese può avere ricadute in altre regioni o Paesi del mondo, varcando i confini nazionali attraverso flussi di capitali, beni e risorse umane e naturali e influenzandone positivamente o negativamente il futuro e le prospettive di sviluppo. In tal senso, se da un lato non possiamo permetterci di generare impatti negativi e costosi altrove, dall'altro il mancato riconoscimento di potenziali ricadute positive in luoghi 'lontani' è da considerarsi una perdita di opportunità.

Tutte queste variabili rendono necessaria un'attenta comprensione delle interconnessioni in termini di sinergie e compromessi, sia per indirizzare la ricerca scientifica, sia per definire modalità e strumenti in grado di ridurre i compromessi, affrontare le incertezze e mettere in valore le opportunità specifiche del contesto, sia per supportare il processo decisionale strategico e promuovere interventi 'rivoluzionari'. Molti sono ad oggi gli strumenti e i metodi disponibili per l'analisi integrata degli Obiettivi, il

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

supporto alle decisioni e il monitoraggio dei progressi (Barquet et alii, 2022), come ad esempio il toolbox con linee guida per la valutazione ex-ante degli impatti promosso dalla European Commission (2023). Ciò che si richiede è una maggiore capacità di pensare in termini di sistemi, cioè di considerare gli effetti sistemici delle politiche, dei percorsi, delle misure e delle azioni, che rappresenta il miglior approccio possibile per ottimizzare le interazioni degli SDG. Anche integrare il tema degli SDG con le Digital Humanities apre a prospettive innovative in grado di valorizzare sinergie tra campi del sapere e limitare compromessi tra gli stessi SDG. Infatti nel fornire un nuovo framework in cui gli strumenti e le metodologie digitali vengono applicati allo studio delle discipline umanistiche, le Digital Humanities promuovono un approccio sistemico e integrato per affrontare le sfide globali e analizzare le dinamiche complesse tra i diversi obiettivi; si tratta di modalità differenti per monitorare, comprendere e migliorare non solo l'interazione tra gli stessi obiettivi di sviluppo sostenibile ma tra questi e le strategie e azioni.

Sulla scorta di tali riflessioni il volume 18 di AGATHÓN, rivolgendosi alle aree disciplinari del Paesaggio, dell'Urbanistica, della Composizione Architettonica e Urbana, dell'Ingegneria, della Tecnologia dell'Architettura, del Design, del Restauro e Recupero e della Rappresentazione, ha selezionato una serie di contributi sul tema 'Acqua pulita e servizi igienico-sanitari (SDG 6), Energia pulita e accessibile (SDG 7), Lavoro dignitoso e crescita economica (SDG 8) | Progetti, ricerche, sinergie e compromessi con gli SDG' con l'intento di alimentare un confronto aperto attraverso la raccolta di saggi e riflessioni critiche, ricerche e sperimentazioni, progetti e interventi, di impronta innovativa, multidisciplinare e multiscalare che utilizzano un approccio sistemico e trattano aspetti di processo (progetto / produzione / realizzazione / gestione), metodologie e modelli di valutazione ex-ante ed ex-post, superamento di limiti, gap e barriere, valorizzando le sinergie e limitando i compromessi con altri obiettivi.

L'ambiente costruito infatti interagisce con ogni obiettivo (Thorne and Duran, 2016), ma al contempo rientra tra le attuali sfide in quanto da un lato è un grande consumatore di energia e risorse naturali e un incessante produttore di gas nocivi e rifiuti, dall'altro il modo in cui interveniamo può esacerbare disuguaglianze e incidere sulla salute umana; ciò assume particolare rilevanza nelle città, la cui importanza sia in termini di vulnerabilità che di opportunità di crescita è sottintesa in tutti gli SDG, soprattutto in considerazione del fatto che entro il 2050 circa il 70% della popolazione mondiale vivrà in aree urbanizzate (UN-Habitat, 2022). Ancora una volta ciò che risulta necessario e urgente è un'azione antropica strategicamente pianificata, progettata e attuata coerentemente con più SDG in grado di migliorare la qualità della vita, la sostenibilità, l'equità sociale, la salute e la resilienza di una comunità. In tale ottica i saggi e le ricerche pubblicati trattano i primi cinque Obiettivi di Sviluppo Sostenibile nella consapevolezza che povertà, fame, salute e benessere, istruzione di qualità e parità di genere non siano domini separati, ma campi di azione e riflessione interconnessi, tra loro e con gli altri Obiettivi, su cui la progettazione – intesa nella sua estensione urbanistica, paesaggistica, architettonica e tecnologica – può e deve esercitare un'azione sistemica. L'editoriale tenta di restituire questa complessità, evidenziando – per ciascun contributo – il tema affrontato, l'ambito disciplinare di riferimento, le scale di progetto coinvolte, le tipologie di azione impiegate e, soprattutto, l'importanza e la trasferibilità delle soluzioni proposte.

Il contributo di Falzetti (2025) supera la lettura dell'acqua come semplice risorsa da amministrare e la interpreta come principio di progetto per uscire dalla neutralità tecnica e superare la sola verifica idraulica, assumendola quindi come dispositivo culturale e politico. Quando le infrastrutture idriche sono 'esterne' alla costruzione dello spazio aperto la città perde infatti un dispositivo capace di orientare pratiche, valori e comportamenti; l'opera si riduce a funzione, mentre la crisi climatica impone che diventi cura, responsabilità e criterio di equità. Da qui la scelta di leggere le architetture dell'acqua come soglie tra il simbolico e l'operativo: i casi studio proposti non servono a celebrare forme, ma a mostrare come l'infrastruttura blu possa funzionare da struttura di benessere collettivo (SDG 3), da leva di rigenerazione e gestione efficiente (SDG 6) e da ossatura di una città sostenibile (SDG 11). Il tratto distintivo del punto di vista dell'autrice sta nell'assumere l'integrazione infrastruttura / paesaggio come problema di 'scalabilità' degli obiettivi: l'allineamento tra l'Agenda 2030 e le trasformazioni urbane richiede una negoziazione continua e compromessi tra innovazione e giustizia sociale, tra estetica e responsabilità ecologica, tra tutela degli ecosistemi e pressione alla trasformazione. In questo senso la trattazione allarga consapevolmente il campo alle relazioni con infrastrutture e innovazione (SDG 9), azione per il clima (SDG 13), tutela degli ecosistemi (SDG 15) e partenariati (SDG 17) senza ridurre la complessità a slogan. La chiave di lettura del saggio è 'trasferibile' soprattutto come approccio critico: nel trattare l'acqua come matrice di progetto e al contempo come parametro di giustizia l'autrice lascia intenzionalmente un nodo aperto – la traduzione di questa etica in strumenti di governo, manutenzione e decisione pubblica – perché senza tali dispositivi l'integrazione rischia di rimanere retorica.

Se Falzetti rivendica l'acqua come criterio che ricuce infrastruttura e paesaggio, D'Ambros e Tornieri (2025) spingono questa tesi in un territorio 'anfibio' dove tale ricucitura è una condizione di sopravvivenza. Il Lago Loktak, letto attraverso la 'idrologia culturale', diventa un laboratorio per ripensare insieme acqua, energia e lavoro: le Athapum Phumdi – biomassa galleggiante – sono riconosciute come infrastrutture ecologiche che filtrano l'acqua e al tempo stesso sostengono pratiche abitative e produttive. Il valore del contributo risiede nella messa a punto di un modello, quello della 'circolarità galleggiante', fondato su materiali elementari e su tre scale che ridimensionano l'idea di progetto come controllo: territorio, sostentamento e specie (non solo umana). In questo quadro emergono sinergie con l'SDG 6 (acqua come diritto e bene primario), l'SDG 8 (resilienza economica delle comunità attraverso pratiche e governance partecipativa), l'SDG 10 (riduzione delle disuguaglianze) e l'SDG 11 (sostenibilità degli insediamenti), senza tuttavia trascurare i compromessi. La Diga di Ithai è assunta come 'elemento di contraddizione': l'energia idroelettrica migliora accessibilità ed efficienza (SDG 7) ma stressa i processi ecologici che rendevano adattivo il sistema; da qui l'invito a valutare le infrastrutture non solo per la resa, ma per la loro compatibi-

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

lità con cicli ecologici, economie locali e biodiversità. La lettura del Lago si estende poi agli SDG 1, 2 e 3 (povertà, alimentazione, salute), analizza criticamente il rapporto con innovazione e infrastrutture (SDG 9) e apre alla lettura degli SDG 13, 14 e 15 in chiave post-crescita. L'importanza del caso studio sta nel fornire una morfologia insediativa adattiva per lagune, laghi e delta esposti alle oscillazioni idriche, seppur la natura estensiva delle pratiche, che garantisce equilibrio e continuità culturale, non produce automaticamente diversificazione economica. È in questa tensione – tra sostenibilità ecologica e forme di sviluppo – che il Loktak dialoga con i contributi successivi sui paesaggi produttivi e sulle tecnologie agro-energetiche.

Secondo Marandino (2025) l'integrazione tra cicli idrici, regimi energetici e lavoro non può essere affidata né alla sola tradizione né alla sola infrastrutturazione 'pesante', supportando tale tesi con una revisione della letteratura che mira a orientare scelte in un campo in rapida espansione: i sistemi agrivoltaici, promossi come risposta simultanea a stress idrico, domanda energetica e vulnerabilità delle economie rurali. La novità metodologica non sta nel ribadire che agricoltura ed energia possano coesistere nello stesso suolo, ma nel mettere in relazione dentro una griglia unica tre prospettive spesso separate – tecnologica, agro-ambientale e socio-economica – e nel rendere leggibile l'evoluzione del dibattito scientifico combinando scoping review, letteratura grigia e mappature bibliometriche. Il risultato è un quadro che opera alla scala paesaggistica e periurbana con ricadute immediate su politiche e progetti: modularità, ombreggiamento controllato e multifunzionalità diventano criteri di progetto e sono discussi alla luce degli SDG 6, 7 e 8, con un'estensione all'SDG 3 quando la review intercetta i temi della salute e della sicurezza. L'approccio critico del contributo rileva una letteratura disomogenea in cui le metriche e i livelli di dettaglio non sono comparabili, mentre i co-benefici dichiarati (risparmio idrico, resilienza climatica, biodiversità e reddito) dipendono in modo decisivo da modelli di governance e dalla distribuzione dei benefici lungo la filiera; in altre parole l'agrivoltaico può attivare nuove professionalità ibride tra agricoltura ed energia e rafforzare comunità locali, oppure può generare conflitti d'uso del suolo e impatti paesaggistici se ridotto a mera infrastruttura energetica. La sua utilità per l'Agenda 2030, come mostra il contributo, passa quindi dalla capacità di valutare ex ante compatibilità locali, requisiti prestazionali e condizioni sociali di accettazione, per evitare, su scala rurale, le contraddizioni già viste nei grandi interventi idro-energetici.

Anche Follesa, Farahbakhsh e Song (2025) si misurano con il complesso tema dei paesaggi produttivi, e in particolare con il rapporto tra suolo agricolo e pianificazione urbana: in un contesto nel quale la mancanza di spazio e la frammentazione decisionale rendono più fragile ogni promessa di integrazione, l'agricoltura urbana assume il valore di infrastruttura socio-ecologica capace di connettere gestione dell'acqua, produzione energetica e inclusione economica. La cornice dichiarata (SDG 6, 7, 8 e 12) si amplia nel testo quando si discutono da un lato mitigazione dell'isola di calore e adattamento climatico (SDG 11 e 13), dall'altro filiere corte e accesso a cibo sano (SDG 2). Il salto concettuale sta nell'innesto di uno strumento mutuato dal Service Design: le 'mappe della domanda' sono usate per visualizzare priorità, motivazioni e bisogni – anche latenti – e per promuovere, su basi condivise, un patto tra desiderabilità sociale e fattibilità tecnico-ambientale. In questo modo il contributo degli autori sposta il focus dall'oggetto al processo: i dispositivi (fitodepurazione e riuso delle meteoriche, tetti agrivoltaici, biodigestori, smart grid e microreti) diventano componenti di un sistema di servizi e governance, più che 'tecnologie da installare'. Il contributo assume rilevanza anche sul piano critico perché riconosce che le barriere principali sono prevalentemente organizzative e culturali e che i compromessi, tra competizione per l'uso del suolo, infrastrutture energetiche e aspettative, richiedono negoziazione e pianificazione partecipativa. L'approccio metodologico adottato è altamente trasferibile grazie alla verificabilità dei risultati: la fase di monitoraggio propone KPI misurabili e individua strumenti digitali e database condivisi per rendere confrontabili nel tempo efficacia e impatti; la sua diffusione dipende tuttavia dalla capacità delle Amministrazioni di sostenere nel tempo la filiera decisionale che le mappe rendono visibile.

Ahmed e Capuano (2025) spostano l'attenzione sui paesaggi post-estrattivi, mostrando come l'acqua da semplice vincolo o residuo possa diventare vettore di rigenerazione territoriale. La tesi, esplicitata già nel quadro teorico, è che l'acqua possa agire come infrastruttura capace di ricomporre paesaggi post-estrattivi compromessi, trasformando fratture topografiche e sistemi idrici degradati in spazi pubblici e habitat funzionali. L'originalità è duplice: da un lato l'articolo lavora prevalentemente alla scala paesaggistica e periurbana, senza perdere di vista la città considerando accessibilità, continuità storico-culturale, mobilità dolce e impatto sociale come criteri progettuali insieme alle prestazioni ecologiche e spingendo la rigenerazione oltre la sola 'rinaturalizzazione' di grandi siti; dall'altro il raffronto tra Amburgo e Roma è usato come strumento critico che si avvale di indicatori specifici per valutare il successo di un'infrastruttura blu in contesti diversi. L'ex impianto idrico di Kaltehofe, ricostruito nella sua genealogia infrastrutturale, mostra come un'opera tecnica possa evolvere in paesaggio didattico e dispositivo ecologico; al contrario l'area Tiburtina-Aniene viene assunta come campo aperto di opportunità e di rischio in cui le cave e i sistemi idrici si sovrappongono a pressioni industriali, espansione urbana e fragilità di governance: il confronto tra i casi volutamente 'sbilanciato' evita la retorica della buona pratica esportabile ovunque e suggerisce che la vera trasferibilità non risiede nella replica dei progetti, ma nell'adozione del metodo di analisi e di decisione che ne ha orientato gli esiti. Sul piano degli SDG la cornice operativa si presta a una lettura integrata: l'SDG 6 è chiamato in causa come riorganizzazione dei cicli idro-ecologici e delle qualità dell'acqua, l'SDG 11 come costruzione di sistemi accessibili e connessi, l'SDG 15 come incremento del valore ecologico e l'SDG 8 come riattivazione di economie post-estrattive e del Patrimonio industriale. Il rischio più insidioso che il confronto implicitamente segnala è la conversione della rigenerazione in dispositivo di rendita o di spettacolarizzazione: quando la cava diventa oggetto isolato l'acqua resta scenografia; quando invece è assunta come infrastruttura la rigenerazione può produrre simultaneamente resilienza, memoria e spazio pubblico a patto di essere in grado di governare tempi lunghi, manutenzione e conflitti d'uso.

Angelucci e Shatvoryan (2025) riportano l'attenzione alla fase concettuale, quella in cui si formulano le domande, si tessono le alleanze e si definiscono i criteri. La sperimentazione sul Circular Park di Ye-

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

revan supera il ruolo dell'acqua come materiale compositivo e lo trasforma in bene comune e agente regolativo capace di ristabilire relazioni tra suolo, verde, microclima, sottosuolo ed edifici entro uno spazio pubblico storico oggi minacciato da privatizzazioni e viabilità. L'originalità della sperimentazione è metodologica e consiste nel dichiarare che non si propone un concept 'risolutivo', ma si definisce un processo integrato per produrre dati e conoscenze utili a ragionare, decidere e intervenire, anche in tempi e modalità differenziate. Scenarizzazione e visione sono trattate come pratiche di costruzione di alternative condivise mentre la concettualizzazione diventa un lavoro di integrazione informazionale e non semplice un esercizio di astrazione formale. I risultati si condensano in tre modelli di riconnessione, che fungono anche da dispositivi di passaggio tra scale: la riconnessione verticale (acqua / verde / suolo) mette a tema depavimentazioni, permeabilità, accessibilità e reintegrazione vegetale; la riconnessione obliqua (edifici / fontane / utenti) introduce recupero, stoccaggio e riuso delle acque meteoriche e ripensa il sistema delle fontane come attrattore pluristagionale e come leva di mitigazione dell'isola di calore; la riconnessione orizzontale (città / fiume / parco) assume la riattivazione del Fiume Getar come meso-ecosistema blu-verde strutturante, capace di restituire al parco porzioni oggi dedicate alla viabilità. La trasferibilità non coincide con la possibilità di replicare soluzioni, ma con una postura progettuale di mediazione attraverso l'uso di dati eterogenei, logiche qualitative e prestazionali e un set di descrittori che produce una prevalutazione quali-quantitativa dei miglioramenti ipotizzabili in relazione agli SDG. La connessione con l'Agenda 2030 è esplicitata in filiere: la qualità delle risorse idriche (SDG 6 e 14) è letta come leva che rafforza la resilienza urbana (SDG 11 e 13) e rivitalizza componenti biofisiche e produttive (SDG 12 e 15); la co-progettazione del bene comune (SDG 17) è proposta come condizione per sviluppo economico responsabile (SDG 8), esiti salutogenici (SDG 3) e inclusione / cultura (SDG 4 e 10).

Nel contributo di Van der Meulen et alii (2025) l'acqua diviene un elemento per valutare conflitti e potenzialità in un contesto in cui le città d'acqua del Nord Europa sono laboratorio quotidiano, poiché sono abituate da secoli a negoziare con pioggia, fiumi e mare. Il punto di partenza è la constatazione che la quantità di soluzioni sviluppate negli ultimi anni rischia di rimanere episodica se manca un'alfabetizzazione condivisa. Da qui l'idea di costruire una vera e propria 'tassonomia per progettare con l'acqua' nei contesti urbani, che organizza le esperienze secondo scale, funzioni e modalità di gestione, muovendosi fra gli SDG 6, 7, 8, 11, 13 e 15. L'ambito è quello della progettazione urbana e del paesaggio, ma si estende anche a quello della progettazione ambientale: il testo ricostruisce i passaggi di alcuni progetti chiave rileggendoli soprattutto come elementi di un repertorio, restituendo diagrammi, abachi e mappe che indicano come combinare dispositivi e come intrecciare drenaggio, mitigazione climatica, uso sociale, ecologia e manutenzione. L'originalità sta proprio in questo lavoro puntuale: il progetto non è solo 'caso studio' ma è un dispositivo che permette di formulare categorie e regole di composizione. La trasferibilità dell'approccio va cercata invece nella possibilità di usare la tassonomia come strumento di confronto tra contesti per determinare quali combinazioni sono realistiche in città dense e calde, quali in contesti più rarefatti, quali condizioni istituzionali e di manutenzione servono affinché le soluzioni producano benefici reali.

Campisi e Lombardo (2025) forniscono un ulteriore avanzamento sul tema: se il precedente contributo individua una specifica tassonomia di dispositivi 'Progettare con l'Acqua' si interroga su come essa entri nel processo di progetto e di pianificazione, evitando che la dimensione idrica resti un'aggiunta a valle. Il contributo si colloca all'incrocio tra tecnologia dell'architettura, urbanistica e valutazione ambientale e assume l'obiettivo esplicito di costruire un 'protocollo multi-fase' che accompagni il progetto dalla lettura del contesto alla verifica ex post, attraverso analisi, scenari, linee guida e indicatori. Il testo dimostra che parlare di SDG 6 (e dei suoi legami con gli SDG 7, 11, 12 e 13) significa ridefinire l'intero ciclo decisionale: le autrici individuano fasi e strumenti per strutturare diagnosi climatiche e idrologiche, impostare obiettivi prestazionali coerenti, selezionare dispositivi e valutarne impatti e cobenefici. L'originalità del contributo risiede nella volontà di trasformare esperienze frammentarie in un percorso replicabile che possa entrare nei documenti di Piano, nei concorsi di idee e nelle pratiche di coordinamento tra progettisti e Amministrazioni. In questo senso si esplicita un cambio di scala disciplinare: l'acqua non è più solo tema di dettaglio architettonico o di sistemazione esterna, ma è criterio di struttura che deve informare gli strumenti regolatori. La sua trasferibilità si misura nella capacità di adattare il protocollo in contesti geografici diversi mantenendo costante la logica di fondo: partire dai flussi e dagli usi, fissare target, scegliere e combinare soluzioni da monitorare.

Se il protocollo rende esplicito il percorso dall'analisi al progetto il contributo di Marin, Giannini e Tucci (2025) mostra cosa significa tradurre questo percorso in uno strumento concreto capace di influenzare subito le scelte di progetto. La gestione resiliente delle acque meteoriche è affrontata qui con un duplice sguardo: da un lato l'inquadramento urbano e normativo con l'obiettivo di coniugare invarianza idraulica e idrologica, prevenzione dei danni da allagamento e miglioramento delle condizioni microclimatiche, dall'altro lo sviluppo di un tool (WMs) che guida i progettisti nella scelta e nel dimensionamento dei sistemi di drenaggio urbano sostenibile. La ricerca opera a scala di comparto urbano e di spazio aperto, in un ambito disciplinare trasversale all'idraulica urbana, alla progettazione ambientale e agli strumenti digitali per il supporto alle decisioni. L'originalità risiede nell'ibridazione tra modellazione parametrica e strumenti più accessibili (come i fogli di calcolo Excel) e nella definizione di un workflow che porta dalla caratterizzazione del sito e degli eventi di pioggia alla selezione di combinazioni di soluzioni per chiudere con la loro verifica prestazionale in scenari climatici sempre più avversi. Il contributo ha un valore critico perché esplicita anche i limiti del metodo: disponibilità di dati, ipotesi semplificative, distanza tra ciò che il tool può suggerire e ciò che le norme e i budget consentono di realizzare. Ed è proprio in questo scarto che si gioca la trasferibilità: il modello è presentato come base per costruire regolamenti locali, capitolati e linee guida che avvicinino le pratiche correnti a una reale capacità di adattamento.

Il testo di Barosio et alii (2025) sposta il focus sul lato energetico del metabolismo urbano, interrogando la forma della città in relazione ai Positive Energy Districts a scala di quartiere e di aggregati edilizi con un impianto che intreccia progetto urbano, fisica tecnica e politiche europee per la decarbonizza-

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

zione. La domanda di fondo è semplice e radicale: quali configurazioni morfologiche rendono possibile, o almeno facilitano, il bilancio energetico positivo che i PED dovrebbero conseguire? Per rispondere gli autori mettono a punto un set di indicatori morfologici che si relazionano con il potenziale di produzione da rinnovabili, fabbisogni e capacità di accumulo. L'originalità sta nell'aver costruito una grammatica quantitativa che permette di passare dall'idea di 'quartiere energeticamente virtuoso' a un sistema di misure e soglie, facendo emergere sinergie e conflitti fra obiettivi di efficienza, qualità dello spazio pubblico, densificazione e ventilazione naturale. In termini di Obiettivi di Sviluppo Sostenibile la ricerca intercetta in primo luogo l'SDG7, ma apre inevitabilmente agli SDG 9, 11 e 13 poiché mostra come la stessa forma urbana condizioni accessibilità, comfort, mobilità e vulnerabilità agli estremi climatici. La trasferibilità si gioca su due piani: come strumento di lettura retrospettiva – per valutare quartieri esistenti e orientare priorità di intervento – e come guida ex ante per nuove urbanizzazioni e processi di rigenerazione che vogliano integrare, e non solo dichiarare, l'obiettivo PED.

Il contributo di Eixerés Ros (2025) sposta il focus su contesti apparentemente marginali – i villaggi rurali in crisi – per mostrare che anche lì è possibile sperimentare nuove forme di metabolismo idrico-energetico e di lavoro. Il progetto della Cooperativa edilizia ad Almenara (Spagna) è riportato come dispositivo socio-spaziale che prova a tenere insieme accessibilità all'abitare, condivisione di servizi energetici e idrici, reddito e radicamento territoriale. L'ambito disciplinare è quello della progettazione architettonica ma trasversalmente si riferisce anche a studi urbani e sociali: il testo lavora alla scala dell'edificio e del piccolo insediamento, ma ragiona in termini di sistema locale mettendo in discussione il modello di casa unifamiliare dispersa e quello, altrettanto fragile, della monocultura turistica. L'originalità sta nel far coincidere scelte spaziali e organizzative: modelli cooperativi di proprietà, gestione e manutenzione che impattano direttamente sugli SDG 6 e 7, ma anche sugli SDG 8 e 11, nella misura in cui producono economie di scala, riducono la vulnerabilità e generano lavoro di cura e gestione non precario. Proprio questa ibridazione rende tuttavia evidente che la trasferibilità non è neutra: replicare il modello richiede condizioni normative (suoli, diritti d'uso, strumenti di finanza etica, ecc.), capacità delle comunità di auto-organizzarsi e una regia pubblica che accompagni processi lenti e spesso conflittuali. Il contributo è di interesse perché esplicita questi vincoli invece di occultarli: mostra il potenziale dei 'piccoli insediamenti' come laboratori della transizione, ma al contempo ricorda che senza infrastrutture sociali e istituzionali adeguate il rischio è di trasformarli in enclave per pochi, più che in dispositivi di riequilibrio territoriale.

Il testo di Dessì et alii (2025) affronta la sfida di sviluppare nuovi habitat attraverso l'agricoltura e il ciclo dell'acqua all'interno di architetture e tessuti esistenti, spesso densi e stratificati, valutando tetti, logge, facciate e vuoti interstiziali come luoghi in cui acqua, energia e suolo possono essere ricombinati per produrre cibo, raffrescamento, ombra e biodiversità. La mappatura tipologica – che analizza forme edilizie, esposizioni, accessibilità e possibilità di accumulo e riuso delle acque meteoriche – non è un semplice inventario, ma struttura una matrice di compatibilità che lega ogni soluzione a condizioni tecniche, gestionali e sociali. La griglia degli SDG coinvolti è ampia (2, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 15 e 16): la produzione alimentare locale e la riduzione dei rifiuti organici determinano efficienza idrica ed energetica, riduzione dell'isola di calore, incremento di habitat e costruzione di micro-comunità di pratica. La proposta più forte – e più esposta a critiche – è l'idea che queste superfici possano diventare infrastrutture produttive diffuse: questo implica che le architetture non siano più pensate solo come involucri, ma come componenti di filiere agro-energetiche che redistribuiscono responsabilità e lavoro. Qui la trasferibilità dipende in larga misura dalla capacità di costruire modelli di gestione credibili: chi coltiva, chi manutiene, chi beneficia e come sono distribuiti rischi e oneri? Il merito del contributo sta nel non fermarsi all'immagine del 'tetto verde produttivo', ma nel far emergere la dimensione organizzativa come condizione per evitare che l'innovazione resti episodica o, peggio, produca nuove disuguaglianze nell'accesso a cibo e spazi.

In questa variazione di scala – dal paesaggio rurale ai tetti coltivati – il contributo di Tucci, Mitrik e Montagner (2025) stringe ulteriormente la lente di indagine sulla dimensione tecnico-prestazionale dell'edificio, senza però rinunciare a un confronto con le implicazioni spaziali e d'uso. La combinazione di muro di Trombe e labirinto termico è indagata come dispositivo bioclimatico integrato, capace di modulare guadagni solari, inerzia termica e ventilazione naturale in contesti climatici diversi. Gli ambiti disciplinari sono quelli della tecnologia dell'architettura e della fisica tecnica che guidano la ricerca alternando modellazione, simulazioni dinamiche e valutazione multicriteriale. L'originalità non è solo nell'accostamento di due sistemi passivi noti, ma nel modo in cui ne vengono analizzati configurazioni, prestazioni e limiti: le diverse varianti sono valutate non solo per il risparmio energetico (SDG 7, 13), ma anche per gli effetti sul comfort, sulle condizioni igrotermiche e sulle possibilità di integrazione nel linguaggio architettonico (SDG 11). Ne emerge un quadro in cui l'efficienza non è gratuita: alcune soluzioni occupano spazio, richiedono manutenzione e condizionano aperture e rapporti con l'esterno, mentre altre demandano molto al comportamento degli utenti. Proprio qui il contributo acquista spessore critico rispetto all'Agenda 2030, mostrando come l'adozione di tecnologie passive sia un processo di negoziazione tra forme, funzioni, costi, aspettative e capacità tecniche locali. La trasferibilità è elevata sul piano metodologico perché la sequenza analitica può essere replicata per altri sistemi ibridi, sebbene condizionata da contesti climatici, normative e culture costruttive, ricordando che il comfort a basso impatto ambientale richiede tempo, competenze e una cura progettuale che i protocolli standardizzati tendono a comprimere.

Il contributo di Mangiatordi (2025) attenziona l'architettura e la sua dimensione più sociale, quella di infrastruttura socio-economica che organizza lavoro, reddito, cura e diritti. A partire da uno stato dell'arte sulla condizione demografica e sanitaria – l'invecchiamento della popolazione e la crescente domanda di cura – il contributo si interroga su cosa significhi parlare di SDG 6, 7 e 8 dentro l'universo delle Residenze Sanitarie Assistenziali (RSA). L'ambito disciplinare è ibrido: urbanistica, progettazione architettonica, economia del progetto e politiche sociali si intrecciano in un'analisi che lavora dalla scala del singolo edificio a quella della rete di servizi. L'originalità sta nel rifiuto della dicotomia 'costo / welfare' e

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

in una chiave di lettura delle residenze per anziani in termini di asset che incidono simultaneamente su salute (SDG 3), efficienza energetica e qualità ambientale (SDG 7, 11, 13), condizioni di lavoro e qualità dell'occupazione nel settore socio-sanitario (SDG 8), capacità dei territori di garantire uguaglianza e coesione (SDG 1, 10). Attraverso una tassonomia del Patrimonio esistente, scenari di riqualificazione e criteri di valutazione economica il contributo mostra che scelte progettuali e gestionali diverse possono produrre effetti divergenti nel lungo periodo: edifici pensati solo per minimizzare i costi iniziali generano spese energetiche e sociali crescenti, mentre interventi che combinano efficienza, qualità spaziale e apertura al quartiere possono invece attivare economie locali, nuova occupazione qualificata e reti di prossimità. La trasferibilità è alta perché il metodo – che prende in esame congiuntamente layout, prestazioni energetiche, modelli di gestione e impatti economico-sociali – è applicabile a un'ampia gamma di infrastrutture della cura. Il contributo tuttavia non nasconde potenziali criticità: finché la logica di investimento resta centrata su ritorni a breve termine, la promessa degli SDG nelle RSA rischia di restare dichiarazione di principio.

Con il contributo di Capasso et alii (2025) si compie un ulteriore salto di scala e si prendono in esame i materiali senza però perdere il legame con le questioni di metabolismo territoriale e di infrastrutture della cura. L'analisi LCA su prodotti edilizi in canapa mette a fuoco di cosa sono fatte le 'architetture sostenibili' e quali cicli energetici incorporano. L'originalità risiede nel confrontare configurazioni diverse mettendo in luce come la riduzione di energia e di emissioni non sia garantita dal materiale in sé ma dipenda da scelte progettuali e produttive specifiche. In questo senso il contributo ha un elevato valore critico nel rilevare che la corsa ai biomateriali rischia di essere una semplice strategia di marketing se non accompagnata da una lettura attenta dei sistemi di approvvigionamento, dei processi di trasformazione, dei trasporti e del fine vita. La trasferibilità dello studio è duplice: da un lato la LCA costituisce un modello replicabile per altri prodotti e sistemi, offrendo a progettisti e decisori politici un linguaggio comune per discutere di prestazioni e di scelte di capitolato in chiave Agenda 2030, dall'altro il focus sulla canapa apre il tema delle filiere agro-edili come potenziale terreno di lavoro dignitoso e di rigenerazione rurale, ma richiama anche alla necessità di evitare nuove monoculture estrattive improvvisate poiché la 'bassa energia incorporata' è il risultato di un 'equilibrio' fra produzione, trasformazione e impieghi locali.

Su questa linea di ragionamento si colloca la review article di Thiébat et alii (2025) che allarga l'osservazione alle fibre naturali in architettura e alla loro potenziale circolarità. L'ambito disciplinare è dichiaratamente transdisciplinare: tecnologia dell'architettura, ingegneria dei materiali, studi socio-economici e valutazione ambientale convergono in una lettura che tiene insieme prestazioni tecniche, impatti ambientali e condizioni sociali di produzione. In questo scenario l'Agenda 2030 viene usata come griglia per leggere, nei diversi studi analizzati, quali obiettivi vengano effettivamente presi in carico e quali restino ai margini. L'originalità del contributo non sta tanto nel proporre l'ennesima tipologia di fibre naturali 'virtuose', quanto nel mettere in evidenza le criticità: il fatto che un materiale derivi da una risorsa rinnovabile non garantisce automaticamente condizioni di lavoro eque, una distribuzione equilibrata dei benefici lungo la filiera e la compatibilità con i contesti locali. La review mostra come una parte rilevante della letteratura si concentri su indicatori ambientali consolidati, mentre le dimensioni sociale ed economica di lungo periodo siano ancora poco indagate o affrontate in modo frammentario: questa asimmetria suggerisce campi di ricerca su cui intensificare l'attenzione per non trasformare la circolarità in una narrazione monca.

Il contributo di Badalucco et alii (2025) riporta l'attenzione su un oggetto tecnicamente molto specifico – il sistema Discoil – per mostrare come le logiche di circolarità e durabilità possano essere tradotte nella progettazione di componenti industriali. Il cambio di scala è netto poiché siamo nel cuore della meccanica di un prodotto tecnico che incide, in modo meno visibile, su consumi energetici, manutenzione, tempi di fermo degli impianti, costi e sicurezza del lavoro; l'ambito disciplinare è quello del design di prodotto orientato alla sostenibilità, a cavallo tra ingegneria e project management. L'analisi evidenzia punti deboli e potenzialità del prodotto, mettendo in relazione configurazioni geometriche, scelte di materiali, modalità di assemblaggio e scenari di uso e riuso. L'originalità risiede soprattutto nella prospettiva di lungo periodo: la durabilità non è trattata come semplice aumento della vita utile, ma come fattore che ridisegna intere catene di attività e che quindi ha effetti diretti sul lavoro e sulle competenze. Progettare per durare, suggerisce l'articolo, non significa solo 'fare cose che non si rompono', ma ripensare modularità, accessibilità, riparabilità, documentazione e tracciabilità, cioè un insieme di aspetti che da un lato possono ridurre i rifiuti e i consumi energetici associati alle sostituzioni, dall'altro possono migliorare condizioni operative e sicurezza degli addetti. La trasferibilità dello studio sul caso Discoil è importante proprio perché non propone un oggetto esemplare da imitare ma un metodo: identificare i punti critici di un sistema produttivo esistente, immaginare scenari di uso e di manutenzione più lunghi e flessibili, verificare le conseguenze ambientali ed economiche di queste trasformazioni consente di creare un diverso rapporto tra tempo, progetto e lavoro, in cui i dispositivi tecnici sono pensati per accompagnare la transizione anziché consumarla rapidamente.

Il contributo di Süyük e Yücesan (2025) introduce un ulteriore salto, non di scala ma di lettura: l'acqua e la materia organica diventano strumenti con cui rendere visibili processi ecologici altrimenti invisibili. Il contributo lavora su una scala ibrida fra installazione e micro-architettura per sperimentare il potenziale estetico, sensoriale e didattico dei cicli idrici e biologici. L'ambito disciplinare è quello della ricerca attraverso il design, tra tecnologia dell'architettura, interaction design e installazioni artistiche all'aperto: il prototipo impiega acqua, substrati, micelio e luce per far emergere le dinamiche di assorbimento, la crescita e la decomposizione dei microrganismi, in un continuo dialogo con le condizioni ambientali e con l'intervento umano. Il riferimento agli SDG 3, 6, 9, 11, 12, 13, 15 e 16 non è un'appendice del testo: salute e benessere, qualità delle acque, innovazione e infrastrutture, città e comunità sostenibili, mo-

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

delli di consumo responsabile, azione per il clima, tutela degli ecosistemi terrestri e costruzione di Istituzioni inclusive si intrecciano nello sforzo di costruire 'ambienti di apprendimento' in cui il pubblico è esposto ai processi, non solo agli esiti. L'originalità risiede nel fatto che la sperimentazione non cerca un output standardizzabile, ma un set di principi che potrebbero essere trasferiti a una vasta gamma di micro-installazioni per scuole, musei e spazi pubblici. È proprio questa dimensione di 'generale' che rende il lavoro prezioso: esso mostra limiti concreti e li assume come parte della ricerca, ricordando che l'uso dell'acqua e del vivente nel progetto implica responsabilità etiche, tecniche e organizzative.

L'articolo di Bianconi et alii (2025) sposta la ricerca dal laboratorio fisico a quello cognitivo e comunicativo, interrogando un altro nodo spesso trascurato della transizione: la comprensibilità dei sistemi energetici emergenti. Il contributo su HEHS affronta un sistema altamente tecnico – lo stoccaggio dell'idrogeno – e ne indaga la traduzione in linguaggi visivi e interfacce capaci di rendere trasparenti processi, rischi e potenzialità. L'ambito disciplinare è quello del visual communication design innestato sull'ingegneria energetica e sull'interazione uomo-macchina: il lavoro analizza identità visive esistenti legate all'idrogeno, ne estrae pattern cromatici e iconografici, li misura rispetto a criteri di leggibilità e accessibilità e infine li riorganizza in una grammatica di segni, gradienti e schemi. L'uso di strumenti di intelligenza artificiale, in particolare di modelli linguistici per simulare differenti profili di utenti, introduce una dimensione meta-riflessiva: la validazione non è affidata solo agli esperti ma a una pluralità di sguardi 'modellati' che interrogano comprensibilità, ambiguità e potenziali fraintendimenti. In termini di Obiettivi di Sviluppo Sostenibile la ricerca si rivolge agli SDG 7, 9, 12 e 13: energia pulita e accessibile, innovazione e infrastrutture resilienti, modelli di produzione e consumo responsabili e azione per il clima. L'originalità sta nel riconoscere che questi obiettivi possono essere ostacolati, oltre che da limiti tecnici, anche da deficit di comunicazione e di fiducia: se l'idrogeno resta percepito come tecnologia pericolosa le infrastrutture rischiano di scontrarsi con l'opposizione sociale e di non innescare quelle filiere di lavoro qualificato che la transizione auspica. La trasferibilità dello studio è evidente: il metodo per derivare e testare sistemi visivi, metodi di codifica, palette e icone può essere adattato a molti altri dispositivi complessi, a patto di mantenere un equilibrio critico tra potere sintetico dei codici grafici e loro capacità di non occultare la complessità.

Se HEHS mostra come la transizione energetica abbia bisogno di nuovi 'abachi visivi' per essere compresa e accettata, il contributo di Franzo, Quartu e Tufarelli (2025) affronta un intero settore produttivo – la moda – per mostrare quanto sia necessario, e difficile, rimodellare contemporaneamente le infrastrutture materiali e quelle simboliche. L'ambito disciplinare è quello del design dei sistemi e delle politiche, con una forte contaminazione con studi organizzativi e socio-economici: mapping nazionale, analisi di casi, interviste e strumenti di visualizzazione dei dati sono usati per tracciare tre linee di trasformazione – sistemi circolari, scenari phygital e forme di formazione informale – che intrecciano gli SDG 4, 8, 9 e 12. L'originalità del contributo risiede nel rifiuto della retorica della 'moda verde' e della 'pura digitalizzazione salvifica', mostrando come la circular fashion e il phygital possano aprire nuove opportunità, ma anche generare nuove forme di precarietà, concentrazione del potere informativo e dipendenza da infrastrutture energetiche e digitali le quali, se non decarbonizzate, spostano semplicemente il carico ambientale altrove. La trasferibilità sta nel metodo più che nelle soluzioni: il lavoro suggerisce come il design possa contribuire a costruire mappe di attori, processi e impatti utili a individuare dove intervenire, quali competenze formare e quali coalizioni favorire per evitare che la transizione si traduca in nuove disuguaglianze.

Nel passaggio dai sistemi di prodotto e dalle filiere agli strumenti di misurazione e governo il contributo di D'Amore (2025) sui gemelli digitali segna uno scarto importante: la transizione non è più soltanto questione di cosa progettiamo, ma di come continuiamo a conoscere e ri-conoscere gli edifici lungo il loro intero ciclo di vita. Il Digital Twin è qui inteso come dispositivo dinamico che connette dati di progetto, monitoraggio in esercizio, scenari previsionali e decisioni manutentive: la raccolta e la pulizia dei dati, la modellazione, l'integrazione con sistemi di gestione tecnica e la restituzione in cruscotti digitali pensati per diversi profili di utenti determinano una sequenza operativa necessaria, se non indispensabile. In questa prospettiva gli SDG 3, 7 e 8 entrano in gioco in modo congiunto: salute e comfort degli occupanti, efficienza energetica e riduzione delle emissioni, qualità e contenuto professionale del lavoro di gestione e manutenzione. L'aspetto critico più interessante riguarda le condizioni di possibilità in quanto senza standard condivisi, infrastrutture digitali adeguate e nuove competenze ibride il Digital Twin rischia di ridursi a simulacro tecnologico. Il contributo esplicita invece che la sua trasferibilità passa da programmi formativi specifici, da una ristrutturazione dei ruoli all'interno delle organizzazioni e da un investimento in processi di lungo periodo, più che da singole piattaforme.

Su questo sfondo l'articolo di Lauria et alii (2025) su efficienza energetica e smartness può essere letto come una declinazione 'di frontiera' tra strumentazione europea e pratiche locali di progetto e gestione. Se il gemello digitale di D'Amore offre una visione infrastrutturale della conoscenza sull'edificio, il contributo su SRI e indici di smartness si colloca al punto di contatto tra norme, metriche e decisioni su un Patrimonio specifico, in questo caso il parco scolastico, particolarmente delicato per il suo intreccio tra gli SDG 4, 7, 9, 11 e 13. L'ambito disciplinare è quello della tecnologia dell'architettura, ma l'operazione è anche chiaramente politica: testare e criticare strumenti europei come lo Smart Readiness Indicator dentro casi reali permette di capire se e come essi riescano a orientare davvero scelte progettuali, priorità di investimento e gestione quotidiana. L'originalità del contributo sta nel combinare valutazioni energetiche consolidate con indicatori di smartness che considerano la capacità dell'edificio di adattarsi, interagire con gli utenti e dialogare con la rete: ne emerge un quadro in cui l'intelligenza non è ridotta alla dotazione di sensori, ma richiede compatibilità con routine d'uso, competenze di docenti e tecnici e vincoli economici delle Amministrazioni. La trasferibilità è data dal metodo comparativo proposto che può essere applicato ad altri segmenti del Patrimonio pubblico, tuttavia il paper se-

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

gnala con lucidità il rischio che indici complessi e poco contestualizzati si trasformino in adempimenti formali, anziché in strumenti di guida per l'azione. In questo senso il collegamento con il Digital Twin è evidente: entrambi i contributi interrogano la distanza, ancora ampia, tra disponibilità di dati e capacità istituzionale di usarli per ridurre realmente consumi, emissioni e vulnerabilità

Il contributo di Palumbo et alii (2025) sposta ulteriormente il focus dal singolo edificio e dai suoi 'rating' a ciò che accade lungo le filiere che consentono la realizzazione, mettendo al centro l'integrazione tra LCA ambientale e LCA sociale e riconoscendo che parlare degli SDG 6, 7 e 8 – e di molti altri connessi, dall'1 al 13 – significa assumere che le performance non si esauriscano in bilanci energetici e idrici, ma includano sicurezza, salute, diritti e distribuzione dei rischi lungo catene di approvvigionamento globali. L'originalità del contributo non si limita a richiamare la necessità di includere la dimensione sociale ma propone strutture di indicatori, matrici e casi applicativi che mostrano come emissioni, consumi idrici, esposizione a sostanze pericolose e condizioni di lavoro possano e debbano essere valutati insieme, evitando che la buona pratica nasconda, a monte, pratiche estrattive o produttive incompatibili con l'Agenda 2030. La transferibilità è alta, seppur ostacolata da alcune barriere: integrare LCA e S-LCA implica l'accesso a dati sensibili, la definizione di criteri condivisi per valutare il rischio sociale e l'assunzione di responsabilità da parte di committenti e progettisti rispetto a scelte di materiali, fornitori e modelli di impresa. In dialogo con i contributi sul Digital Twin e sulla smartness il paper suggerisce un cambio di prospettiva: non basta rendere smart e monitorabili gli edifici se non si controllano gli effetti della loro produzione e manutenzione su lavoratori, comunità e territori lontani. In questa tensione tra scala edilizia e scala della filiera si gioca una parte decisiva della credibilità degli SDG nel settore dell'ambiente costruito.

Il contributo di Fabbri (2025) su PUNTOnet H_2O porta dentro la scala più quotidiana della città l'ambizione di ridefinire il rapporto tra progetto, gestione e filiera attraverso il punto d'acqua di prossimità. Il dispositivo non è presentato come semplice evoluzione della fontanella urbana, bensì come nodo multifunzionale in cui si intrecciano accessibilità all'acqua, monitoraggio dei consumi, informazione e servizi aggiuntivi. L'ambito disciplinare è esplicitamente quello del Design dei servizi e dei prodotti: il progetto nasce da una fase di ascolto e osservazione sul campo, prosegue con mappature delle abitudini, interviste, analisi di scenari e arriva alla definizione di un prototipo che combina componente fisica, infrastruttura digitale e interfacce per la raccolta di dati e la restituzione di feedback agli utenti. La scala è insieme quella dell'oggetto e della rete: il singolo nodo agisce sul micro-spazio pubblico, ma ha senso solo come parte di un sistema distribuito che può incidere sul metabolismo urbano dell'acqua. L'originalità risiede proprio in questo tentativo di tradurre il lessico degli indicatori in interazioni e scelte di uso: PUNTOnet H_2O non 'misura' soltanto, ma cerca di modificare comportamenti, rendendo visibile la qualità dell'acqua, i volumi erogati, la riduzione di bottiglie monouso e le opportunità di ricarica e di sosta. La trasferibilità del modello è alta sul piano metodologico, ma espone con chiarezza il vincolo decisivo: senza una regia pubblica che faccia propria la logica del servizio e ne sostenga nel tempo costi, cura e aggiornamento, anche il più intelligente dei dispositivi rischia di restare un'isola o un arredo urbano sofisticato ma marginale.

Se PUNTOnet H_2O condensa il tema dell'acqua in un dispositivo puntuale il contributo di Sposito e Mittersteiner (2025) ricostruisce il quadro teorico-operativo complessivo in cui nodi come quello proposto dalla Fabbri dovrebbero iscriversi. Il paper propone un vero e proprio cambio di paradigma, assumendo il raffrescamento urbano non come 'effetto' di singole soluzioni, ma come funzione metabolica da progettare intenzionalmente attraverso il riciclo e il riuso dell'acqua. L'ambito disciplinare è dichiaratamente ibrido: progettazione ambientale, urbanistica, idraulica urbana e studi sulle politiche si intrecciano per definire un metabolismo idrico fondato su quattro azioni – Ridurre, Riutilizzare, Recuperare, Rigenerare – che vengono poi articolate in una matrice multilivello. L'originalità sta nel sovrapporre tre livelli di indagine che spesso restano disgiunti: i flussi biofisici (quanta acqua circola, con quale qualità e modalità), le ricadute socio-economiche (chi paga, chi beneficia, quali forme di lavoro e di governance si producono) e i dispositivi di governo (norme, strumenti di pianificazione, modelli finanziari). La matrice 4R proposta viene messa in relazione con i 17 SDG dell'Agenda 2030 e tradotta in un set di indici e di rappresentazioni grafiche che hanno la funzione di rendere visibili sinergie e compromessi prima che le soluzioni diventino irreversibili. La trasferibilità del nuovo paradigma non è immediata come quella di un tool operativo o di un oggetto urbano, ma è forse più profonda: la matrice 4R-SDG suggerisce un modo diverso di organizzare conoscenza, decisioni e responsabilità, chiedendo esplicitamente ad Amministrazioni, progettisti, gestori e cittadini di riconoscersi in un sistema in cui il raffrescamento è il risultato combinato di scelte idriche, energetiche, vegetazionali, spaziali, lavorative, ecc. In dialogo con i contributi precedenti, il paper mostra che il salto di scala – dal nodo di quartiere alla città, dal dispositivo al metabolismo – richiede non soltanto più dati, ma soprattutto strumenti che rendano intelligibile la complessità senza ridurla a punteggi poco trasparenti. È forse questo il contributo 'più politico' del volume: ricordare che l'accelerazione verso gli SDG legati ad acqua, energia e lavoro non dipende solo dalla somma di buone pratiche, ma dalla capacità di dotarsi di cornici valutative condivise che rendano possibile scegliere tra alternative in modo trasparente, assumendo fino in fondo i compromessi che ogni opzione comporta.

Nel loro insieme, i contributi raccolti in questo numero restituiscono un quadro nel quale acqua, energia e lavoro non sono più tre semplici obiettivi dell'Agenda 2030, ma i vertici di un unico campo di forze che attraversa paesaggi produttivi, città, architetture, filiere materiali e infrastrutture digitali. L'insieme dei contributi mostra come la questione idrico-energetica non possa essere confinata né alla scala tecnica del dettaglio né a quella astratta delle grandi strategie, ma richieda una continua interazione tra visione e dispositivo, tra concetto e prova sul campo.

Una prima evidenza riguarda il modo in cui i contributi ridisegnano il rapporto tra scale e discipline. L'acqua compare come matrice di progetto nel paesaggio, nella città, nell'edificio e fino al micro-di-

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

spositivo urbano; l'energia come vincolo e risorsa nella forma degli insediamenti, nei sistemi bioclimatici, nelle tecnologie di stoccaggio e nelle scelte tipologiche; il lavoro come dimensione spesso implicita, ma decisiva nelle cooperative rurali, nelle filiere dei materiali a base biologica, nei servizi della cura, nei mestieri della manutenzione e nelle nuove professionalità digitali. Architettura, Urbanistica, Tecnologia, Design del prodotto, del servizio e della comunicazione, studi socio-economici e politiche pubbliche si contaminano: gli studi più convincenti e di maggiore impatto sono quelli che accettano di lavorare su più fronti contemporaneamente – progettuale, valutativo, organizzativo – mettendo alla prova ipotesi teoriche su casi concreti e viceversa.

Un secondo tratto comune è la centralità delle metodologie. Rispetto a narrazioni ancora diffuse che affidano la transizione a un elenco di 'buone pratiche' i contributi di questo volume insistono sulla costruzione di strumenti: tassonomie e abachi per progettare con l'acqua, protocolli operativi per integrare SDG nelle fasi di progetto, tool per la gestione delle acque meteoriche, set di parametri per i PED, procedure LCA e S-LCA, matrici 4R-SDG, sistemi di indicatori per smartness e gemelli digitali, framework per leggere la circolarità nelle fibre naturali e nei settori produttivi. La ricerca non si esaurisce così nell'enunciazione di principi, ma si incarica di tradurli in sequenze operative e in apparati di misura che, pur con i loro limiti, rappresentano il prerequisito per qualsiasi scalabilità. L'originalità di molti contributi sta proprio nel mettere in dialogo strumenti nati in domini diversi – dal Design dei servizi alla bibliometria, dalla simulazione termo-energetica alle scienze dei dati – per costruire letture più robuste di sinergie e compromessi.

In terzo luogo i contributi invitano a valutare con maggiore attenzione la dimensione del compromesso. Lungi dal proporre una visione armonica degli SDG molte ricerche mostrano tensioni difficili da sciogliere: tra produzione energetica e uso del suolo agricolo, tra rigenerazione ecologica e dinamiche di rendita, tra comfort edilizio e vincoli morfologici, tra promesse dei biomateriali e condizioni reali di lavoro nelle filiere, tra sofisticazione degli indicatori e capacità istituzionale di usarli, tra circolarità e precarietà in settori come la moda. È un dato che va letto non come segno di debolezza, ma di maturazione: la transizione che emerge da questi contributi è meno rassicurante ma più credibile, perché riconosce che ogni scelta comporta perdite e guadagni differenziali e che il compito del progetto – e degli strumenti valutativi che lo accompagnano – è rendere espliciti questi compromessi senza occultarli sotto etichette generiche di sostenibilità. Il contributo forse più importante del volume riguarda la trasferibilità.

Quasi tutte le ricerche, pur radicate in contesti specifici, lavorano per identificare elementi che possano 'essere trasferiti': matrici di compatibilità, descrittori di riconnettività, checklist di durabilità, sequenze per la prototipazione e il test, modelli di governance, dispositivi di comunicazione visuale, processi di co-progettazione e criteri per integrare dimensioni ambientali e sociali nella valutazione costituiscono nuove infrastrutture di pensiero e di azione che possono essere adattate criticamente ad altri territori e settori. Il volume in questo senso mostra una tensione costante a uscire dal perimetro dei casi per costruire 'una cassetta degli attrezzi concettuali' che restino utili anche quando lo scenario cambia. Accanto a questi punti di forza emergono anche i limiti di alcuni studi: lo sguardo resta in larga misura nell'ambito euro-mediterraneo, con poche incursioni in contesti extraeuropei; molte sperimentazioni si collocano in condizioni relativamente protette e lasciano intravedere, ma non sempre affrontano, le difficoltà di implementazione in sistemi amministrativi frammentati o in territori deboli; il tema delle disuguaglianze – pur presente – potrebbe essere ulteriormente approfondito, soprattutto rispetto ai lavoratori più vulnerabili delle filiere globali e alle popolazioni urbane e rurali meno rappresentate. Anche la dimensione temporale rimane in alcuni casi compressa: cicli di monitoraggio brevi, valutazioni ex ante che attendono conferme nel lungo periodo, modelli di impresa e di governance ancora da mettere alla prova su orizzonti decennali.

Nel complesso i contributi pubblicati restituiscono bene l'idea che le discipline dell'architettura possono assumere un ruolo strategico per l'Agenda 2030, intervenendo su scelte tecnologiche, forme spaziali, modelli economici e immaginari collettivi. L'acqua, l'energia e il lavoro dignitoso non sono qui semplici 'temi' da rappresentare, ma materiali di progetto e di ricerca che ridisegnano le priorità della disciplina pertanto, in continuità con il volume precedente, l'editoriale invita a chiedersi dove sia necessario approfondire, su quali scale concentrare gli sforzi e quali alleanze disciplinari e istituzionali attivare per trasformare gli SDG da enunciati programmatici in pratiche operative.

Volume 18 of AGATHÓN follows on from the previous volume dedicated to the first five Goals of the 2030 Agenda, shifting the focus to the following three SDGs which, due to their interdependence and the urgency of the crisis, serve as structural hubs for the transition: 'Clean Water and Sanitation' (SDG 6), 'Affordable and Clean Energy' (SDG 7), and 'Decent Work and Economic Growth' (SDG 8). The three themes are part of the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) adopted in September 2015 by the Member States of the United Nations (UN, 2015) and promoted as a call for urgent action to combine prosperity, equitable development and protection of our planet, all while fostering cooperation and partnerships between different countries, between national governments and local administrations, between public institutions and private companies, and between civil society and individuals. However, just five years after the date set for their achievement, the call seems not to have been entirely accepted, if not disregarded altogether, and therefore the scientific community cannot and must not refrain from reflecting on 'where we are now', 'where we are going' and 'where we might still go'. A data-driven assessment of progress is provided by the Global Sustainable Development Report, which, in two subsequent documents (IGS, 2019, 2023), called for appropriate corrections and an urgent acceleration of implementation policies, without which humanity will face prolonged periods of crisis and uncertainty, further jeopardising the principle of 'leaving no one behind' and the protection of the entire ecosystem at a global level. While the 2019 Report noted

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

that the international community needed to pick up the pace on some goals, while confirming that the world was on track for many others, the situation depicted in the 2023 Report is hugely different, as it reports that progress on some goals has not been fast enough and that on others – food security, climate action and biodiversity protection – the world is still moving in the wrong direction.

Given this scenario, it is more urgent than ever to assess 'what needs to be done and how it can be done strategically', considering that, according to the United Nations at the time of defining the SDGs (UN, 2015) and confirmed by the 2019 Report itself, most of the goals are synergistic and that social and environmental goals in particular have systemic impacts that drive overall progress towards achieving all other SDGs. Although scientific literature on the interconnections between SDGs has grown rapidly and numerous studies argue that synergies outweigh trade-offs, there is high and as yet unexplored and untapped potential for achieving simultaneous progress on multiple goals through integrated planning and appropriate strategies; in particular, Goals 1 (no poverty), 2 (zero hunger), 3 (good health and well-being), 4 (quality education), 5 (gender equality), 6 (clean water and sanitation), 7 (affordable and clean energy) and 17 (partnerships for the goals) are identified as strategic in that they can generate benefits for many other goals (Barbier and Burgess, 2019; Randers et alii, 2019; Pham-Truffert et alii, 2020). Nevertheless, achieving the SDGs necessarily requires compromises that often translate into critical issues that current practices do not resolve. Examples include the actions and strategies to promote Goal 2 (zero hunger), where land cultivation and intensive agricultural practices cause soil degradation, pollution and biodiversity loss, or those related to Goal 8 (decent work and economic growth), where uncontrolled growth and development lead to the exploitation of natural resources beyond sustainable limits. These critical issues are confirmed by the recent Global Sustainable Development Report (IGS, 2023), which states that progress on Goals 14 (life below water) and 15 (life on land) is more negatively influenced by progress in other sectors than positively influenced by specific actions.

It should be noted that the nature of the connections in terms of synergies and trade-offs between the different goals can vary significantly depending on the dimensions of 'space' and 'time', but also within other income and population groups: for example, scientific literature shows that poverty reduction has overall positive effects on the 2030 Agenda in low-income countries, but also that integrated strategies addressing climate change and inequalities are more decisive for achieving the goals in high-income countries. However, the latter seem to face more trade-offs than the former, which may partly explain their slower progress toward the SDGs (Nilsson et alii, 2022; Kostetckaia and Hametner, 2022; Lusseau and Mancini, 2019). It should not be overlooked that many interconnections are cross-border in nature: according to the OECD (2019, 2024), 57% of the 169 targets achievable in one country can have repercussions in other regions or countries around the world, crossing national borders through flows of capital, goods, human and natural resources, and positively or negatively influencing their future and development prospects. In this sense, while we cannot afford to generate negative and costly impacts elsewhere, failing to recognise potential positive impacts in 'distant' places is a lost opportunity.

All these variables require a careful understanding of the interconnections in terms of synergies and trade-offs, both to guide scientific research and to define methods and tools capable of reducing trade-offs, addressing uncertainties and capitalising on context-specific opportunities, as well as to support strategic decision-making and promote 'revolutionary' interventions. There are now many tools and methods available for the integrated analysis of the Goals, decision support and progress monitoring (Barquet et alii, 2022), such as the toolbox with guidelines for ex-ante impact assessment promoted by the European Commission (2023). What is needed is a greater ability to think in terms of systems, i.e. to consider the systemic effects of policies, pathways, measures and actions, which is the best possible approach to optimising SDG interactions. Integrating the SDG theme with Digital Humanities also opens up innovative perspectives that can enhance synergies between fields of knowledge and limit compromises between the SDGs themselves. In fact, by providing a new framework in which digital tools and methodologies are applied to the study of the humanities, Digital Humanities promote a systemic and integrated approach to addressing global challenges and analysing the complex dynamics between different goals; these are other ways of monitoring, understanding and improving not only the interaction between the sustainable development goals themselves, but also between these goals and strategies and actions.

Based on these considerations, volume 18 of AGATHÓN, addressing the disciplinary areas of Landscape, Urban Planning, Architectural and Urban Composition, Engineering, Architectural Technology, Design, Restoration and Recovery, and Representation, has selected a series of contributions on the theme of 'Clean Water and Sanitation (SDG 6), Affordable and Clean Energy (SDG 7), and Decent Work and Economic Growth (SDG 8) | Projects, research, synergies and trade-offs with the SDGs' with the aim of fostering open discussion through the collection of essays and critical reflections, research and experimentation, projects and interventions, which are innovative, multidisciplinary and multi-scale in nature, use a systemic approach and deal with aspects of the process (design, production / implementation and management), methodologies and ex-ante and ex-post evaluation models, overcoming limitations, gaps and barriers, enhancing synergies and limiting compromises with other objectives.

The built environment interacts with every objective (Thorne and Duran, 2016). Still, at the same time, it is one of the current challenges because, on the one hand, it is a major consumer of energy and natural resources and a relentless producer of harmful gases and waste. On the other hand, the way we intervene can exacerbate inequalities and affect human health; it is particularly relevant in cities, whose importance in terms of both vulnerability and growth opportunities is implicit in all SDGs, especially considering that by 2050, approximately 70% of the world's population will live in urbanised areas (UN-Habitat, 2022). Once again, what is necessary and urgent is a strategically planned, designed, and implemented human action, consistent with multiple SDGs, capable of ensuring improved quality of life, sustainability, social equity, health, and resilience for communities. With this in mind, the essays and research published address the

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

first five Sustainable Development Goals, recognising that poverty, hunger, health and well-being, quality education and gender equality are not separate domains, but fields of action and reflection that are interconnected with each other and with the other Goals. On this project, – understood in its urban, landscape, architectural and technological extensions – can and must exert a systemic action. The editorial attempts to convey this complexity, highlighting – for each contribution – the theme addressed, the disciplinary field of reference, the project scales involved, the types of action employed and, above all, the importance and transferability of the proposed solutions.

Falzetti's paper (2025) goes beyond viewing water as a simple resource to be managed and interprets it as a design principle for moving away from technical neutrality and beyond mere hydraulic verification, thereby treating it as a cultural and political device. When water infrastructure is 'external' to the construction of open space, the city loses a device capable of guiding practices, values and behaviours; the work is reduced to function, while the climate crisis requires it to become care, responsibility and a criterion of equity. Hence, the choice to read water architectures as thresholds between the symbolic and the operational: the case studies proposed do not serve to celebrate forms, but to show how blue infrastructure can function as a structure of collective well-being (SDG 3), a lever for regeneration and efficient management (SDG 6) and the backbone of a sustainable city (SDG 11). The distinctive feature of the author's point of view lies in assuming the integration of infrastructure / landscape as a problem of 'scalability' of objectives: the alignment between the 2030 Agenda and urban transformations requires continuous negotiation and compromise between innovation and social justice, between aesthetics and ecological responsibility, between ecosystem protection and pressure for transformation. In this sense, the discussion consciously broadens the field to include relations with infrastructure and innovation (SDG 9), climate action (SDG 13), ecosystem protection (SDG 15) and partnerships (SDG 17) without reducing complexity to a slogan. The key to understanding the essay is 'transferable', especially as a critical approach: in treating water as a project matrix and at the same time as a parameter of justice, the author intentionally leaves an open question – the translation of this ethic into instruments of government, maintenance and public decision-making – because without such devices, integration risks remaining rhetoric.

While Falzetti claims water as a criterion that reconnects infrastructure and landscape, D'Ambros and Tornieri (2025) push this thesis into an 'amphibious' territory where such reconnection is a condition for survival. Lake Loktak, viewed through the lens of 'cultural hydrology', becomes a laboratory for rethinking water, energy, and work together: Athapum Phumdi – floating masses of biomass – are recognised as ecological infrastructures that filter water and, at the same time, support housing and production practices. The value of the contribution lies in the development of a model, 'floating circularity', based on elementary materials and operating at three scales that redefine the idea of design as control: territory, sustenance, and species (not only human). In this context, synergies emerge with SDG 6 (water as a right and primary good), SDG 8 (economic resilience of communities through participatory practices and governance), SDG 10 (reduction of inequalities) and SDG 11 (sustainable cities and communities), without, however, neglecting the compromises. The Ithai Dam is taken as an 'element of contradiction': hydroelectric energy improves accessibility and efficiency (SDG 7) but stresses the ecological processes that made the system adaptive; hence the invitation to evaluate infrastructure not only for its yield, but also for its compatibility with ecological cycles, local economies and biodiversity. The interpretation of the lake then extends to SDGs 1, 2, and 3 (poverty, food, health), critically analyses the relationship with innovation and infrastructure (SDG 9) and opens up to an interpretation of SDGs 13, 14, and 15 in a post-growth key. The importance of the case study lies in providing an adaptive settlement morphology for lagoons, lakes and deltas exposed to water fluctuations, even though the extensive nature of the practices, which guarantees balance and cultural continuity, does not automatically produce economic diversification. It is in this tension – between ecological sustainability and forms of development – that Loktak dialogues with subsequent contributions on productive landscapes and agro-energy technologies.

According to Marandino (2025), the integration of water cycles, energy regimes, and labour cannot be entrusted solely to tradition or to 'heavy' infrastructure. He supports this thesis with a review of the literature that aims to guide choices in a rapidly expanding field: agrivoltaic systems, promoted as a simultaneous response to water stress, energy demand and the vulnerability of rural economies. The methodological innovation lies not in reiterating that agriculture and energy can coexist on the same land, but in bringing together three often separate perspectives – technological, agro-environmental and socio-economic – within a single framework and in making the evolution of the scientific debate legible by combining scoping reviews, grey literature and bibliometric mapping. The result is a framework that operates at the landscape and peri-urban scale with immediate implications for policies and projects: modularity, controlled shading and multifunctionality become design criteria and are discussed in the light of SDGs 6, 7, and 8, with an extension to SDG 3 when the review touches on the issues of health and safety. The critical approach of the contribution reveals an uneven literature in which metrics and levels of detail are not comparable, while the stated co-benefits (water savings, climate resilience, biodiversity and income) depend decisively on governance models and the distribution of benefits along the supply chain; in other words, agrivoltaics can activate new hybrid professions between agriculture and energy and strengthen local communities, or it can generate land use conflicts and landscape impacts if reduced to mere energy infrastructure. Its usefulness for the 2030 Agenda, as the contribution shows, therefore depends on the ability to assess ex ante local compatibility, performance requirements and social conditions of acceptance, to avoid, on a rural scale, the contradictions already seen in large hydro-energy projects.

Follesa, Farahbakhsh, and Song (2025) also tackle the complex issue of productive landscapes, and in particular the relationship between agricultural land and urban planning: in a context where lack of space and fragmented decision-making make any promise of integration more fragile, urban agriculture takes on the value of a socio-ecological infrastructure capable of connecting water management, energy produc-

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

tion and economic inclusion. The stated framework (SDGs 6, 7, 8, and 12) is expanded in the text to discuss, on the one hand, heat island mitigation and climate adaptation (SDGs 11 and 13), and, on the other, short supply chains and access to healthy food (SDG 2). The conceptual leap lies in introducing a tool borrowed from Service Design: 'demand maps' are used to visualise priorities, motivations and needs – including latent ones – and to promote, on a shared basis, a pact between social desirability and technical-environmental feasibility. In this way, the authors' contribution shifts the focus from the object to the process: the devices (phytoremediation and rainwater reuse, agrivoltaic roofs, biodigesters, smart grids and microgrids) become components of a system of services and governance, rather than 'technologies to be installed'. The contribution is also significant from a critical point of view because it recognises that the main barriers are predominantly organisational and cultural, and that compromises between competing land-use, energy infrastructure, and expectations require negotiation and participatory planning. The methodological approach adopted is highly transferable thanks to the verifiability of the results: the monitoring phase proposes measurable KPIs and identifies digital tools and shared databases to make effectiveness and impacts comparable over time; however, its dissemination depends on the ability of administrations to sustain the decision-making chain that the maps make visible over time.

Ahmed and Capuano (2025) shift the focus to post-extractive landscapes, showing how water can be transformed from a simple constraint or residue into a vector for territorial regeneration. The thesis, already explained in the theoretical framework, is that water can act as infrastructure capable of recomposing compromised post-extractive landscapes, transforming topographical fractures and degraded water systems into public spaces and functional habitats. The originality is twofold: on the one hand, the article works mainly at the landscape and peri-urban scale, but without losing sight of the city, considering accessibility, historical and cultural continuity, soft mobility and social impact as design criteria alongside ecological performance, pushing regeneration beyond the mere 'renaturalisation' of large sites; on the other hand, the comparison between Hamburg and Rome is used as a critical tool that employs specific indicators to evaluate the success of blue infrastructure in different contexts. The former Kaltehofe water plant, reconstructed in its infrastructural genealogy, shows how a technical work can evolve into an educational landscape and ecological device. On the contrary, the Tiburtina-Aniene area is seen as an open field of opportunity and risk, where quarries and water systems overlap with industrial pressures, urban expansion, and governance fragility: the deliberately 'unbalanced' comparison between the cases avoids the rhetoric of good practice that can be exported anywhere. It suggests that true transferability does not lie in replicating projects, but in adopting the analysis and decision-making method that has guided their outcomes. In terms of SDGs, the operational framework lends itself to an integrated reading: SDG 6 is called into play as the reorganisation of hydro-ecological cycles and water quality, SDG 11 as the construction of accessible and connected systems, SDG 15 as an increase in ecological value and SDG 8 as the reactivation of post-extractive economies and industrial heritage. The most insidious risk that the comparison implicitly points to is the conversion of regeneration into a means of generating income or spectacle: when the quarry becomes an isolated object, water remains a backdrop; when, on the other hand, it is taken on as infrastructure, regeneration can simultaneously produce resilience, memory and public space, provided that it is possible to manage long timescales, maintenance and conflicts of use.

Angelucci and Shatvoryan (2025) draw attention back to the conceptual phase, where questions are formulated, alliances are forged, and criteria are defined. The experiment at Yerevan's Circular Park goes beyond the role of water as a compositional material and transforms it into a common good and regulatory agent capable of re-establishing relationships between soil, greenery, microclimate, subsoil and buildings within a historic public space now threatened by privatisation and traffic. The originality of the experiment lies in its methodological approach: it does not propose a 'definitive' concept but defines an integrated process for producing data and knowledge that support reasoning, decision-making, and intervention, even in different times and ways. Scenario planning and vision are treated as practices for constructing shared alternatives, while conceptualisation becomes a work of informational integration and not simply an exercise in formal abstraction. The results are condensed into three reconnection models, which also act as devices for transition between scales: vertical reconnection (water / greenery / soil) focuses on depaving, permeability, accessibility and plant reintegration; oblique reconnection (buildings / fountains / users) introduces the recovery, storage and reuse of rainwater and rethinks the fountain system as a multi-seasonal attraction and a lever for mitigating the heat island effect; horizontal reconnection (city / river / park) involves the reactivation of the Getar River as a structuring blue-green meso-ecosystem, capable of restoring to the park portions currently dedicated to roadways. Transferability does not coincide with the possibility of replicating solutions, but rather with a design approach based on mediation through heterogeneous data, qualitative and performance-based logic, and a set of descriptors that produces a qualitative and quantitative pre-assessment of the improvements that can be hypothesised in relation to the SDGs. The connection with the 2030 Agenda is made explicit in supply chains: the quality of water resources (SDGs 6 and 14) is seen as a lever that strengthens urban resilience (SDGs 11 and 13) and revitalises biophysical and productive components (SDGs 12 and 15); the co-design of the common good (SDG 17) is proposed as a condition for responsible economic development (SDG 8), salutogenic outcomes (SDG 3) and inclusion / culture (SDGs 4 and 10).

In the contribution by Van der Meulen et alii (2025), water becomes an element for assessing conflicts and potential in a context in which the water cities of Northern Europe are a daily laboratory, having been accustomed to negotiating with rain, rivers, and the sea for centuries. The starting point is the observation that the number of solutions developed in recent years risks remaining episodic if there is a lack of shared literacy. Hence, the idea of constructing a veritable 'taxonomy for designing with water' in urban contexts, which organises experiences by scale, function, and management methods, moving across SDGs 6, 7, 8, 11, 13, and 15. The scope is that of urban and landscape design, extended to environmental design: the text reconstructs the steps of some key projects, reinterpreting them above all as elements of a repertoire,

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

providing diagrams, tables and maps that indicate how to combine devices and how to intertwine drainage, climate mitigation, social use, ecology and maintenance. The originality lies precisely in this work: the project is not just a 'case study' but a device that allows categories and rules of composition to be formulated. The transferability of the approach lies in the possibility of using taxonomy as a tool for comparing contexts in order to determine which combinations are realistic in dense, hot cities, which in more rarefied contexts, and which institutional and maintenance conditions are needed for the solutions to produce tangible benefits.

Campisi and Lombardo (2025) provide further progress on the subject. While the previous contribution identifies a specific taxonomy of Designing with Water devices, it questions 'how' this fits into the design and planning process, preventing the water dimension from remaining an afterthought. The contribution lies at the intersection of architectural technology, urban planning, and environmental assessment. It has the explicit objective of constructing a 'multi-phase protocol' that accompanies the project from the reading of the context to ex post verification, through analysis, scenarios, guidelines, and indicators. The text demonstrates that discussing SDG 6 (and its links with SDGs 7, 11, 12, and 13) means redefining the entire decision-making cycle: the authors identify phases and tools for structuring climate and hydrological diagnoses, setting consistent performance objectives, selecting devices, and assessing their impacts and co-benefits. The originality of the contribution lies in the desire to transform fragmented experiences into a replicable process that can be incorporated into planning documents, design competitions and coordination practices between designers and administrations. In this sense, a change of disciplinary scale is explicit: water is no longer just a matter of architectural detail or external arrangement, but a structural criterion that must inform regulatory instruments. Its transferability is measured by the ability to adapt the protocol to different geographical contexts while maintaining the underlying logic: starting from flows and uses, setting targets, choosing and combining solutions to be monitored.

While the protocol explicitly outlines the path from analysis to project, the contribution by Marin, Giannini, and Tucci (2025) shows how to translate this path into a concrete tool that can immediately influence design choices. Resilient rainwater management is addressed here from two perspectives: on the one hand, the urban and regulatory framework with the aim of combining hydraulic and hydrological invariance, flood damage prevention and improvement of microclimatic conditions; on the other hand, the development of a tool (WMs) that guides designers in the selection and sizing of sustainable urban drainage systems. The research operates at the urban and open space scales, in a disciplinary field that cuts across urban hydraulics, environmental design, and digital decision-support tools. Its originality lies in the hybridisation of parametric modelling with more accessible tools (such as Excel spreadsheets) and in the definition of a workflow that leads from the characterisation of the site and rainfall events to the selection of solution combinations, culminating in their performance verification in increasingly adverse climate scenarios. The contribution is of critical value because it also explains the method's limitations: data availability, simplifying assumptions, and the gap between what the tool can suggest and what regulations and budgets allow to be achieved. It is precisely in this gap that transferability comes into play: the model is presented as a basis for developing local regulations, specifications, and guidelines that bring current practices closer to a real capacity for adaptation.

The paper by Barosio et alii (2025) shifts the focus to the energy side of urban metabolism, questioning the form of the city in relation to Positive Energy Districts at the neighbourhood and building-aggregate levels, with an approach that intertwines urban design, technical physics, and European decarbonisation policies. The underlying question is simple and radical: what morphological configurations make possible, or at least facilitate, the positive energy balance that PEDs should achieve? To answer this question, the authors develop a set of morphological indicators for potential renewable energy production, demand, and storage capacity. The originality lies in having constructed a quantitative grammar that allows us to move from the idea of an 'energy-efficient neighbourhood' to a system of measures and thresholds, bringing out synergies and conflicts among efficiency objectives, the quality of public space, densification, and natural ventilation. In terms of the Sustainable Development Goals, the research primarily addresses SDG 7. Still, it inevitably extends to SDGs 9, 11, and 13, as it shows how the urban form itself conditions accessibility, comfort, mobility, and vulnerability to climate extremes. Transferability plays out on two levels: as a retrospective tool – to evaluate existing neighbourhoods and guide intervention priorities – and as an ex ante guide for new urbanisation and regeneration processes that seek to integrate, and not just declare, the PED objective.

The paper by Eixerés Ros (2025) shifts the focus to seemingly marginal contexts – rural villages in crisis – to show that even there, it is possible to experiment with new forms of water-energy metabolism and work. The Almenara Building Cooperative project (Spain) is presented as a socio-spatial device that attempts to combine accessibility to housing, shared energy and water services, income, and territorial roots. The disciplinary field is architectural design, but it also cuts across urban and social studies: the text works on the scale of the building and the small settlement, but reasons in terms of the local system, questioning the model of the dispersed single-family home and the equally fragile model of tourist monoculture. Its originality lies in bringing together spatial and organisational choices: cooperative models of ownership, management and maintenance that directly impact SDGs 6 and 7, as well as SDGs 8 and 11, insofar as they produce economies of scale, reduce vulnerability and generate non-precarious care and management work. However, it is precisely this hybridisation that makes it clear that transferability is not neutral: replicating the model requires regulatory conditions (land, rights of use, ethical finance instruments, etc.), the ability of communities to self-organise and public leadership to accompany slow and conflictual processes. The contribution is interesting because it makes these constraints explicit rather than concealing them: it shows the potential of 'small settlements' as laboratories of transition, but at the same time reminds us that without adequate social and institutional infrastructure, there is a risk of turning them into enclaves for the few, rather than devices for territorial rebalancing.

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

The paper by Dessì et alii (2025) addresses the challenge of developing new habitats through agriculture and the water cycle within existing, often dense and stratified, architectures and fabrics, evaluating roofs, loggias, façades and interstitial voids as places where water, energy and soil can be recombined to produce food, cooling, shade and biodiversity. Typological mapping – which analyses building forms, exposures, accessibility, and the potential for rainwater accumulation and reuse – is not a simple inventory but rather structures a compatibility matrix that links each solution to technical, managerial, and social conditions. The range of SDGs involved is broad (no. 2, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 15, and 16): local food production and the reduction of organic waste determine water and energy efficiency, the reduction of heat islands, the increase in habitats and the construction of micro-communities of practice. The strongest proposal – and the most exposed to criticism – is the idea that these areas could become widespread productive infrastructures: this implies that architecture is no longer thought of solely as a shell, but as a component of agro-energy supply chains that redistribute responsibility and work. Here, transferability depends mainly on the ability to build credible management models: who cultivates, who maintains, who benefits, and how risks and burdens are distributed. The merit of the contribution lies in not stopping at the image of the 'productive green roof', but in highlighting the organisational dimension as a condition for preventing innovation from remaining episodic or, worse, producing new inequalities in access to food and space.

In this variation in scale – from rural landscapes to cultivated roofs – the paper by Tucci, Mitrik, and Montagner (2025) further narrows the focus of investigation on the technical and performance aspects of the building, without, however, neglecting comparisons with the spatial and usage implications. The combination of Trombe walls and thermal labyrinths is investigated as an integrated bioclimatic device capable of modulating solar gains, thermal inertia and natural ventilation in different climatic contexts. The disciplinary fields are architectural technology and technical physics, which guide the research through alternating modelling, dynamic simulations, and multi-criteria evaluation. The originality lies not only in the combination of two well-known passive systems, but also in the way in which their configurations, performance and limitations are analysed: the different variants are evaluated not only for energy savings (SDGs 7 and 13), but also for their effects on comfort, hygrothermal conditions and possibilities for integration into architectural language (SDG 11). The result is a picture in which efficiency does not come for free. Some solutions take up space, require maintenance and affect openings and relationships with the outside world, while others rely heavily on user behaviour. It is here that the contribution takes on critical significance with regard to the 2030 Agenda, showing how the adoption of passive technologies is a process of negotiation between forms, functions, costs, expectations and local technical capabilities. Transferability is high at the methodological level because the analytical sequence can be replicated for other hybrid systems. Still, it is conditioned by climatic contexts, regulations and building cultures, bearing in mind that low-impact comfort requires time, skills and design care that standardised protocols tend to compress.

Mangiatordi's paper (2025) focuses on architecture and its more social dimension, namely socio-economic infrastructure that organises work, income, care, and rights. Starting from a state-of-the-art analysis of the demographic and health situation – the ageing population, the growing demand for care – the contribution questions what it means to talk about SDGs 6, 7, and 8 within the universe of Residential Care Homes (RSA). The disciplinary field is hybrid: urban planning, architectural design, project economics and social policies are intertwined in an analysis that works from the scale of the individual building to that of the service network. Its originality lies in its rejection of the 'cost / welfare' dichotomy and in its interpretation of residential care homes for older people in terms of assets that simultaneously affect health (SDG 3), energy efficiency and environmental quality (SDG 7, 11, and 13), working conditions and quality of employment in the social and health sector (SDG 8), and the ability of territories to ensure equality and cohesion (SDG 1, 10). Through a taxonomy of existing heritage, redevelopment scenarios and economic evaluation criteria, the contribution shows that different design and management choices can produce divergent effects in the long term: buildings designed solely to minimise initial costs generate increasing energy and social costs, while interventions that combine efficiency, spatial quality and openness to the neighbourhood can instead activate local economies, new skilled employment and proximity networks. The transferability is high because the method – which jointly examines layout, energy performance, management models and economic and social impacts – applies to a wide range of care infrastructures. However, the contribution does not hide potential critical issues: as long as the investment logic remains focused on short-term returns, the promise of SDGs in nursing homes risks remaining a declaration of principle.

In the paper of Capasso et alii (2025), a further leap in scale is made, and materials are examined without losing sight of issues of territorial metabolism and care infrastructure. The LCA analysis of hemp building products focuses on the materials that make up 'sustainable architecture' and the energy cycles they incorporate. The originality lies in comparing different configurations, highlighting that the material itself does not guarantee energy and emission reductions: these depend on specific design and production choices. In this sense, the contribution has a high critical value in pointing out that the rush to biomaterials risks being a simple marketing strategy if not accompanied by a careful reading of supply systems, transformation processes, transport and end-of-life. The study is transferable in two ways: on the one hand, LCA is a replicable model for other products and systems, offering designers and policy makers a common language for discussing performance and specification choices in the context of 2030 Agenda; on the other hand, the focus on hemp opens up the issue of agro-construction supply chains as a potential area for decent work and rural regeneration, but also highlights the need to avoid new improvised extractive monocultures, since 'low embodied energy' is the result of a 'balance' between production, processing, and local uses.

The review article by Thiébat et alii (2025) follows the same reasoning, extending the observation to natural fibres in architecture and their potential circularity. The disciplinary scope is avowedly transdisciplinary: architectural technology, materials engineering, socio-economic studies, and environmental assessment converge in an interpretation that brings together technical performance, environmental impact,

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

and the social conditions of production. In this scenario, the 2030 Agenda serves as a framework for interpreting, across the various studies analysed, which objectives are actually taken on board and which remain on the margins. The originality of the contribution lies not so much in proposing yet another type of 'virtuous' natural fibre, but in highlighting the critical issues: the fact that a material derives from a renewable resource does not automatically guarantee fair working conditions, a balanced distribution of benefits along the supply chain and compatibility with local contexts. The review shows that a significant part of the literature focuses on established environmental indicators; at the same time, the long-term social and economic dimensions remain poorly investigated or addressed in a fragmented manner. This asymmetry suggests areas of research to focus on to avoid circularity, which becomes an incomplete narrative.

The paper by Badalucco et alii (2025) focuses on a particular technical object – the Discoil system – to show how circularity and sustainability principles can be translated into the design of industrial components. The change in scale is evident, as we are at the heart of the mechanics of a technical product with a less visible impact on energy consumption, maintenance, plant downtime, costs, and occupational safety. The disciplinary field is that of sustainability-oriented product design, straddling engineering and project management. The analysis highlights the product's strengths and weaknesses, focusing on geometric configurations, material choices, assembly methods, and use and reuse scenarios. The originality lies above all in the long-term perspective: durability is not treated as a simple increase in useful life, but as a factor that redesigns entire chains of activities and thereby directly affects work and skills. Designing for durability, the article suggests, does not just mean 'making things that don't break', but rethinking modularity, accessibility, repairability, documentation and traceability, i.e., a set of aspects that, on the one hand, can reduce waste and energy consumption associated with replacements and, on the other, can improve operating conditions and worker safety. The transferability of the Discoil case study is relevant precisely because it does not propose an exemplary object to imitate but a method: identifying the critical points of an existing production system, imagining longer and more flexible scenarios of use and maintenance, and verifying the environmental and economic consequences of these transformations allows for the creation of a different relationship between time, design and work, in which technical devices are designed to accompany the transition rather than consume it quickly.

The paper by Süyük and Yücesan (2025) introduces a further leap, not in scale but in interpretation: water and organic matter become tools for making otherwise invisible ecological processes visible. The contribution works on a hybrid scale between installation and micro-architecture to experiment with the aesthetic, sensory and educational potential of water and biological cycles. The disciplinary field is research through design, across architectural technology, interaction design, and outdoor art installations: the prototype uses water, substrates, mycelium, and light to reveal the dynamics of absorption, growth, and decomposition of microorganisms, in a continuous dialogue with environmental conditions and human intervention. The reference to SDGs 3, 6, 9, 11, 12, 13, 15, and 16 is not an appendix to the text: health and well-being, water quality, innovation and infrastructure, sustainable cities and communities, responsible consumption patterns, climate action, protection of terrestrial ecosystems and the building of inclusive institutions are intertwined in the effort to construct 'learning environments' in which the public is exposed to processes, not just outcomes. The originality lies in the fact that the experiment does not seek a standardisable output, but rather a set of principles that could be transferred to a wide range of micro-installations in schools, museums, and public spaces. It is precisely this 'general' dimension that makes the work valuable: it shows concrete limitations and takes them on as part of the research, reminding us that the use of water and living organisms in the project implies ethical, technical and organisational responsibilities.

The paper by Bianconi et alii (2025) shifts the research from the physical laboratory to the cognitive and communicative one, questioning another often overlooked aspect of the transition: the comprehensibility of emerging energy systems. The contribution on HEHS addresses a highly technical system – hydrogen storage – and investigates its translation into visual languages and interfaces that make processes, risks, and potential transparent. The disciplinary field is that of visual communication design grafted onto energy engineering and human-machine interaction: the work analyses existing visual identities related to hydrogen, extracts chromatic and iconographic patterns, measures them against criteria of legibility and accessibility, and finally reorganises them into a grammar of signs, gradients and patterns. The use of artificial intelligence tools, in particular linguistic models to simulate different user profiles, introduces a meta-reflective dimension: validation is not entrusted solely to experts but to a plurality of 'modelled' perspectives that question comprehensibility, ambiguity and potential misunderstandings. In terms of Sustainable Development Goals, the research addresses SDGs 7, 9, 12, and 13: affordable and clean energy, industry, innovation and infrastructure, responsible consumption and production, and climate action. The originality lies in recognising that these goals can be hindered not only by technical limitations but also by deficits in communication and trust: if hydrogen continues to be perceived as a dangerous technology, the infrastructure risks encountering social opposition and failing to trigger the skilled labour chains that the transition hopes to create. The transferability of the study is evident: the method for deriving and testing visual systems, coding methods, palettes and icons can be adapted to many other complex devices, provided that a critical balance is maintained between the synthetic power of graphic codes and their ability not to obscure complexity.

While HEHS shows how the energy transition needs new 'visual abacuses' to be understood and accepted, the paper by Franzo, Quartu, and Tufarelli (2025) addresses an entire productive sector – fashion – to show how necessary, and difficult, it is to reshape both material and symbolic infrastructures simultaneously. The disciplinary field is that of systems and policy design, with a strong influence from organisational and socio-economic studies: national mapping, case studies, interviews and data visualisation tools are used to trace three lines of transformation – circular systems, phygital scenarios and forms of informal training – which intertwine SDGs 4, 8, 9, and 12. The originality of the contribution lies in its rejection of the

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

rhetoric of 'green fashion' and 'pure digitalisation as a saviour', showing how circular fashion and phygital can open up new opportunities, but also generate new forms of precariousness, concentration of information power and dependence on energy and digital infrastructures, which, if not decarbonised, shift the environmental burden elsewhere. Transferability lies in the method rather than the solutions: the work suggests how design can help build maps of actors, processes, and impacts that are useful for identifying where to intervene, what skills to train, and which coalitions to foster to prevent the transition from translating into new inequalities.

In the transition from product systems and supply chains to measurement and governance tools, D'Amore's (2025) contribution on digital twins marks a significant shift: the transition is no longer just a question of what we design, but of how we continue to learn about and re-recognise buildings throughout their entire life cycle. The Digital Twin is understood here as a dynamic device that connects design data, operational monitoring, forecast scenarios and maintenance decisions: data collection and cleaning, modelling, integration with technical management systems and feedback in digital dashboards designed for different user profiles determine a necessary, if not indispensable, operational sequence. In this perspective, SDGs 3, 7, and 8 come into play jointly: the health and comfort of occupants, energy efficiency and emission reduction, and the quality and professional content of management and maintenance work. The most interesting critical aspect concerns the conditions of possibility: without shared standards, adequate digital infrastructure, and new hybrid skills, the Digital Twin risks becoming a technological simulacrum. The contribution makes it clear that its transferability depends on specific training programmes, role restructuring within organisations, and investment in long-term processes, rather than on individual platforms.

Against this backdrop, the paper by Lauria et alii (2025) on energy efficiency and smartness can be read as a 'frontier' between European tools and local design and management practices. While D'Amore's digital twin offers an infrastructural view of knowledge about the building, the contribution on SRI and smartness indices is at the point of contact between standards, metrics and decisions on a specific asset, in this case the school park, which is particularly sensitive due to its intertwining with SDGs 4, 7, 9, 1, and 13. The disciplinary field is architectural technology, but the goal is clearly political: testing and critiquing European tools such as the Smart Readiness Indicator in real-world cases allows us to understand whether and how they can truly guide design choices, investment priorities, and day-to-day management. The originality of the contribution lies in combining established energy assessments with smartness indicators that consider the building's ability to adapt, interact with users and communicate with the network: the result is a picture in which intelligence is not reduced to the provision of sensors, but requires compatibility with usage routines, the skills of teachers and technicians, and the economic constraints of public administrations. Transferability is provided by the proposed comparative method, which can be applied to other segments of public assets. However, the paper clearly points out the risk that complex and poorly contextualised indices may become formal requirements rather than tools to guide action. In this sense, the link with the Digital Twin is clear: both contributions question the still wide gap between data availability and institutional capacity to use it to reduce consumption, emissions, and vulnerability.

The paper by Palumbo et alii (2025) further shifts the focus from individual buildings and their ratings to what happens along the supply chains that enable their construction, placing the integration of environmental LCA and social LCA at the centre and recognising that discussing SDGs 6, 7, and 8 – and many others related to them, from 1 to 13 – means assuming that performance is not limited to energy and water balances, but also includes safety, health, rights and risk distribution along global supply chains. The originality of the contribution is not limited to calling for the inclusion of the social dimension, but also proposes structures of indicators, matrices and application cases that show how emissions, water consumption, exposure to hazardous substances and working conditions can and should be assessed together, preventing good practice from concealing extractive or production practices that are incompatible with the 2030 Agenda. Transferability is high, albeit hampered by specific barriers: integrating LCA and S-LCA requires access to sensitive data, the definition of shared criteria for assessing social risk, and the assumption of responsibility by clients and designers regarding choices of materials, suppliers, and business models. In dialogue with contributions on Digital Twin and smartness, the paper suggests a change of perspective: it is not enough to make buildings smart and monitorable if the effects of their production and maintenance on workers, communities and distant territories are not controlled. This tension between the building scale and the supply chain scale plays a decisive role in the credibility of the SDGs in the built environment sector.

Fabbri's (2025) paper on PUNTOnet H_2O aims to redefine the relationship between design, management, and supply chain through local water points at the most everyday scale of the city. The device is not presented as a simple evolution of the urban drinking fountain, but as a multifunctional hub where water accessibility, consumption monitoring, information and additional services are intertwined. The disciplinary field is explicitly that of service and product design: the project stems from a phase of listening and observation in the field, continues with mapping of habits, interviews and scenario analysis, and culminates in the definition of a prototype that combines physical components, digital infrastructure and interfaces for data collection and feedback to users. The scale is both that of the object and that of the network: the single node operates in the micro-public space but only makes sense as part of a distributed system that can affect urban water metabolism. The originality lies precisely in this attempt to translate the lexicon of indicators into interactions and choices of use: PUNTOnet H_2O does not just 'measure', but seeks to modify behaviour, making visible the quality of the water, the volumes supplied, the reduction in single-use bottles and the opportunities for refilling and stopping. The model is a highly transferable method, but it clearly exposes the decisive constraint: without public management that embraces the logic of the service and supports its costs, maintenance, and ongoing updates, even the most intelligent of devices risks remaining an island or a sophisticated but marginal piece of street furniture.

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

While PUNTOnet H_2O condenses the theme of water into a specific device, the paper by Sposito and Mittersteiner (2025) reconstructs the overall theoretical-operational framework in which nodes such as the one proposed by Fabbri should be included. The paper proposes a fundamental paradigm shift, viewing urban cooling not as an 'effect' of individual solutions but as a metabolic function intentionally designed through water recycling and reuse. The disciplinary field is avowedly hybrid: environmental design, urban planning, urban hydraulics and policy studies intertwine to define a water metabolism based on four actions – Reduce, Reuse, Recover, Regenerate – which are then articulated in a multi-level matrix. The originality lies in superimposing three levels of investigation that often remain separate: biophysical flows (how much water circulates, with what qualities and in what ways), socio-economic impacts (who pays, who benefits, what forms of work and governance are produced), and governance mechanisms (regulations, planning tools, financial models). The proposed 4R matrix relates to the 17 SDGs of the 2030 Agenda and is translated into a set of indices and graphical representations that make synergies and compromises visible before solutions become irreversible. The transferability of the new paradigm is not as immediate as that of an operational tool or an urban object. Still, it is perhaps more profound: the 4R-SDG matrix suggests a different way of organising knowledge, decisions and responsibilities, explicitly asking administrations, designers, managers and citizens to recognise themselves in a system in which cooling is the combined result of water, energy, vegetation, spatial, work and other choices. In dialogue with previous research, the paper shows that the leap in scale – from the neighbourhood node to the city, from the device to the metabolism – requires not only more data, but also tools that make complexity intelligible without reducing it to opaque scores. This paper is perhaps the 'most political' contribution of the volume: to remind us that the acceleration towards SDGs related to water, energy and work does not depend solely on the sum of good practices, but on the ability to equip ourselves with shared evaluation frameworks that make it possible to choose between alternatives in a transparent manner, fully accepting the compromises that each option entails.

Taken together, the contributions collected in this issue paint a picture in which water, energy and labour are no longer simply three objectives of the 2030 Agenda, but the vertices of a single field of forces that spans productive landscapes, cities, architecture, material supply chains and digital infrastructures. Taken together, the contributions show that the water-energy issue cannot be confined either to the technical scale of detail or to the abstract scale of grand strategies, but requires continuous interaction between vision and device, between concept and field testing.

A first piece of evidence concerns how the contributions redraw the relationship between scales and disciplines. Water appears as a design matrix in the landscape, in the city, in buildings and even in micro-urban devices; energy as a constraint and resource in the form of settlements, bioclimatic systems, storage technologies and typological choices; work as an often implicit but decisive dimension in rural cooperatives, bio-based material supply chains, care services, maintenance trades and new digital professions. Architecture, urban planning, technology, product, service and communication design, socio-economic studies, and public policy are intertwined: the most convincing and impactful studies are those that accept to work on several fronts simultaneously – design, evaluation, organisation – testing theoretical hypotheses on concrete cases and vice versa.

A second common feature is the centrality of methodologies. Compared to still widespread narratives that entrust the transition to a list of 'good practices', the contributions in this volume insist on the construction of tools: taxonomies and tables for designing with water, operational protocols for integrating SDGs into the design phases, tools for rainwater management, sets of parameters for PEDs, LCA and S-LCA procedures, 4R-SDGs matrices, indicator systems for smartness and digital twins, and frameworks for interpreting circularity in natural fibres and production sectors. The research does not stop at stating principles, but undertakes to translate them into operational sequences and measurement systems which, despite their limitations, represent the prerequisite for any scalability. The originality of many contributions lies precisely in bringing together tools from different domains – from service design to bibliometrics, from thermo-energy simulation to data science – to construct more robust readings of synergies and trade-offs.

Thirdly, the contributions invite us to more carefully evaluate the dimension of compromise. Far from proposing a harmonious vision of the SDGs, much research shows tensions that are difficult to resolve: between energy production and agricultural land use, between ecological regeneration and rent dynamics, between building comfort and morphological constraints, between the promises of biomaterials and real working conditions in supply chains, between the sophistication of indicators and the institutional capacity to use them, between circularity and precariousness in sectors such as fashion. This should be seen not as a sign of weakness, but of maturity: the transition that emerges from these contributions is less reassuring but more credible, because it recognises that every choice involves differential losses and gains and that the task of the project – and the accompanying assessment tools – is to make these compromises explicit without concealing them under generic labels of sustainability. Perhaps the most important contribution of the volume concerns transferability.

Almost all research, although rooted in specific contexts, works to identify elements that can be 'transferred': compatibility matrices, reconnectivity descriptors, sustainability checklists, prototyping and testing sequences, governance models, visual communication devices, co-design processes and criteria for integrating environmental and social dimensions into assessment constitute new infrastructures of thought and action that can be critically adapted to other territories and sectors. In this sense, the volume shows a constant tension to go beyond the scope of the cases to build a 'conceptual toolbox' that remains useful even when the scenario changes. Alongside these strengths, the limitations of some studies also emerge. The focus remains primarily within the Euro-Mediterranean area, with few forays into non-European contexts; many experiments take place in relatively protected conditions and offer a glimpse of, but do not always address, the difficulties of implementation in fragmented administrative systems or weak territories;

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

the issue of inequality – although present – could be explored in greater depth, especially concerning the most vulnerable workers in global supply chains and the least represented urban and rural populations. The time dimension also remains compressed in some cases: short monitoring cycles, ex ante assessments awaiting long-term confirmation, business and governance models yet to be tested over decades.

Overall, however, the published contributions convey well the idea that the disciplines of architecture can play a strategic role in the 2030 Agenda, influencing technological choices, spatial forms, economic models and collective imaginaries. Water, energy and decent work are not simply 'topics' to be represented here, but design and research materials that redraw the priorities of the discipline. Therefore, in continuity with the previous volume, the editorial invites us to ask ourselves where we need to go deeper, on what scales to concentrate our efforts, and which disciplinary and institutional alliances we need to activate to transform the SDGs from programmatic statements into operational practices.

References

Ahmed, S. R. and Capuano, A. (2025), "Infrastrutture blu per la rigenerazione ecologica – Il recupero di siti estrattivi ad Amburgo e Roma | Blue infrastructures for ecological regeneration – The recovery of mining sites in Hamburg and Rome", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 84-97. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1832025 [Accessed 30 December 2025].

Angelucci, F. and Shatvoryan, A. (2025), "Riconnettere le dimensioni di acqua, città e comunità – Una sperimentazione a Yerevan (Armenia) | Reconnecting the dimensions of water, city, and community – An experiment in Yerevan (Armenia)", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 162-177. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1882025 [Accessed 30 December 2025].

Badalucco, L., Chiesa, R., Gaino, G., Marchetto, E. and Silvestri, C. (2025), "Discoil e durabilità – Redesign di un sistema per ridurre l'inquinamento idrico da idrocarburi | Discoil and durability – Redesign of a system to reduce water pollution by hydrocarbons", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 384-397. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18242025 [Accessed 30 December 2025].

Barbier, E. B. and Burgess, J. C. (2019), "Sustainable development goal indicators – Analyzing trade-offs and complementarities", in *World Development*, vol. 122, pp. 295-305. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.05.026 [Accessed 30 June 2025].

Barosio, M., Crapolicchio, M., Gugliotta, R. and Trisciuoglio, M. (2025), "Parametri di morfologia urbana e distretti a energia positiva – I Campus universitari motori delle transizioni urbane | Urban morphology parameters and positive energy districts – University Campuses as drivers of urban transitions", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 212-223. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18112025 [Accessed 30 December 2025].

Barquet, K., Järnberg, L., Alva, I. L. and Weitz, N. (2022), "Exploring mechanisms for systemic thinking in decision-making through three country applications of SDG Synergies", in *Sustainability Science*, vol. 17, issue 4, pp. 1557-1572. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11625-021-01045-3 [Accessed 30 December 2025].

Bianconi, F., Filippucci, M., Rossi, F. and Meschini, M. (2025), "Sistemi innovativi per lo stoccaggio dell'idrogeno (HEHS) – Visual design e AI per la comunità | Innovative systems for hydrogen storage (HEHS) – Visual design and AI for community engagement", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 398-407. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18252025 [Accessed 30 December 2025].

Campisi, T. and Lombardo, L. (2025), "Progettare con l'acqua – Strategie, protocolli e progetti nell'architettura e per le città | Designing with water – Strategies, protocols, and projects in architecture and for cities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 178-195. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1892025 [Accessed 30 December 2025].

Capasso, M. C. (2025), "LCA e domanda energetica complessiva dei prodotti edili in canapa | LCA and cumulative energy demand of hemp buildings products", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 276-293. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18162025 [Accessed 30 December 2025].

D'Ambros, M. and Tornieri, S. (2025), "Futuri galleggianti – Ripensare le relazioni tra acqua, energia e lavoro attraverso l'idrologia culturale | Floating features – Rethinking the relationships between water, energy, and labour through cultural hydrology", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 98-113. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1842025 [Accessed 30 December 2025].

D'Amore, A. E. (2025), "Gemello digitale e processo edilizio – Riflessioni su produttività, energia e salute | The digital twin and the building process – Reflections on productivity, energy, and health", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 144-161. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1872025 [Accessed 30 December 2025].

Dessì, V., Clementi, M., Labrozzi, E., Oppimitti, F., D'Ostuni, M., Soh, C. B., Chien, S. C. and Ang, B. T. W. (2025), "Agricoltura urbana e architettura – L'acqua per ottimizzare la sinergia edificio-vegetazione | Urban agriculture and architecture – Water for optimising the building-vegetation synergies", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 224-237. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18122025 [Accessed 30 December 2025].

Eixerés Ros, J. (2025), "Habitat collettivi per la rigenerazione rurale – Una cooperativa edilizia ad Almenara (Spagna) | Collective habitats for rural regeneration – A housing cooperative in Almenara (Spain)", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 238-249. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18132025 [Accessed 30 December 2025].

European Commission (2023), *Better Regulation – Toolbox 2023.* [Online] Available at: commission.europa.eu/document/download/9c8d2189-8abd-4f29-84e9-abc843cc68e0_en?filename=BR%20toolbox%20-%20Jul%202023%20-%20FINAL.pdf [Accessed 30 December 2025].

Fabbri, I. (2025), "PUNTOnet H_2O – Dall'indagine sul campo al prototipo di una stazione multifunzionale per l'acqua | PUNTOnet H_2O – From field investigation to the prototype of a multifunctional water station", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 370-383. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18232025 [Accessed 30 December 2025].

Falzetti, A. (2025), "Oltre la funzione – L'acqua come principio di equità, cura e identità urbana e paesaggistica | Beyond function – Water as a principle of equity, care, and urban and landscape identity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 72-83. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1822025 [Accessed 30 December 2025].

18
2025
AGATHÓN
International Journal
of Architecture, Art and Design

ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X

Follesa, S., Farahbakhsh, L. and Song, X. (2025), "Energie rinnovabili e agricoltura urbana – Strategie multidisciplinari per città resilienti | Renewable energy and urban agriculture – Multidisciplinary strategies for resilient cities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 332-343. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18202025 [Accessed 30 December 2025].

Franzo, P., Quartu, A. and Tufarelli, M. (2025), "Re-shaping fashion in Italy – Sistemi circolari, scenari phygital e formazione informale | Re-shaping fashion in Italy – Circular systems, phygital scenarios, and informal education", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 344-357. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18212025 [Accessed 30 December 2025].

IGS – Independent Group of Scientists appointed by the Secretary-General (2023), *Times of crisis, times of change – Science for accelerating transformations to sustainable development – Global Sustainable Development Report 2023*, United Nations, New York. [Online] Available at: sdgs.un.org/sites/default/files/2023-09/FINAL%20GSDR%202023-Digital%20-110923_1.pdf [Accessed 30 December 2025].

IGS – Independent Group of Scientists appointed by the Secretary-General (2019), *The Future is Now – Science for Achieving Sustainable Development – Global Sustainable Development Report 2019*, United Nations, New York. [Online] Available at: sdgs.un.org/publications/future-now-science-achieving-sustainable-development-gsdr-2019-24576 [Accessed 30 December 2025].

Kostetckaia, M. and Hametner, M. (2022), "How Sustainable Development Goals interlinkages influence European Union countries' progress towards the 2030 Agenda", in *Sustainable Development*, vol. 30, issue 5, pp. 916-926. [Online] Available at: doi.org/10.1002/sd.2290 [Accessed 30 December 2025].

Lauria, M., Azzalin, M., Giglio, F. and La Face, G. M. (2025), "Efficienza energetica e smartness degli edifici nelle politiche ambientali pubbliche | Energy efficiency and smart buildings in public environmental policies", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 264-275. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18152025 [Accessed 30 December 2025].

Lusseau, D. and Mancini, F. (2019), "Income-based variation in Sustainable Development Goal interaction networks", in *Nature Sustainability*, vol. 2, issue 3, pp. 242-247. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41893-019-0231-4 [Accessed 30 December 2025].

Mangiatordi, A. (2025), "Investire nelle residenze per anziani – Verso una tassonomia ESG per la rigenerazione immobiliare | Investing in housing for the elderly – Towards an ESG taxonomy for building regeneration", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 130-143. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1862025 [Accessed 30 December 2025].

Marandino, F. (2025), "Paesaggi produttivi in trasformazione – Sistemi agro-energetici e benefici ambientali | Productive landscapes in transformation – Agro-energy systems and environmental benefits", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 304-315. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18182025 [Accessed 30 December 2025].

Marin, P., Giannini, L. M. and Tucci, F. (2025), "Gestione resiliente delle acque meteoriche – Uno strumento a supporto della progettazione | Resilient management of stormwater – A tool to support design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 196-211. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18102025 [Accessed 30 December 2025].

Nilsson, M., Vijge, M. J., Alva, I. L., Bornemann, B., Fernando, K., Hickmann, T., Scobie, M. and Weiland, S. (2022), "Interlinkages, integration and coherence", in Biermann, F., Hickmann, T. and Sénit, C.-A. (eds), *The Political Impact of the Sustainable Development Goals – Transforming Governance Through Global Goals?*, University Press, Cambridge, pp. 92-115. [Online] Available at: doi.org/10.1017/9781009082945.005 [Accessed 30 December 2025].

Palumbo, E., Mazzei, I., Perpetua, M. and Pomponi, F. (2025), "Impatti ambientali e sociali nel ciclo vita per una progettazione a basso carbonio | Environmental and social life cycle for low-carbon design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 294-303. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18172025 [Accessed 30 December 2025].

Pham-Truffert, M., Metz, F., Fischer, M., Rueff, H. and Messerli, P. (2020), "Interactions among Sustainable Development Goals – Knowledge for identifying multipliers and virtuous cycles", in *Sustainable Development*, vol. 28, issue 5, pp. 1236-1250. [Online] Available at: doi.org/10.1002/sd.2073 [Accessed 30 December 2025].

Randers, J., Rockström, J., Stoknes, P. E., Goluke, U., Collste, D., Cornell, S. E. and Donges, J. F. (2019), "Achieving the 17 Sustainable Development Goals within 9 planetary boundaries", in *Global Sustainability*, vol. 2, e24, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1017/sus.2019.22 [Accessed 30 December 2025].

Sposito, C. and Mittersteiner, G. (2025), "Riciclo idrico e raffrescamento urbano – Un nuovo paradigma metabolico Acqua / Energia / Cibo per le città temperate | Water recycling and urban cooling – A new Water / Energy / Food metabolic paradigm for temperate cities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 22-71. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1812025 [Accessed 30 December 2025].

Süyük Makaklı, E. and Yücesan Altay, E. (2025), "Reinterpretare il ruolo ecologico dell'acqua – Materiali viventi e design inclusivo | Reinterpreting water's ecological role – Integrating living materials for inclusive design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 358-369. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18222025 [Accessed 30 December 2025].

Thiébat, F., Masoero, A., Morselli, F., Fregonara, E., Senatore, C., Muñoz Veloza, M. A. and Giordano, R. (2025), "Fibre naturali e circolarità in architettura – Sostenibilità ambientale, economica e sociale | Natural fibres and circularity in architecture – Environmental, economic, and social sustainability", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 316-331. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18192025 [Accessed 30 December 2025].

Thorne, M. and Duran, P. (2016), "The role that architecture can play in the development agenda", in *devex.com*, 05/05/2016. [Online] Available at: devex.com/news/the-role-that-architecture-can-play-in-the-development-agenda-88124 [Accessed 30 December 2025].

Tucci, F., Mitrik, K. and Montagner, L. (2025), "Muro di Trombe e labirinto termico – Strategie bioclimatiche per il clima mediterraneo | Trombe wall and thermal labyrinth – Bioclimatic strategies for the Mediterranean climate", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 250-263. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/18142025 [Accessed 30 December 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication [Accessed 30 December 2025].

UN-Habitat – United Nations Human Settlements Programme (2022), *Envisaging the Future of Cities – World Cities Report 2022*. [Online] Available at: unhabitat.org/sites/default/files/2022/06/wcr_2022.pdf [Accessed 30 December 2025].

van der Meulen, E. R., Cammarata, E., Macaione, I., Andaloro, B. and Raffa, A. (2025), "Progettare con l'acqua in ambito urbano – L'esperienza dello studio Felixx | Designing with water in urban contexts – The experience of Felixx", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 18, pp. 114-129. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1852025 [Accessed 30 December 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 22-71
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1812025

ARTICLE INFO

Received 11 September 2025
Revised 06 November 2025
Accepted 12 November 2025
Published 30 December 2025

RICICLO IDRICO E RAFFRESCAMENTO URBANO
Un nuovo paradigma metabolico Acqua / Energia / Cibo per le città temperate

WATER RECYCLING AND URBAN COOLING
A new Water / Energy / Food metabolic paradigm for temperate cities

Cesare Sposito, Gernot Mittersteiner

ABSTRACT

Le città producono flussi termici e idrici di entità tale che, se opportunamente direzionati, possono diventare strumento di resilienza climatica e giustizia ambientale. Da qui la tesi che gli insediamenti urbani possano trasformarsi in 'nodi di raffreddamento' di una rete planetaria, mitigando le isole di calore e attenuandone, per somma, gli effetti su scala regionale. In tale ottica il contributo esplora le sinergie fra i cicli di acqua, energia e cibo attraverso il dispositivo concettuale delle 4R – Ridurre, Riutilizzare, Recuperare, Rigenerare – e mostra come corridoi verdi, corpi idrici diffusi, tetti con micro-fitodepurazione e coltivazioni aeroponiche agiscano da organi traspiranti di raffrescamento che assorbono calore latente, offrono ombra, producono cibo e alimentano senso di comunità. Tra le diverse scale si individua come strategica quella del quartiere, che assume la configurazione di organismo omeotermico e Living Lab: reti di sensori, gemelli digitali e incentivi trasformano metriche ambientali in relazioni sociali, spostando l'attenzione dal costo della risorsa al valore degli scambi ecologici. A supporto viene presentata una matrice 4R-SDG concepita come strumento evolutivo per valutare i compromessi fra decarbonizzazione, biodiversità, equità e coinvolgimento degli utenti, orientando politiche adattive capaci di convertire rischio e scarto in capitale rigenerativo. Ne emerge l'immagine di una città temperata che produce nuovi scenari di convivenza in un orizzonte a neutralità carbonica.

Cities generate thermal and water flows of such magnitude that can become tools for climate resilience and environmental justice if properly directed. Hence, the thesis that urban settlements can transform into 'cooling nodes' within a planetary network, mitigating heat islands and, by aggregation, attenuating their effects on a regional scale. From this perspective, the paper explores the synergies between the water, energy, and food cycles through the conceptual framework of the 4Rs – Reduce, Reuse, Recover, Regenerate – and examines how green corridors, distributed water bodies, roofs with micro-phytoremediation, and aeroponic cultivation act as cooling transpiring organs that absorb latent heat, provide shade, produce food, and foster a sense of community. Among the different scales, the neighbourhood is identified as strategic, assuming the configuration of a homeothermic organism and a Living Lab: sensor networks, digital twins, and incentives transform environmental metrics into social relationships, shifting the focus from the resource cost to the value of ecological exchanges. In support of this, a 4R-SDGs matrix is presented as an evolutionary tool to assess the trade-offs among decarbonization, biodiversity, equity, and user engagement, guiding adaptive policies that can convert risk and waste into regenerative capital. The resulting vision is that of a temperate city that produces new scenarios of coexistence within a carbon-neutral horizon.

KEYWORDS

raffrescamento urbano, isole di calore urbane, metabolismo urbano, economia circolare, riciclo idrico

urban cooling, urban heat islands, urban metabolism, circular economy, water recycling

Cesare Sposito, Architect and PhD, is an Associate Professor of Technological and Environmental Design in Architecture at the University of Palermo (Italy). Co-Director of Agathón, his main areas of research include strategies for mitigating climate change in urban areas, the environmental, social, and economic sustainability of projects. E-mail: cesare.sposito@unipa.it

Gernot Mittersteiner, Civil Engineer and Architect, is the Head of the Architekturwerk studio in Vienna (Austria). A former Visiting Professor at the Vienna University of Technology, his main interest is integrating a wide range of complex findings into models understandable to everyone, to create interconnected criteria as a basis for planning and to enable the transformation of science into the built environment. Email: gernot.mittersteiner@tu.ac.at

La biosfera è un complesso sistema reticolare in cui ogni processo biologico è collegato a flussi di energia e materia e il punto d'ingresso di quasi tutta l'energia è la fotosintesi: in oltre tre miliardi di anni cianobatteri, alghe e piante hanno affinato la capacità di convertire la radiazione solare in biomassa, ponendo le basi per le catene trofiche terrestri (Falkowski, 2012). La frazione organica prodotta viene continuamente decomposta da un innumerevole quantità di creature viventi: in un centimetro cubo di suolo possono convivere fino a 100 miliardi di cellule batteriche che mineralizzano la sostanza organica e restituiscono nutrienti per alimentare nuovamente la crescita vegetale chiudendo cicli biogeo-chimici come quelli di azoto, fosforo e carbonio (Chapin, Matson and Vitousek, 2011). Il ritmo relativamente lento di tali cicli ha garantito per milioni di anni la stabilità degli ecosistemi e una costante riserva di risorse 'bio-disponibili' per gli esseri viventi (Steffen et alii, 2015).

Quando però l'uomo ha cominciato a dissociare il proprio benessere da quei cicli lenti, sostituendo la logica della trasformazione con quella dell'estrazione e dell'uso indiscriminato delle risorse, l'equilibrio si è spezzato. Con l'avanzare delle conoscenze tecniche l'uomo ha smesso gradualmente di percepirsi come parte di un ecosistema finito e ha cominciato a sfruttare le risorse naturali utilizzabili a proprio piacimento: la misura dell'efficienza si è spostata dalla capacità di mantenere l'equilibrio alla rapidità con cui una risorsa poteva essere estratta, trasformata e capitalizzata.

La Terra, l'acqua e l'energia sono diventate così scorte disponibili più che legami da custodire, alimentando l'idea che la produzione materiale può proseguire senza limiti; Ne è derivato un contesto in cui soltanto nel 2023 l'estrazione globale di risorse ha superato i 100 miliardi di tonnellate, mentre il tasso di riciclo effettivo ristagna sotto il 9% (Circle Economy, 2024), segnalando la crisi del modello lineare (Fig. 1): in questo scenario resilienza, sostenibilità e antifragilità di un ecosistema diventano parametri imprescindibili di ogni proposta rigenerativa.

Il rapporto tra l'uomo e la natura si è trasformato in un dominio del primo sulla seconda, generando un'economia basata su estrazione di materie prime, costruzione, utilizzo e smaltimento dei prodotti usati che trova il suo fondamento nella Rivoluzione Industriale del '700: l'obiettivo primario di migliorare la vita delle persone attraverso crescita e profitto ha trovato numerose soluzioni tecniche per accelerare la 'lentezza' dell'economia tradizionale. A nulla sembra essere valso il monito di John Stuart Mill che nel 1848, osservando il trionfo della Rivoluzione Industriale, aveva lanciato nel suo volume Principles of Political Economy un avvertimento in forte controtendenza: un'economia che inseguiva la crescita illimitata avrebbe finito per distruggere l'ambiente da cui trae alimento, mentre una condizione almeno stazionaria, fondata su equità e sobrietà, avrebbe offerto maggiori garanzie di prosperità nel tempo (Mill, 1848).

Fino al secondo dopoguerra la filosofia del 'più è meglio' ha continuato a dominare il dibattito pubblico: si riteneva che la prosperità potesse crescere senza limiti e che l'ambiente fosse un serbatoio inesauribile di risorse e in cui conferire all'infinito gli scarti. La prima svolta teorica è generalmente attribuita a Kenneth E. Boulding (1966) che, nel saggio The Economics of the Coming Spaceship Earth, invita gli economisti a misurare la crescita non sul flusso di merci, ma rispetto al grado di riciclo interno di materia ed energia: è la prima elaborazione sistematica che critica esplicitamente lo sviluppo lineare illimitato e anticipa di fatto concetti oggi centrali come economia circolare e limiti planetari.

Un successivo sviluppo del tema è offerto da Meadows et alii (1972) con The Limits to Growth che da un lato renderà popolare la questione presso l'opinione pubblica, dall'altro costituirà una pietra miliare per gli studi di quegli anni. I concetti di 'sostenibilità' e di 'sviluppo sostenibile' saranno promossi poi dal Report Our Common Future (UN, 1987) e successivamente, integrati con nuove accezioni, da documenti di indirizzo strategico e sempre più frequenti iniziative che coinvolgeranno anche il settore delle costruzioni, attivando riflessioni sui concetti di resilienza, decrescita, disaccoppiamento, circolarità ed ecologia urbana.

Quanto fatto finora nella pratica si è rilevato insufficiente rispetto agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030 (UN, 2015); quasi due secoli dopo, l'intuizione di Mill si ripropone con un'urgenza sorprendente, allarmando la comunità scientifica e le Istituzioni internazionali: i recenti esiti del workshop sponsorizzato da IPBES e IPCC (Pörtner, 2021) confermano la condizione di urgenza, dimostrando che esaurimento delle risorse non rinnovabili[1], crisi climatica[2] e perdita di biodiversità[3] sono processi inseparabili mossi dalle stesse pressioni antropiche e amplificati da retroazioni reciproche (Fig. 2).

Conferme di uno stato di crisi planetaria arrivano anche da altre fonti: il numero e la durata dei periodi di siccità sono aumentati del 29% dal 2000, rispetto ai due decenni precedenti[4]; circa il 50% della popolazione mondiale (4 miliardi di persone) e quasi un terzo delle maggiori città del mondo soffrono di una severa carenza idrica per almeno un mese all'anno, condizione destinata a peggiorare entro il 2050[5]; nella stessa finestra temporale la crisi interesserà tra il 42% e il 79% dei bacini idrografici globali (IPCC, 2023a): superare 1,5 °C di riscaldamento medio significa quindi compromettere funzioni ecosistemiche chiave e innescare transizioni probabilmente irreversibili.

Le città del Terzo Millennio, nelle quali si sommano crisi climatica, pressione demografica, stress idrico ed elevata domanda energetica, diventano l'epicentro di questa emergenza; da qui l'obbligo etico di ripensare la produzione di valore e benessere senza erodere risorse e cicli naturali che la rendono possibile.

All'interno delle politiche climatiche una delle strategie concrete è rappresentata dal ripensare il metabolismo urbano promuovendo un nuovo paradigma circolare acqua / energia / cibo (Fig. 3) che agisce simultaneamente su disponibilità idrica, raffrescamento latente e sicurezza alimentare. In tale strategia l'economia circolare dell'acqua assume un ruolo determinante: non si tratta solo di 'chiudere' un circuito idrico, ma di ripensare l'intero metabolismo urbano con le architetture tecniche e naturali di quella 'stazionarietà evolutiva' auspicata da Mill, attivando una condizione in cui il benessere deriva dall'efficienza dei cicli e non dall'estrazione continua di risorse; riconoscere tuttavia il valore di questi approcci non basta, occorre dotarli di un'infrastruttura culturale, cognitiva e istituzionale che ne sorregga l'ambizione.

Parallelamente le Soluzioni basate sulla Natura (NbS) e una governance integrata acqua / energia / cibo (Ingaramo et alii, 2023; Bologna and Hasanaj, 2023) possono costituire il braccio operativo della transizione, riducendo le pressioni sull'acqua dolce e sulla biodiversità, sostituendo gradualmente attraverso soluzioni ibride le infrastrutture grigie (Valente et alii, 2024) ed equilibrando i flussi di materia ed energia in entrata e uscita.

In questo scenario il riciclo dell'acqua non si configura come misura ancillare, ma come componente strutturale di un metabolismo urbano capace di rigenerare qualità ambientale e comfort microclimatico attraverso strategie, misure e azioni integrate (He et alii, 2021; Ward et alii, 2020). Per il raggiungimento di tale obiettivo è necessario un cambio di paradigma, dalla 'gestione reattiva', che interviene ex post sugli effetti, alla 'pianificazione proattiva', che affronta in anticipo i fattori di stress per la risorsa idrica, costruendo soluzioni modulabili e integrate e valutandone in alcuni casi gli esiti attraverso indicatori trasparenti e comparabili.

Tale nuovo paradigma si nutre dei tre elementi cardine della resilienza, della sostenibilità e dell'antifragilità, la prima intesa come la capacità del sistema di assorbire shock e recuperare funzionalità, la seconda in quanto capace di mantenere le prestazioni nel lungo periodo senza erodere il capitale naturale e quello infrastrutturale, la terza come attitudine del sistema al miglioramento attraverso attività di apprendimento e riconfigurazione.

Alla luce delle superiori premesse il contributo avanza la tesi che gli insediamenti urbani possano trasformarsi da 'punti caldi' in 'nodi di raffrescamento' di una rete planetaria, mitigando le isole di calore e attenuandone, per somma, gli effetti su scala regionale e propone di ripensare il metabolismo della città come architettura tecnico-ecologica capace di saldare resilienza, sostenibilità e antifragilità con un duplice obiettivo: da un lato offrire un quadro teorico-operativo per la progettazione e la realizzazione di sistemi circolari che operino sulle relazioni acqua / energia / cibo, dall'altro mettere a disposizione di Amministratori, progettisti e ricercatori una elaborazione critica per alimentare il dibattito scientifico ed elaborare scenari e politiche di neutralità carbonica.

Rivolgendosi ai settori dell'Urbanistica, dell'Architettura e della Progettazione Tecnologica e Ambientale, il testo intende 'dialogare' anche con le scienze socio-economiche e con gli studi sul clima, nella convinzione che solo uno sguardo interdisciplinare possa cogliere la complessità delle relazioni acqua / energia / cibo, e proporre una nuova chiave di lettura del tema attraverso le connessioni tra il paradigma delle 4R (Ridurre, Riutilizzare, Recuperare, Rigenerare) e la triade resilienza / sostenibilità / antifragilità, un'ibridazione che consente di superare la lettura lineare del ciclo idrico e di proporre la città come 'nodo di raffrescamento' capace di trasformare le isole di calore in vere e proprie 'pompe di raffrescamento urbano'.

Rispetto alla letteratura esistente, caratterizzata da approcci settoriali o esclusivamente tecnologici, il contributo presenta un modello integrato che mette in relazione criteri idraulici, microclimatici, energetici e sociali da una prospettiva critica: oltre a illustrare tecniche e buone pratiche, il testo mette in luce asimmetrie di potere, rischi di eco-gentrificazione e compromessi ambientali, fornendo strumenti per decifrare limiti e superare barriere sistemiche.

La rassegna bibliografica scientifica è stata selezionata con una ricerca sistematica su Scopus,



Fig. 1 | Open-pit mining in Palabora (South Africa): an iconic image demonstrating the scale of material extraction that sustains the linear model (source: earthobservatory.nasa.gov, 2019).

Web of Science e Google Scholar, integrata da banche dati istituzionali (IPCC, EEA, OECD) e prendendo in esame il periodo 2000-2025 con parole chiave, combinate a due a due e in lingua inglese, quali 'circular urban water', 'water metabolism', 'water-energy-food nexus', 'water decentralisation', 'urban heat island mitigation' e 'urban resilience', 'urban antifragility', '4R and urban water'.

I 5.718 record individuati sono stati sottoposti a due filtri successivi: 1) analisi di titolo e abstract, con selezione di pubblicazioni e report istituzionali che riguardano contesti urbani o peri-urbani e analizzano congiuntamente almeno due elementi fra acqua, energia, cibo o mitigazione dell'isola di calore; 2) valutazione di articoli o volumi scientifici soggetti al processo di revisione tra pari che presentano dati sperimentali o modelli quantitativi, mentre per la letteratura grigia quei documenti che costituiscono linee guida o documenti di policy. Ciò assicura un corpus ampio, ma coerente, capace di restituire l'evoluzione più recente del dibattito e della ricerca senza trascurare i testi fondativi e di riferimento sul tema.

Per dimostrare la tesi proposta il contributo si struttura in diverse sezioni, nella prima delle quali si riporta una riflessione sugli elementi che possano contribuire alla transizione dal ciclo idrico lineare al modello circolare delle 4R, evidenziando come la chiusura locale dei flussi possa ridurre prelievi, consumi energetici e temperature in ambito urbano; nella seconda sezione si propone una nuova cornice 'di valutazione' basata sulla triade resilienza / sostenibilità / antifragilità, indispensabile per misurare la robustezza di reti e tecniche in condizioni di incertezza climatica; la terza sezione, dedicata alla pianificazione proattiva, traduce tale cornice in strumenti operativi che guidino la scelta del livello ottimale di ridondanza idrica ed energetica.

La quarta sezione presenta una rassegna di cinque città circolari, dai contesti climatici differenti, per le quali si verifica la trasferibilità delle soluzioni adottate, mentre la quinta sezione introduce il focus sul ruolo dei corpi idrici (laghi, fiumi e bacini urbani) letti come batterie termiche naturali la cui sinergia con infrastrutture verdi amplifica la mitigazione dell'isola di calore urbana. La sesta sezione analizza il potenziale delle acque reflue urbane, mostrando come micro-fitodepurazione e reti duali convertano uno scarto in raffrescamento diffuso e fertilizzante, con benefici diretti anche per l'edilizia sociale e la sicurezza alimentare.

Segue la mappatura delle sinergie e dei compromessi tra il metabolismo urbano proposto e i 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), preludio alla matrice 4R-SDG che può rendere governabile la complessità e ridurre il conflitto decisionale tra stakeholder. Chiude il lavoro una riflessione 'oltre l'ingegneria', che chiama architetti, amministratori e comunità a riconoscere l'acqua rigenerata come infrastruttura culturale, motore di equità e strumento per le politiche di neutralità carbonica.

Dal ciclo lineare al ciclo circolare dell'acqua | L'approvvigionamento idrico ha seguito per secoli uno schema lineare del tipo 'prelievo-uso-scarico', concepito in un'epoca di presunta abbondanza della risorsa. Di fronte a stress idrici sempre più frequenti e pressioni demografiche sempre meno sostenibili il modello lineare rileva quotidianamente i propri limiti fisici ed economici, tra cui scarsa disponibilità di acqua, copiose perdite e alti costi energetici della rete di adduzione e mancato recupero dei nutrienti. Un approccio improntato all'economia circolare propone invece di 'chiudere il ciclo', riducendo i flussi di ingresso, prolungando la vita utile della risorsa idrica e recuperando energia e nutrienti dagli effluenti.[6]

In tale ottica sono da leggersi tanto il Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020), con il quale la Commissione Europea ha inserito l'acqua tra le risorse strategiche, quanto la letteratura scientifica più recente, che collega la circolarità idrica alla resilienza sistemica (Bouziotas et alii, 2023; Marques, Pinto and Miranda, 2023). Inizia a prendere corpo così un nuovo criterio di progetto, la 'blue-circularity', che non è meramente tecnologico: l'acqua è 'materia prima rinnovabile' capace di generare co-benefici ambientali, economici e sociali e di interfacciarsi con i cicli di energia e cibo in una nuova logica in cui inclusività, resilienza e circolarità si integrano per affrontare le numerose sfide del nuovo millennio e concorrere al raggiungimento dei 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile.

Uno dei principi cardine della 'blue-circularity' è il disaccoppiamento, ovvero la capacità di sviluppare valore aggiunto senza incrementare il prelievo di risorse. Applicato all'acqua in ambito urbano esso ha il potenziale di produrre crescita, attrattività e qualità di vita e ridurre il prelievo dalle falde: recenti studi su alcune macroregioni manifatturiere cinesi mostrano che, grazie a tecnologie più efficienti, cambiamenti comportamentali e riciclo, è possibile passare da un debole a un elevato disaccoppiamento facendo crescere sensibilmente l'economia locale in meno di quindici anni (Gong et alii, 2025).

Le crisi del Day Zero – come quelle sperimentate da Cape Town (2018), São Paulo (2014-15) e Chennai (2019), in cui le città annunciano l'imminente esaurimento della disponibilità d'acqua – ci ricordano cosa accade quando la transizione circolare arriva tardi: la crisi idrica non dipende dal solo fattore idrologico, ma dalla concomitanza di fattori quali crescita della domanda, perdite di rete, dipendenza da poche fonti superficiali, insufficiente capacità di accumulo e ritardi decisionali. In tale ottica alcune Amministrazioni hanno ripensato il ciclo dell'acqua avviando una pianificazione proattiva, divenuta un imperativo operativo per evitare pesanti costi umani, ambientali e sociali. Per scongiurare scenari di Day Zero e tradurre le loro lezioni in azione concreta occorre attivare in modo coerente il quadro operativo delle cosiddette '4R' (Ridurre, Riutilizzare, Recuperare, Rigenerare).

Ridurre è la priorità gerarchica che prevede misure per contenere sia le perdite di rete – ancora superiori al 35% in molte città dell'Europa meridionale – sia la domanda di acqua: le analisi sui bilanci idrici prodotte dalla International Water Association dimostrano che l'insieme di misure legate a un monitoraggio costante delle perdite, una gestione attenta che differenzi la pressione delle condotte idriche in funzione delle necessità dei quartieri serviti e una continua verifica dell'efficienza dell'infrastrut-

tura consentono di sostituire un modello reattivo con uno 'proattivo', ottenendo rilevanti benefici su costi operativi, continuità di servizio e qualità dell'acqua (Kwon et alii, 2025).

Sul lato domanda è stato stimato che l'uso di rubinetti e doccioni con aeratori e di cassette dei WC con doppio pulsante di scarico consente un risparmio di acqua per uso residenziale del 20-25% e fino a 25 litri al giorno per abitante nei climi mediterranei (Vinayagam et alii, 2024). Questi risultati confermano l'importanza della 'prima R' della circolarità idrica, che è anche la più economica da attuare: diverse evidenze sperimentali hanno mostrato che leve comportamentali e di coinvolgimento emotivo degli utenti, accoppiate a misure tariffarie, dispositivi efficienti e nuove tecnologie (misuratori ultrasonici e piattaforme cloud che consentono di individuare micro-perdite domestiche e inviare notifiche all'utente), riescono a ridurre i consumi domestici in modo statisticamente significativo e continuativo (Agarwal et alii, 2022; Koop, Van Dorssen and Brouwer, 2019), diversamente da quanto avviene con prescrizioni e imposizioni da parte della governance (Lee and Jepson, 2020).

Ridurre perdite di rete e consumi è quindi la prima strategia per qualsiasi città che aspiri alla circolarità idrica; tuttavia finché l'intero fabbisogno potabile dipende da un'unica fonte di approvvigionamento, la sola riduzione non basta. Serve un secondo passo complementare: Riutilizzare, ovvero raccogliere e trattare le acque grigie e meteoriche affinché ritornino utili al tessuto urbano – per irrigazione, antincendio, raffrescamento, ecc.– o, quando necessario, addirittura per scopi potabili tramite percorsi indiretti o diretti.

Il riuso è 'sostenibile' e funziona davvero soltanto se è gestito secondo il principio 'fit for purpose': la qualità del trattamento deve essere commisurata all'utilizzo finale, evitando filiere energivore che farebbero lievitare inutilmente costi e impatto ambientale. L'evidenza empirica lo conferma: a Singapore e Los Angeles, in condizioni di forte stress idrico, i sistemi di riuso indiretto potabile coprono ormai fino al 40% della domanda complessiva (Lefebvre, 2018; Luthy, Wolfand and Bradshaw, 2020); in Europa i Living Labs di Barcellona hanno mostrato che reti duali di quartiere soddisfano il 35% dei fabbisogni idrici, attenuano i picchi di pressione sulla condotta principale e stabilizzano il prezzo dell'acqua a 0,82 €/mc, valore certamente più conveniente dell'alternativa basata su grandi impianti di dissalazione.

La versatilità delle soluzioni utilizzabili consente di scalare il riuso delle acque dal quartiere al singolo edificio: ad esempio i tetti blu-verdi dotati di vasche intelligenti – programmate sulla base delle previsioni meteo – hanno il potenziale di garantire volumi di accumulo maggiori rispetto agli omologhi tradizionali, trasformando ogni copertura in un micro-serbatoio multifunzione.

La tecnologia tuttavia non vive di soli bilanci energetici: a sancirne il successo è l'accettabilità sociale. Un'indagine condotta su oltre mille famiglie di Singapore dimostra che la fiducia nel riuso aumenta in modo considerevole quando l'intervento è accompagnato da campagne di branding istituzionale e da piattaforme online che pubblicano, in tempo reale, i parametri di qualità dell'acqua (Iftekhar et alii, 2019); una narrazione pubblica del ciclo basata su soglie operative chiare può quindi orientare le pratiche quotidiane e legittimare scelte impiantistiche complesse come il riuso potabile indiretto (Warner and Meissner, 2021; Luan, 2010). In California la definizione di protocolli normativi 'fit for purpose' e la realizzazione del progetto Groundwater Replenishment System hanno consentito alla Contea di Orange di soddisfare i bisogni di circa 600 mila residenti con il riuso potabile indiretto; in prospettiva la convergenza tra riduzione della domanda e riuso mirato consentirà alle città di diversificare le fonti, alleviare la pressione sulle falde e rendere il proprio metabolismo idrico più resiliente, più efficiente e più equo (Lazarova et alii, 2025).

Il terzo pilastro della circolarità idrica è Recuperare ed entra in gioco quando la risorsa è già stata ridotta nei consumi e reimpiegata nei cicli urbani: le acque nere, che solitamente vengono 'allontanate', non vanno più considerate un rifiuto da smaltire, ma una miniera di energia e nutrienti. Il cambiamento di prospettiva è netto perché dagli impianti di depurazione tradizionali si passa alle Water Resource Recovery Facilities (WRRF), veri hub capaci di estrarre calore e produrre biogas e fertilizzanti a basse emissioni.

Il primo beneficio è il recupero del calore latente. Le acque reflue arrivano in fognatura con una temperatura mediamente superiore di 8-12 °C rispetto all'ambiente; convogliando tale calore attraverso collettori a piastre installati su condotte di diametro superiore a 600 mm si ottengono fra 450 e 600 kWh all'anno per metro lineare, abbastanza da coprire circa il 20% del fabbisogno termico di un edificio residenziale di medie dimensioni.

Sul versante bioenergetico la digestione anaerobica dei fanghi produce biogas, ma i risultati migliori arrivano quando i fanghi sono co-digeriti con la frazione organica dei rifiuti urbani: gli studi di Yoshida, Gable e Park (2012) e di Tonanzi et alii, (2021) mostrano un incremento significativo nella resa di biogas, sufficiente a rendere l'impianto autosufficiente sotto il profilo elettrico e termico dimostrano che con la codigestione si risparmiano 189 kg CO_{2eq} per tonnellata di compost e si dimezzano i costi di produzione.

Recuperare significa infine riportare in circolo i nutrienti (fosforo, azoto e carbonio) dal fango secco, abbattendo il carico eutrofico a valle e fornendo un fertilizzante a emissioni quasi zero. Chiudere anche il ciclo dei nutrienti riduce la dipendenza da concimi minerali (di produzione industriale) e contribuisce alla sicurezza alimentare delle aree periurbane. In sintesi il pilastro Recuperare trasforma un centro di costo – l'impianto di depurazione – in un generatore di valore: produce energia termica, elettrica e materia prima fertilizzante, contribuisce alla decarbonizzazione urbana e lega l'acqua al metabolismo energetico e agricolo della città.

Il quarto pilastro, Rigenerare, chiude il framework delle '4R' legando il ciclo tecnico dell'acqua al suo ciclo ecologico. Se Ridurre, Riutilizzare e Recuperare intervengono principalmente sul 'quanto' e sul 'come' della risorsa, Rigenerare sposta l'attenzione sul 'dove', riportando l'acqua dentro l'organismo urbano e restituendole funzioni ecologiche, climatiche e sociali. L'idea chiave è che una città efficiente non basta: per essere davvero circolare deve anche riattivare suoli permeabili, corridoi ripariali, bacini di ricarica e biodiversità, così da trasformare l'acqua da vettore lineare a circuito

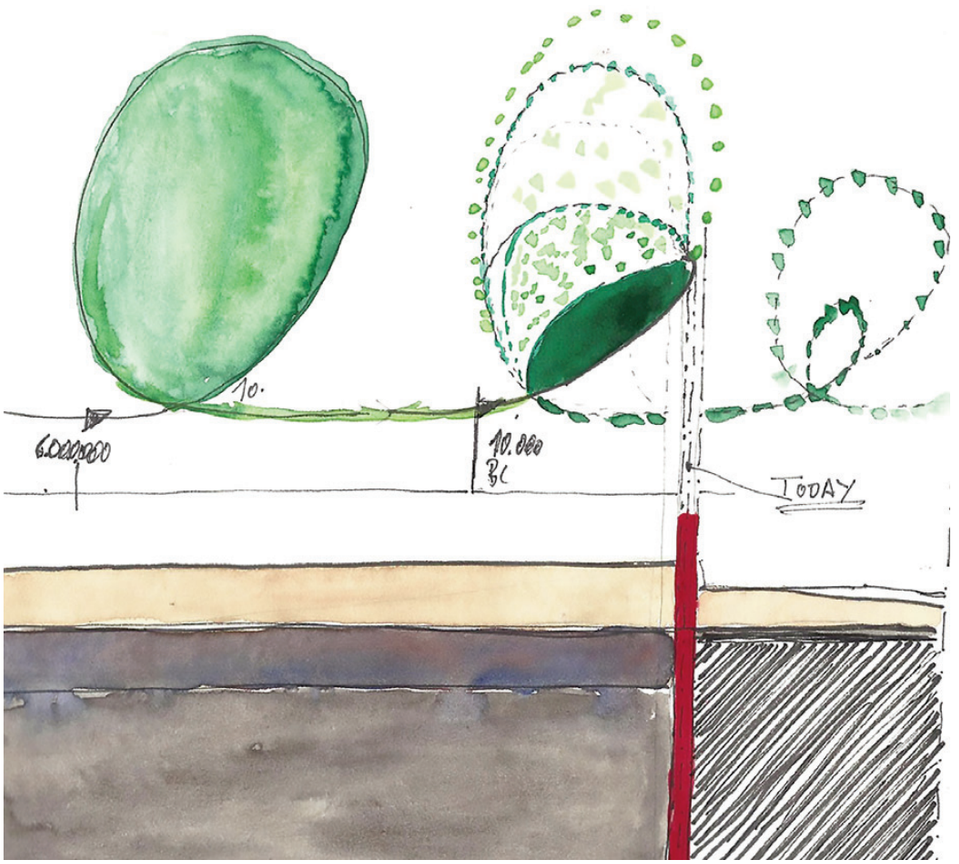


Fig. 2 | A geological explosion, biological implosion (credit: G. Mittersteiner, 2025).

complesso in cui infiltrazione, fitodepurazione ed evaporazione partecipano simultaneamente ai bilanci di calore, nutrienti e carbonio.

In particolare, dalla prospettiva del riciclo e delle filiere bio-circolari, per la fitodepurazione è possibile utilizzare specie autoctone come la Cannuccia di palude ('Phragmites australis'), la Tifa ('Typha latifolia') e il Giunco ('Juncus effusus'), le cui radici creano un habitat ideale per i microrganismi che degradano gli inquinanti e assorbono i nutrienti in eccesso, migliorando la qualità dell'acqua; esse possono essere periodicamente raccolte e trasformate in fibre per pannelli isolanti e tessuti biodegradabili, chiudendo così il cerchio fra depurazione idrica, rigenerazione ecologica e produzione locale di biomateriali (Morpurgo, 2024).

Gli esempi di Seoul, Wuhan e Copenaghen chiariscono in che modo la rigenerazione idrica possa tradursi in benefici tangibili. A Seoul la demolizione di una strada sopraelevata ha permesso di ripristinare il torrente Cheonggye in un corridoio fluviale lungo quasi sei chilometri (Figg. 4-7) capace di trattenere 120.000 mc di pioggia; nel raggio di mezzo chilometro la temperatura media dell'aria è scesa di 1,5 °C e la biodiversità ittica è quintuplicata in soli dieci anni (Kulkarni, 2025). Nel distretto di Guanggu a Wuhan il programma Sponge City, replicato anche in altre città della Cina (Figg. 8-10), ha realizzato su circa il 30% della superficie urbana tetti blu-verdi, pavimentazioni permeabili e canali di raccolta delle acque piovane a cielo aperto: il ruscellamento è diminuito sensibilmente mentre i picchi post-monsonici si sono abbassati di diversi centimetri evitando gli allagamenti di diverse abitazioni (Peng and Reilly, 2021).

A Copenaghen il Cloudburst Master Plan infine ha trasformato strade sovradimensionate in boulevards blu-verdi che drenano fino a 30 mm di pioggia in mezz'ora verso parchi di ritenzione usati come spazi ricreativi (Figg. 11-13); questa e altre soluzioni previste dal Piano si stima possano generare un surplus socioeconomico complessivo di 5 miliardi di corone danesi nell'arco di 100 anni, rispetto a uno scenario in cui la città non intraprende alcuna azione (City of Copenhagen, 2014).

Questi casi, pur distanti per latitudine e scala, condividono tre elementi ricorrenti: spostano il baricentro dall'opera puntuale a una rete ecologico-urbana diffusa; trattano l'acqua come alleata anziché minaccia, consentendole di espandersi, infiltrarsi e rinfrescare; generano infine un plusvalore – ambientale, sociale ed economico – che supera ampiamente l'investimento iniziale. Nel linguaggio del metabolismo urbano ciò significa ridurre gli ingressi di acqua e l'energia spesa per il pompaggio, ma soprattutto ridurre gli output entropici – allagamenti, calore sensibile e inquinanti – trasformando la città in un sistema 'multi-dominio' in cui acqua, energia e vegetazione dialogano in modo armonico, generando benessere climatico, salute pubblica e sviluppo economico duraturo: la città aumenta così la resilienza funzionale dando forza a un metabolismo 'autopoietico'. La forza del framework 4R è la sua apparente semplicità gerarchica, ma la sua debolezza sta proprio nella sua sequenza lineare: Ridurre, Riutilizzare, Recuperare e Rigenerare descrivono un'operatività logica, ma la pratica in ambito urbano mostra che i quattro pilastri sono spesso simultanei, talvolta persino centrifughi.

Ridurre le perdite di rete, per esempio, può diminuire la portata minima indispensabile a far funzionare in depressione un impianto di recupero energetico fognario, limitando la convenienza del Recuperare; analogamente, spingere sul Riutilizzare tramite reti duali può sottrarre flussi di azoto e fosforo rendendo più costosa la filiera dei fertilizzanti circolari. Ne deriva che una progettazione circolare basata sul framework delle 4R richiede una regia capace di valutare soprattutto compromessi idraulici, energetici e biochimici in tempo reale, attraverso ad esempio audit post-crisi e aggiornamento periodico degli indicatori che possono trasformare lo shock in occasione di apprendimento e spingere la resilienza verso l'antifragilità.

La sfida progettuale non è dunque 'seguire' le singole R in sequenza, ma bilanciarle dinamicamente in funzione del contesto idro-climatico e soprattutto della geografia socio-economica locale. In questo senso il vero indicatore di maturità di un progetto non dovrebbe essere quanta acqua rigenera, ma quanti attori e livelli di governance riesce a coordinare e per quanto tempo. Un tetto blu-verde performa solo se il condominio accetta di installare 'valvole intelligenti', se il gestore idrico monitora i dati attraverso una piattaforma e se l'Amministrazione locale attribuisce al servizio ecosistemico incentivi e premialità. Senza un sistema gestionale urbano integrato, che sia consapevole dei compromessi e redistribuisca benefici, costi e responsabilità, le 4R rischiano di restare semplici soluzioni operative: attraenti in superficie ma fragili alla prima crisi.

Una questione spesso sottovalutata riguarda appunto i compromessi che possono essere determinati da alcune azioni: ogni R agisce su energia grigia, suolo, capitale finanziario e capitale sociale e non esiste una soluzione a impatto zero. La ricerca più innovativa sta provando a ridurre gli effetti collaterali, ma non potrà mai annullarli; in quest'ottica bisogna passare dalla logica di 'ridurre il danno' a quella del 'redistribuire equamente i benefici'. A tal proposito Ness (2024) avverte che se manca un tetto assoluto ai consumi ogni incremento di efficienza può tradursi in un 'effetto rimbalzo': trasposto al ciclo idrico urbano ciò si traduce nell'affiancare alle tecnologie di risparmio un limite pro-capite e meccanismi di redistribuzione affinché l'acqua rigenerata non alimenti nuova domanda e si possa riequilibrarne la ripartizione.

A complemento di questa visione sistemica una seconda prospettiva ribalta l'ordine apparente delle 4R: quando la città reintegra gli ecosistemi nel proprio tessuto, Rigenerare diventa il prerequisito che innesca e semplifica le altre R. Ridurre e Riutilizzare diventano processi conseguenti quasi automatici, perché la popolazione riconosce valore intrinseco all'acqua e accetta di cambiare abitudini,

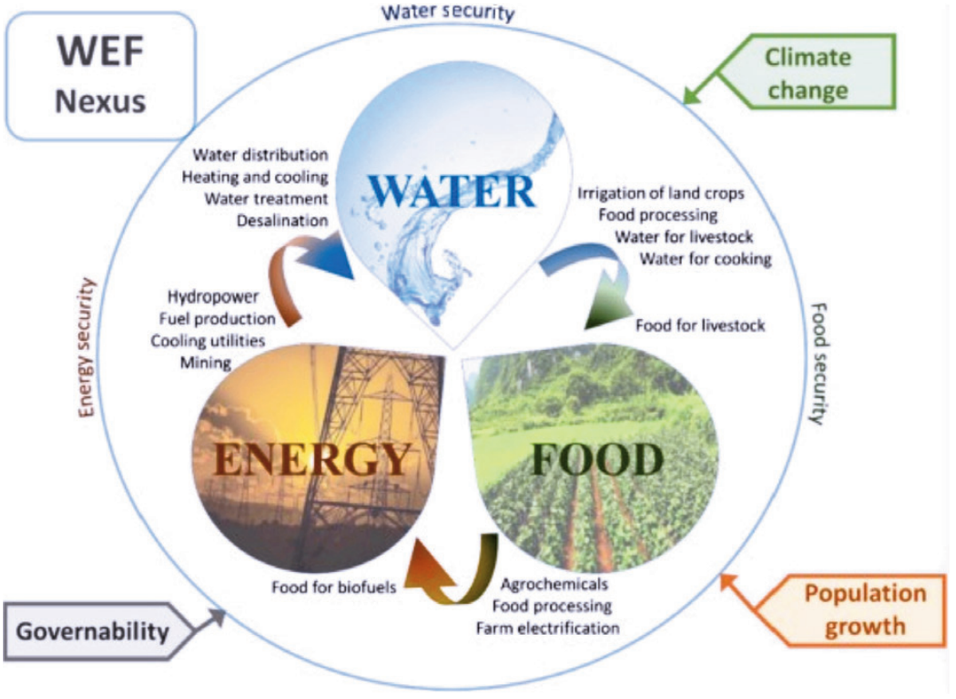


Fig. 3 | The Water / Energy / Food Nexus: this interconnected relationship highlights one of the most significant challenges facing the Earth (source: Mahlknecht, González-Bravo and Loge, 2020).





Figg. 4, 5 | Seoul: Transportation infrastructure overruling and degrading the Cheonggye River; Aerial view of Cheonggye River after urban regeneration (sources: medium.com; myk-d.com, 2018).

mentre Recuperare si attesta su volumi più ridotti e maggiormente prevedibili. In altre parole Rigenerare la città è il prerequisito per rigenerarne i flussi di energia e materia.

In tale duplice prospettiva il futuro della circolarità idrica in ambito urbano non dipenderà quindi da eventuali altre R che potranno essere messe in gioco, ma dal coltivare la capacità di gestire le tensioni tra quelle esistenti, trasformando le infrastrutture tecniche in dispositivi ecologici, culturali e sociali: solo così potremo passare a un ciclo dell'acqua che 'ci aiuta' a ridefinire forma e senso della città contemporanea.

Resilienza, sostenibilità e antifragilità dell'approvvigionamento idrico urbano | Evidenziata l'importanza del framework delle 4R per individuare 'quali soluzioni adottare', spostiamo la riflessione su un'altra questione, ovvero 'con quale capacità di resistere, durare e migliorare sapremo fare evolvere le 4R nel tempo'. È dentro questa prospettiva che la triade 'resilienza / sostenibilità / antifragilità' da slogan diventa vero motore di progetto per l'approvvigionamento idrico urbano, offrendo una lente integrata con cui valutare reti, tecnologie e governance lungo l'intero ciclo urbano dell'acqua.

Comprendere come si influenzino a vicenda e con quali strumenti possano essere misurate e progettate significa passare da un semplice elenco di buone pratiche alla costruzione di un vero 'sistema di gangli' dell'approvvigionamento urbano, capace di anticipare le soglie critiche, di distribuire equamente i benefici e di evolvere dopo ogni stress.

Nel lessico della progettazione ambientale i termini 'resilienza', 'sostenibilità' e 'antifragilità' assumono definizioni e metriche parzialmente differenti, ma convergono nell'orientare scelte spaziali e tecnologiche; esse costituiscono oggi la triade concettuale privilegiata per decifrare un'era segnata da una policrisi: lungi dall'essere slogan intercambiabili, rappresentano lenti complementari che permettono di cogliere la complessità delle interazioni acqua / energia / cibo e delle infrastrutture che li sostengono.

In condizioni di variabilità e incertezza climatica crescenti la resilienza non coincide con il semplice 'ritorno allo stato iniziale', ma con la capacità dei sistemi socio-ecologici urbani di assorbire shock e riorganizzarsi mantenendo i propri processi essenziali, funzioni, identità e retroazioni (Folke, 2016; Folke et alii, 2010, 2021). Nelle infrastrutture idriche urbane la resilienza si declina lungo tre dimensioni operative: strutturale (ridondanze e robustezza delle componenti), funzionale (capacità di mantenere livelli di servizio essenziali durante e dopo l'evento) e organizzativa (coordinamento tra i vari operatori e gestori, procedure, aggiornamenti).

La letteratura scientifica riporta una pluralità di quadri valutativi, semplicemente basati sul rischio o con parametri di tipo multi-criteriale; in tale prospettiva si collocano ad esempio approcci come il Safe & Sure, che ibrida gestione del rischio, affidabilità e processi di recupero (Butler et alii, 2014), oppure cornici concettuali, che integrano dimensioni politico-regolative, economiche e ambientali (Bertilsson et alii, 2019), o ancora dispositivi di interoperabilità tra sistemi idrici e altri sottosistemi urbani (Vercruysse, Dawson and Wright, 2019). Tuttavia Asghari et alii (2023) nella loro rassegna critica dei metodi evidenziano la necessità di combinare letture olistiche e tecnico-prestazionali – queste ultime incentrate su indicatori di robustezza di rete, ridondanza dei flussi, tempi di ripristino e perdite ammissibili – per tradurre la resilienza da principio a stru-





Figg. 6, 7 | Seoul: the Cheonggye River supports biodiversity and provides spaces for recreation and socialising (sources: trabantos via Shutterstock; J. Chung).

mento operativo. La sostenibilità, pur incorporando la resilienza, amplia l'orizzonte del servizio al lungo periodo con il fine di evitarne la perdita del capitale naturale e artificiale, puntando sull'equilibrio dinamico fra prelievo e rigenerazione delle risorse entro i confini planetari (Rockström et alii, 2009), valorizzando l'efficienza a fine uso, contenendo le perdite fisiche, diversificando le risorse (comprese quelle non convenzionali) secondo la logica del 'fit for purpose', riducendo l'impegno energetico e favorendo l'equità d'accesso.

In condizione di variabilità climatica la sostenibilità richiede di disaccoppiare domanda idrica e crescita economica, ridisegnando il metabolismo urbano (includendo cibo, acqua, energia e materie prime; Fig. 14) con strumenti tecnici e regolativi coerenti e transcalari (Capodaglio, 2024); ad esempio a scala di bacino e di città l'integrazione delle strategie per la siccità e per le alluvioni – non più trattate come rischi separati – costituisce un passaggio chiave per la robustezza di lungo periodo (Ward et alii, 2020). L'antifragilità infine introduce un salto di paradigma perché postula la possibilità per i sistemi non solo di resistere allo shock, ma di migliorarsi grazie ad esso, facendo tesoro dell'esperienza dell'insuccesso locale nella crescita complessiva per ridurre l'entità delle perdite sistemiche future. Essa valorizza quindi lo studio di scenari possibili, la sperimentazione locale e l'apprendimento adattivo, dimensioni particolarmente importanti nella pianificazione e gestione dell'acqua (Taleb and Douady, 2013; Blecic and Cecchini, 2017, 2020; Babovic, 2018). Modularità tecnologica, decentramento graduale (impianti di recupero e reti multiple a scala di quartiere, di isolato e di edificio), ridondanze selettive nei nodi critici e feedback informativi in tempo reale (attraverso la sensoristica) consentono di evitare guasti a cascata in reti interdipendenti e di scalare efficienza e innovazione senza blocchi di sistema.

Sul piano spaziale questa impostazione richiama una città porosa e adattiva, in cui infrastrutture blu e verdi sono integrate con dispositivi di stoccaggio e trattamento distribuiti, producendo co-benefici microclimatici (all'uomo e alla natura) e riducendo i fabbisogni energetici degli edifici (Beceiro, Brito and Galvão, 2020). In quest'ottica l'antifragilità non coincide con il semplice aumento di ridondanza: essa si manifesta nella capacità dei sistemi diffusi, modulari e manutenuti di apprendere dagli eventi estremi, riallocare i benefici e ridurre progressivamente le asimmetrie di esposizione e vulnerabilità tra quartieri.

Rispetto ai fattori tempo e spazio, per la comparabilità delle soluzioni da mettere in campo, l'antifragilità valuta robustezza e affidabilità, due importanti requisiti del sistema idrico urbano. La robustezza della rete può essere descritta come la capacità di erogare una quota rilevante della domanda anche durante eventi severi per durata e intensità; nelle prove di stress un obiettivo progettuale ragionevole potrebbe essere mantenere in esercizio almeno il 75% dell'utenza anche in caso di guasto puntuale o di rottura lineare della condotta, ripristinando il livello di servizio in tempi proporzionati alla criticità del contesto e riducendo al minimo la perdita di servizio. L'affidabilità, ovvero la capacità di mantenere gli standard prestazionali attesi, deve essere accompagnata da una lettura qualitativa della vulnerabilità, intesa come propensione del sistema a un collasso funzionale quando investito da shock a cascata.

Resilienza, sostenibilità e antifragilità non sono dunque tappe lineari dello sviluppo economico di una comunità, ma concorrono a uno stesso orizzonte poiché la resilienza assicura la tenuta immediata, la sostenibilità garantisce la continuità nel tempo e l'antifragilità spinge a trasformare la crisi in occasione evolutiva; se integrate esse delineano una strategia capace di coniugare prudenza e sviluppo, memoria e prospettiva, locale e globale.

Solo attraverso politiche che premiano la diversità delle soluzioni, la ridondanza funzionale e la capacità di apprendimento continuo è possibile aspirare a comunità idricamente sicure, economicamente prospere e culturalmente resilienti; ed è proprio in questa aspirazione che la triade rivela la sua natura 'esistenziale' prima ancora che tecnica, ricordandoci che prendersi cura dell'acqua equivale, in ultima analisi, a prendersi cura della vita.

Questi tre concetti applicati all'infrastruttura idrica convergono nel disegno di reti policentriche, modulari e ridondanti, capaci di sommare risparmio e riciclo a funzioni microclimatiche e sociali con effetti diretti sulla domanda di raffrescamento e sulla salute (IPCC, 2023b). In questo senso la città non è soltanto luogo di consumo della risorsa, ma un dispositivo metabolico capace di produrre servizi ecosistemici – regolazione dei deflussi, filtrazione, ricarica di falda, evapotraspirazione, raffrescamento, incremento della biodiversità – che la letteratura scientifica ha collegato a benessere e salute (Costanza et alii, 1997; Hartig et alii, 2014; Elmqvist et alii, 2018). L'esito è anche in questo caso un cambio di paradigma dal 'progetto dell'opera' al 'progetto del servizio', dove i dispositivi blu-verdi, interfacciati con reti grigie e tecnologie digitali, diventano parte del lessico della città contemporanea.

Tuttavia è da rilevare che non mancano barriere all'adozione congiunta dei tre paradigmi. Un primo ostacolo è determinato dalla complessità del tema e dalla necessità di competenze diverse per definire un set di indicatori non facilmente sovrapponibili: allineare indicatori annuali (tipici della resilienza), target trentennali (sostenibilità) e logiche iterative di prova-errore (antifragilità) può generare conflitti che gli operatori e i gestori faticano a risolvere (Kaya et alii, 2025).

L'attuale dipendenza dalle reti idriche centralizzate aggrava il quadro: acquedotti e impianti novecenteschi sono capitali bloccati il cui ammortamento spinge a rifinanziare l'esistente anziché investire in moduli scalabili, compromettendo la ridondanza selettiva richiesta dalla resilienza (Horton, 2025). Sul fronte economico i benefici sistemici (prima tra tutti la riduzione del rischio collettivo) non entrano ancora nei meccanismi di tariffazione dei consumi, rendendo poco efficaci i business plan per soluzioni antifragili (US Water Alliance and Stantec, 2023).

A livello istituzionale domina poi la frammentazione di competenze tra acqua, energia e protezione civile, con conseguente dilatazione dei tempi decisionali e mancanza di standard prestazionali integrati. Le barriere digitali invece riguardano prevalentemente la cybersicurezza e l'interoperabilità: la sensoristica IoT espone i sistemi ad attacchi che molti gestori non sono pronti a fronteggiare, mentre la proliferazione di piattaforme proprietarie può determinare blocchi e gap tecnologici (Goodwin, 2024; Salih et alii, 2025).

Sul versante sociale l'equità resta irrisolta: senza fondi di compensazione i costi di modularità e ridondanza ricadono sulle bollette penalizzando le utenze più vulnerabili; inoltre l'antifragilità presuppone tolleranza per piccoli fallimenti controllati, ma spesso la Pubblica Amministrazione teme il danno reputazionale di qualsiasi interruzione volontaria del

servizio, riducendo la propensione a sperimentare. Nonostante le citate barriere la triade resilienza / sostenibilità / antifragilità non può restare un manifesto di principi e deve tradursi in decisioni capaci di governare variabilità e incertezza climatica divenute strutturali. Occorre dunque passare dalla descrizione della complessità alla costruzione di strumenti che ne anticipino gli effetti, ripensando gerarchie progettuali, schemi di investimento e logiche regolative. Nel concreto questo significa sostituire lo statico sistema idrico tradizionale con soluzioni modulabili, integrare modelli probabilistici che includano scenari di cambiamento pluridecennali e collegare gli obiettivi idrici con quelli energetici, alimentari, ambientali, ecologici e sanitari, così che lo stesso intervento possa garantire continuità di servizio, ridurre la domanda di energia e migliorare la qualità ecosistemica. Ridondanza intelligente, sperimentazione locale e apprendimento adattivo dovrebbero diventare in tal modo i criteri cardine nella scelta se mantenere, adeguare o dismettere le infrastrutture esistenti: il salto culturale è netto, ed è proprio questa inversione di prospettiva – dal concetto alla prassi, dalla stabilità presunta alla gestione dinamica del rischio – che entra in gioco la 'pianificazione proattiva', in cui il tempo stesso diventa variabile di progetto e l'incertezza un dato di partenza.

Pianificazione proattiva tra tempo e incertezza | Nel dominio dell'acqua in ambito urbano le tre dimensioni della resilienza, della sostenibilità e dell'antifragilità si intrecciano: le infrastrutture idriche concepite nello scorso secolo non reggono più in contesti nei quali le 'intense precipitazioni cinquantennali' sono diventate più frequenti e si alternano a prolungati periodi di siccità, entrambi tutt'altro che prevedibili. L'incertezza è quindi la 'nuova norma': nella narrazione collettiva bisogna riuscire a superare l'ossimoro del 'ritorno alla normalità' e abbracciare la visione di una 'nuova normalità' la cui costante è il cambiamento e dove la qualità di vita dipende dalla nostra abilità di convivere creativamente con l'incertezza.

Le civiltà del passato hanno prosperato o sono collassate anche in funzione della loro relazione con l'acqua; le testimonianze archeologiche sui sistemi di raccolta e distribuzione in regioni aride suggeriscono che la sfida odierna andrebbe affrontata recuperando i sistemi tradizionali e aggiornandoli con le migliori tecnologie disponibili per il recupero, il trattamento, la distribuzione e il monitoraggio digitale (Angelakis et alii, 2021). In tale ottica la carenza di acqua va distinta dalla siccità, poiché la prima nasce dall'incontro fra domanda eccessiva e offerta insufficiente dovuta a vincoli infrastrutturali o istituzionali, mentre la seconda è un fenomeno climatico ed esogeno.

Ridurre la dipendenza da fonti superficiali e sotterranee già sotto stress richiede un mosaico di soluzioni diverse che devono integrarsi con strategie di mitigazione e di adattamento capaci di riconoscere la natura policentrica del rischio (Moser and Ekstrom, 2010) attraverso un approccio olistico nel quale, oltre alla diversificazione delle fonti, occorre privilegiare l'interconnessione fra i sottosistemi e l'utilizzo di infrastrutture verdi, capaci di fornire servizi ecosistemici aggiuntivi rispetto alle infrastrutture grigie tradizionali.

Le attività di ricerca sulla 'water security' (Bakker, 2012) mostrano infatti che la vulnerabilità non dipende solo dalla quantità d'acqua disponibile, ma è legata soprattutto alla capacità istituzionale di gestirne la variabilità. In tale ottica una pianificazione proattiva non può non assumere il tempo come variabile di progetto: in un contesto in cui gli shock idrologici (siccità e precipitazioni intense) sono più frequenti, composti e imprevedibili i Piani devono essere costruiti con strumenti, matrici e scenari che testano lo stress del sistema, attraverso analisi di sensitività e approcci basati su opzioni realistiche per decidere quando, come e quanto investire in capacità addizionale e flessibilità (Asghari et alii, 2023; Coccia, Cipolletti and Corvaro, 2024). L'uso del digital twin urbano che integra idraulica, qualità dell'aria, microclima ed energia può consentire di valutare ex ante gli effetti di reti duali, bacini di quartiere e NbS, al pari degli impatti sulle isole di calore urbane e sui carichi di raffrescamento; al contempo la digitalizzazione del ciclo idrico – con sensori, ICT e IoT – può abilitare il paradigma della 'water-smart city', nella quale i dati in tempo reale connettono gestione idraulica, qualità e manutenzione predittiva. La dimensione interscalare diventa così parte integrante della pianificazione proattiva, strutturando sinergie fra opere alla scala di bacino, città, quartiere ed edificio (Bertilsson et alii, 2019; Oberascher et alii, 2022).

Benché le città metropolitane abbiano ancora bisogno di sistemi centralizzati per beneficiare delle economie di scala, l'ibridazione con soluzioni decentralizzate di quartiere, di isolato o di edificio può ridurre la dipendenza da un numero ridotto di dorsali, distribuire lo stress idrico della rete e rendere meno oneroso l'adeguamento a standard richiesti dall'attuale emergenza idrico-climatica. Moduli plug-and-play e sensori, al pari di una gestione adattiva capace di incorporare scenari multipli e correzioni iterative – come proposto nei modelli di transizione della governance dell'acqua illustrati da Pahl-Wostl (2007) – consentono di affrontare la 'nuova normalità' reindirizzando i flussi, isolando i guasti e imparando dagli errori, caratteristiche tipiche della resilienza che si traduce in antifragilità.

Sotto il profilo analitico, accanto alle matrici qualitative e alle checklist orientate al governo del rischio, non possono essere trascurate le stime della ritenzione areale, dell'incremento di evapotraspirazione e della riduzione delle temperature di aria e suolo nelle ore critiche, a supporto della modellazione idrologica e termo-radiativa; negli ultimi anni si è poi affermata la Global Resilience Analysis, che valuta la risposta della rete di distribuzione a molteplici scenari di guasto con metriche sintetiche di





Fig. 8 | Yanweizhou Park in Jinhua City (China): the park during the monsoon season and at other times; the upper image illustrates the project's resilience to flooding and the preservation of connections across the bridge (source: hashchand.wordpress.com).

Fig. 9 | Zhoukou (China): the public park utilises the natural topography of its surroundings to foster a water-resilient landscape while drawing on historical Chinese narratives and traditions (credit: Turenscape).



Fig. 10 | Qian'an (China): part of a national pilot program for 'sponge city' development since 2015; the natural pond aids in retaining rainfall within the ecological corridor (credit: Mu Yu / Xinhua via Getty Images).

funzionalità residua e tempi di ripresa (Diao et alii, 2016). L'insieme di tali strumenti, se integrati in un ciclo di pianificazione / esercizio / apprendimento, consente di testare sotto stress configurazioni alternative e di calibrare il livello ottimale di ridondanza.

A livello urbano-territoriale indici compositi di resilienza supportano la localizzazione di infrastrutture blu e verdi e la priorità degli interventi (Bertilsson et alii, 2019), mentre framework con validazione degli stakeholder aiutano a riconoscere il contributo delle NbS alla resilienza funzionale e alla capacità adattiva (Beceiro, Brito and Galvão, 2020): la loro adozione come infrastruttura di servizio (Corradi et alii, 2024) consente di raggiungere contemporaneamente gli obiettivi idrici, energetici e climatici dell'Agenda 2030 all'interno di un'unica matrice valutativa, rendendo tracciabili e verificabili le prestazioni nel tempo (Kabisch et alii, 2017; Dumitru and Wendling, 2021; IPCC, 2023b). In tale chiave il passaggio da standard prescrittivi a prestazionali permette di innovare soluzioni e responsabilizzare gli attori, mantenendo la coerenza con obiettivi di sicurezza sanitaria e ambientale.

Non è infine da trascurare che le infrastrutture idriche urbane sono soprattutto sistemi socio-tecnici poiché alle componenti fisiche (impianti, reti, bacini di accumulo, ecc.) si affiancano norme, processi, pratiche e comportamenti: la resilienza del sistema idrico dipende infatti anche da procedure, ruoli, interoperabilità e capacità di coordinare attori – cittadini, politici, tecnici comunali, gestori di rete idrica ed elettrica, protezione civile e pianificatori – prima, durante e dopo l'evento (Vercruysse, Dawson and Wright, 2019).

Rilevanti in tal senso sono i percorsi di accettabilità del riuso da parte degli utenti e le modalità di governance che coinvolgono i cittadini: l'alfabetizzazione sul valore dell'acqua e sulla disponibilità idrica e la trasparenza della comunicazione e delle procedure di trattamento / riuso, al pari di programmi di gestione responsabile di quartiere, riducono la distanza fra utenti e sistema tecnico ottimizzando efficienza del sistema idrico, manutenzione diffusa, controllo predittivo e rapidità di risposta a condizioni metereologiche estreme (Luan, 2010; Tortajada, 2006). Tutti questi fattori consolidano nel tempo l'efficacia delle misure e ne riducono i costi 'operativi' (Dumitru and Wendling, 2021; Dieperink et alii, 2023); in tal modo l'infrastruttura non è da leggersi come apparato impiantistico ma come 'istituzione urbana' la cui resilienza riflette la qualità delle relazioni sociali che la sostengono.

Un tale approccio olistico richiede tuttavia che gli strumenti previsionali siano connessi anche a metriche di servizio ecosistemico e a indicatori di giustizia ambientale e sociale, così da orientare decisioni eque, sequenziali e reversibili, soprattutto per garantire misure di accessibilità e distribuzione dei co-benefici ai gruppi sociali più vulnerabili (Gómez Martín et alii, 2020). L'insieme di tali metriche e indicatori consente di evitare una 'ottimizzazione parziale' – tipica di scenari che massimizzano la sicurezza idrica scaricando gli impatti negativi sull'ecosistema o su specifiche comunità – e caratterizza una pianificazione proattiva e adattiva in cui le NbS rappresentano delle 'soluzioni scalabili' e le comunità divengono parte attiva nella resilienza del sistema idrico.

In sintesi è possibile affermare che una pianificazione proattiva dell'approvvigionamento idrico urbano in condizioni di variabilità e incertezza climatica richiede una convergenza di metodi (olistici e sistemici, qualitativi e quantitativi), soluzioni (decentrate e ibride, al pari di grigie, verdi e blu), tecnologie (tradizionali e digitali) e governance (interoperabili, prestazionali, copartecipate), orientati a generare resilienza / sostenibilità / antifragilità e co-benefici tra i sistemi acqua, energia e cibo. In assenza di questa convergenza, sostenuta da un robusto impianto valutativo e da una solida integrazione interscalare, gli interventi finiscono per consolidare disuguaglianze e per risultare meno efficaci nei periodi di prolungata siccità e di abbondanti precipitazioni.

Non mancano certo limiti e barriere di tipo tecnico, economico e gestionale che possono frenare una pianificazione proattiva in chiave olistica. Trasformare il tempo in variabile di progetto richiede modelli idro-climatici a una risoluzione più alta di quella IPCC attualmente disponibile (IPCC, Lee and Romero, 2023) i cui margini di incertezza sono an-

cora troppo ampi per supportare ingenti investimenti sulle infrastrutture blu e verdi (Panduro, Nainggolan and Zandersen, 2024); ne deriva una condizione di 'paralysis-by-analysis', ovvero di pianificazioni sospese in attesa di 'dati certi' che si somma al disallineamento tra l'immediatezza dei costi necessari per la realizzazione dei gemelli digitali e il lontano orizzonte temporale in cui si vedranno i benefici degli investimenti (Chen et alii, 2024).

Sul versante amministrativo invece l'opportunità di integrare le scale di bacino, città, quartiere ed edificio richiede nuove figure professionali e piattaforme dati condivise, oggi non disponibili, per le quali si potrebbero aprire problemi di sicurezza anche in relazione alle crescenti attività di hackeraggio. Infine è particolarmente difficile intervenire sulla percezione pubblica del rischio idrico che resta piuttosto bassa nelle comunità dove non si sono verificati eventi estremi recenti (Pacific Institute, 2024).

Le criticità tecniche, economiche e sociali delineate, al pari delle stesse incertezze climatiche che oggi complicano la pianificazione, offrono un potente stimolo a innovare la scienza dei dati ambientali ad alta risoluzione e la convergenza tra tecnologie digitali e ingegneria idraulica, aprendo a inedite alleanze pubblico-private per la gestione condivisa del rischio, ma soprattutto invitano le città a riappropriarsi del proprio capitale idrico come bene comune strategico. Se assunte come motore di cambiamento, le barriere odierne possono tradursi in cinque opportunità immediate (Figg. 15, 16):
1) Rafforzare i partenariati tra Università, gestori e start-up digitali per colmare rapidamente il gap di competenze sulle tecnologie digitali in generale e su gemelli digitali e cybersicurezza in particolare;
2) Valorizzare i benefici 'invisibili', integrando indicatori sociali, ecosistemici e di salute nelle analisi costi / benefici per liberare nuove risorse di finanziamento sul cambiamento climatico;
3) Sperimentare in piccolo per scalare in grande, attraverso Living Labs di quartiere che testino moduli plug-and-play, reti duali e NbS, riducendo il rischio pubblico degli investimenti su vasta scala;
4) Incentivare la partecipazione civica attraverso programmi di alfabetizzazione con coinvolgimento emotivo e tariffe premianti che trasformino gli utenti in co-gestori del sistema, moltiplicando i punti di controllo distribuiti;
5) Allineare gli orizzonti temporali attraverso fondi a rotazione e contratti basati sulle prestazioni per collegare i ritorni economici di breve periodo (riduzione perdite, efficienza energetica) con i benefici di lungo termine (robustezza e equità).

Con questa agenda la pianificazione proattiva può passare dal piano teorico all'operatività condivisa: dati sempre più accurati, istituzioni che cooperano, cittadini attivi come co-gestori e infrastrutture capaci di apprendere possono rendere la 'nuova normalità' climatica non più una minaccia da subire, ma il terreno fertile su cui costruire insieme città idricamente sicure, energeticamente efficienti e socialmente inclusive.

Buone pratiche di città circolari | Il ciclo circolare dell'acqua acquista pieno significato quando lo si osserva attraverso le buone pratiche, pertanto a seguire vengono presentate con approccio critico cinque città che, con strategie diverse, hanno già fatto di resilienza, sostenibilità e antifragilità un esercizio quotidiano di progetto e in cui il riuso circolare dell'acqua è diventato motore di trasformazioni sociali, mostrando come la stessa grammatica delle 4R possa essere interpretata in modi diversi a seconda del clima, del contesto e dell'immaginario collettivo. I casi studio sono stati selezionati applicando tre filtri. In primo luogo l'integrazione acqua / energia / cibo: ogni città collega il ciclo idrico a flussi energetici e/o alimentari, superando la logica dell'intervento monofunzionale. In secondo luogo la misurabilità dei risultati, cioè la disponibilità di dati peer-reviewed su portate riutilizzate, energia, nutrienti recuperati e benefici climatici, condizione indispensabile per un metabolismo urbano 'autopoietico' e per valutare la trasferibilità delle soluzioni adottate. Infine la diversità climatica e istituzionale: dal clima tropico umido di Singapore a quello sub-oceanico e temperato di Amsterdam, dal clima mediterraneo di Milano fino a quelli semi-aridi di Adelaide e Los Angeles, così da testare la trasferibilità delle strategie in contesti climatici, normativi e culturali differenti.

Singapore, considerata il laboratorio mondiale del riuso potabile indiretto (Tortajada, 2006; Figg. 17, 18), copre il proprio fabbisogno d'acqua in parte da bacini locali, in parte da importazioni, desalinizzazione e riciclo, l'ultimo dei quali copre il 40% della domanda. L'energia impiegata nel processo di riciclo è scesa negli ultimi anni da 3,5 a 2,8 kWh/mc, grazie a membrane a osmosi a recupero di pressione e a micro-turbine installate sulle linee principali, e il calore di scarto delle condotte viene convogliato, tramite scambiatori in titanio, agli impianti di produzione idroponica in prossimità dell'aeroporto di Changi (Fig. 19): 14.000 mq di colture fuori suolo producono una tonnellata al giorno di ortaggi per la filiera del catering aeroportuale, riducendo l'impatto ambientale dei voli a lunga tratta. Il gemello digitale Pulse-Net gestisce in tempo reale la portata, la qualità, la temperatura e la domanda delle serre, permettendo di deviare i flussi delle acque in base ai picchi di traffico aereo e alle previsioni meteo monsoniche.

Amsterdam ha realizzato il ciclo acqua / acque reflue / superfici marine grazie alla strategia Blue Doughnut che mira a trattenere in città la maggior quantità d'acqua possibile (Doughnut Economics Action Lab, 2020). I canali, che sono parte integrante del paesaggio, diventano batterie termiche per la rete di teleriscaldamento a 14 °C, alimentando edifici NZEB nella Climate Street (Figg. 20, 21). L'impianto di trattamento delle acque di Westpoort, riconvertito a bilancio energetico positivo, produce struvite e ammonio solfato che vanno a nutrire le serre peri-urbane, riducendo l'import di fertilizzanti sintetici del 12%. Con l'avvio del Digital Canal la Città di Amsterdam prevede di tagliare ulteriormente del 25% i consumi energetici e le emissioni di CO_2, programmando l'apertura delle chiuse e l'accensione delle pompe nelle stesse ore in cui i parchi eolici offshore riversano più elettricità a basso costo in rete.

A Milano il depuratore di Nosedo (Fig. 22) tratta 25.000 mc/h di reflui e dal 2019 uno scambiatore a piastre su condotta restituisce 9 MW termici al teleriscaldamento, coprendo il 18% del fabbisogno del quartiere (Mooren et alii, 2025). L'acqua trattata irriga 1.200 ha di risaie suburbane, garantendo 15 milioni di metricubi l'anno di risorsa che avrebbe altrimenti richiesto prelievi dal Naviglio (Fig. 23); il carico aggiuntivo di nutrienti copre il 30% del fabbisogno azotato, riducendo la necessità di fertilizzanti minerali. Il progetto Bosco Idrico ha esteso la strategia a 200 ha di corridoi verdi nel tessuto urbano: tetti blu-verdi stoccano la pioggia, evitano 1,8 milioni di metricubi di scarichi in fognatura e abbassano di circa 1,2 °C le temperature diurne estive nel raggio di 250 metri.

Los Angeles si è posta l'obiettivo di azzerare le importazioni di acqua entro il 2050. Hyperion, il più grande impianto di trattamento dei reflui degli Stati Uniti (Meilinger and Monstadt, 2025), sarà convertito per il riuso potabile diretto di 1,5 milioni di metricubi al giorno con un progetto che prevede l'estrazione di calore dai collettori principali per alimentare 18 food-hub idroponici in deserti alimentari periferici: 30.000 mq di serre forniranno 4.000 tonnellate di ortaggi freschi ogni anno, riducendo l'impronta idrica indiretta delle importazioni dalla Salinas Valley; in aggiunta tariffe progressive premieranno con sconti del 20% sulle bollette chi acquista prodotti dei food-hub.

Adelaide, nel clima semiarido del South Australia, ha realizzato nel 2008 un desalinizzatore da 100 milioni di metricubi l'anno. Per abbattere i costi energetici necessari al suo funzionamento il nuovo Piano 2030 prevede di ridurne l'uso al 30%, sostituendolo con una rete di corridoi fluviali, bacini di ricarica falda e reti duali per irrigazione. Il calore prodotto dall'impianto sarà recuperato e trasferito, tramite scambiatori in grafite, a 240 serre installate presso lo stesso litorale: l'evaporazione restituirà umidità e ridurrà di 15 °C la temperatura interna delle serre orticole (Vahedi, Ledari and Fani, 2025), mentre l'energia solare alimenterà le pompe ad alta pressione, chiudendo il bilancio energetico quasi a zero.

Osservati in sequenza i cinque casi offrono un mosaico di soluzioni circolari la cui trasferibilità è tuttavia limitata a contesti con caratteristiche similari. Il paradigma di Singapore, per esempio, si fonda su un apparato normativo che consente il riuso potabile indiretto grazie a un'Agenzia nazionale unica e a un brand pubblico – NEWater – costruito in vent'anni di campagne finalizzate a creare fiducia nel consumatore. Trasferire questo modello in altre metropoli 'istituzionalmente frammentate' significa affrontare la 'sfida del coordinamento' fra i gestori delle reti idrica ed energetica e le autorità sanitarie.

Amsterdam ha la sua forza nella ramificata rete dei canali per cui le batterie termiche sono strettamente legate alla topografia fluviale che è parte integrante del tessuto urbano: dove questa rete manca la replicabilità è condizionata dalla realizzazione di corridoi idro-vegetali, con potenziali impatti su proprietà private e traffico veicolare.

Il depuratore di Nosedo è diventato una piccola 'raffineria urbana', ma se il risultato tecnico è eccellente, la trasferibilità del progetto incontra il limite di una strategia che funziona grazie alla prossimità fra impianto, quartiere e zona periurbana. Estendendo la rete in città il trasporto di calore perde efficienza e aumenta il carbonio incorporato delle nuove tubazioni, in parte compensabile con l'impiego di tubi in polietilene riciclato stabilizzato per le dorsali e di terminali mini-scambiatori di quartiere.

Il caso di Los Angeles rende evidente la dimensione socio-spaziale dell'intervento, tuttavia il riuso potabile diretto è leva di 'equità nutrizionale' solo se abita in prossimità dei 'food deserts'. Inoltre le tariffe agevolate pensate per incentivare l'acquisto degli ortaggi potrebbero produrre l'effetto di un maggior consumo di prodotto e quindi di consumo complessivo d'acqua da riciclo. Una trasferibilità in ambito urbano richiederebbe all'architettura di da-

re forma a un'inedita tipologia ibrida, un hub termico della produzione alimentare il cui involucro dovrebbe essere in grado di controllare l'umidità interna, garantire l'isolamento termico e offrire trasparenza alla luce diurna, così da limitare l'uso di lampade artificiali.

Infine il Piano 2030 deve ancora ottimizzare l'uso della salamoia (prodotta dalla dissalazione) come fonte di umidità per le serre lungo la costa poiché gli scambiatori in grafite che dovrebbero recuperarne il calore si corrodono rapidamente e la cristallizzazione del sale residuo richiede cicli di pulizia costosi, con un ritorno economico dell'impianto di circa vent'anni; in aree con meno irraggiamento solare l'intero schema diventerebbe antieconomico. Tra le soluzioni possibili, da testare con azioni di ricerca e protocolli di durabilità, per il riuso della salamoia si potrebbe immaginare un impiego per pavimentazioni o rivestimenti per facciate riflettenti: i cristalli di sale, che hanno un elevato albedo, potrebbero essere incapsulati in una matrice trasparente, riflettendo buona parte della radiazione solare e riducendo il surriscaldamento superficiale.

Le cinque buone pratiche esaminate mostrano che il ciclo acqua / energia / cibo può tradursi in architetture operative, ma rivelano anche quanto l'esito dipenda dal modo in cui gli elementi tecnici vengono 'messi in forma e a sistema' dentro il tessuto urbano. Il paradigma circolare non avanza per semplice sommatoria di soluzioni tecniche, ma richiede un salto di scala culturale che solo un progetto socio-spaziale può innescare.

Perché la circolarità idrica diventi pratica diffusa, l'architettura deve assumere un ruolo narrativo e politico che oggi manca ai tradizionali apparati tecnici. Il primo passo consiste nel trasformare l'infrastruttura in narrazione: i cittadini ripongono fiducia nel riciclo quando possono 'vederlo', non quando gli si chiede un atto di fede: percorsi e indicatori luminosi che scorrono lungo le tubazioni, al pari di display che mostrano in tempo reale quantità e parametri di qualità dell'acqua riciclata, sono solo alcune soluzioni che possono restituire una 'percezione di trasparenza' più efficace di qualsiasi diagramma tecnico di flusso.

In ambito urbano la materia di cui sono fatti i dispositivi per il ciclo circolare dell'acqua dovrebbe diventare la seconda voce narrativa. L'efficienza operativa non può prescindere infatti dal costo ambientale dei materiali: un chilometro di tubo d'acciaio può annullare il vantaggio energetico di uno scambiatore, mentre una dorsale pre-isolata in polietilene riciclato o una vasca in calcestruzzo geopolimerico restituisce lo stesso servizio riducendo della metà l'impronta di carbonio incorporato: la poetica costruttiva deve dunque tenere insieme prestazione, ciclo vita e immaginario tattile.

Il progetto di architettura è chiamato anche a produrre tipologie ibride nelle quali la separazione tra infrastruttura e spazio pubblico si dissolve; serre-mercato che ospitano produzione agricola e luoghi di socializzazione, canali-percorsi pedonali che raffrescano i quartieri in estate e ospitano mobilità dolce e depuratori-parco in cui le vasche diventano specchi d'acqua scenografici mostrano una circolarità visibile e, di conseguenza, politicamente solida e socialmente accettabile: solo se l'infrastruttura entra nell'immaginario, le barriere politiche e comportamentali si ridurranno.

Il progetto deve fondarsi inoltre sul requisito della reversibilità: clima, alimentazione e standard normativi mutano più rapidamente del ciclo vita delle opere e soltanto i sistemi modulari e gli scambiatori plug-in possono ridurre i margini di vincolo consentendo di riallocare funzioni ed eliminare le demolizioni da smaltire. In questo quadro rimane poi da affrontare il tema della governance che non può trascurare gli incentivi all'azione: i Piani attuativi potrebbero incentivare l'impiego di sistemi attraverso, ad esempio, premialità volumetriche per chi realizza tetti blu-verdi collegati a reti duali o sgravi sugli oneri di urbanizzazione per chi prevede serre idroponiche.

In definitiva il successo dell'economia circolare dell'acqua non si giocherà sulle prestazioni di una membrana, ma sulla capacità di elaborare vere e proprie 'idromorfologie', forme spaziali, sistemi, interfacce e materiali che rendano il ciclo dell'acqua percepibile, desiderabile e adattabile: non si tratta di valorizzare un brevetto tecnologico, ma di rivendicare un'autorialità progettuale capace di trasformare condotte e serbatoi, oggi nascosti, in nuovi paesaggi condivisi attraverso il riconoscimento delle 4R come parte della identità culturale di una comunità.

Le città temperate come possibili nodi di raffrescamento di una rete mondiale | I casi studio esaminati mostrano che quando il riuso idrico diventa parte integrante del metabolismo urbano la città acquisisce una nuova 'funzione-ecosistemica': non più soltanto luogo di consumo e smaltimento, ma vero e proprio 'reattore termodinamico'. Se questo cambio di paradigma vale alla scala locale, la sfida è sviluppare migliaia di 'reattori' simili – distribuiti fra latitudini, zone climatiche e culture diverse – in una rete di raffrescamento planetaria affinché l'effetto mitigativo non resti confinato entro il perimetro amministrativo delle città, ma contribuisca a riequilibrare gradienti termici e cicli idrologici regionali alterati. La nozione di 'città temperata' nasce da questa esigenza di scala intermedia: designare gli agglomerati urbani come 'nodi attivi' di scambio acqua / energia / cibo dotati di autonomia locale, ma connessi a livello globale.

Le città sono diventate il vero termometro delle principali cause della crisi climatica globale: ondate di calore e precipitazioni intense si verificano sempre più frequentemente, anticipandoci come tra alcuni decenni sarà la nostra quotidianità. A Vienna la temperatura media è passata dai 9,27 °C del decennio 1955-1964 agli 11,97 °C del decennio

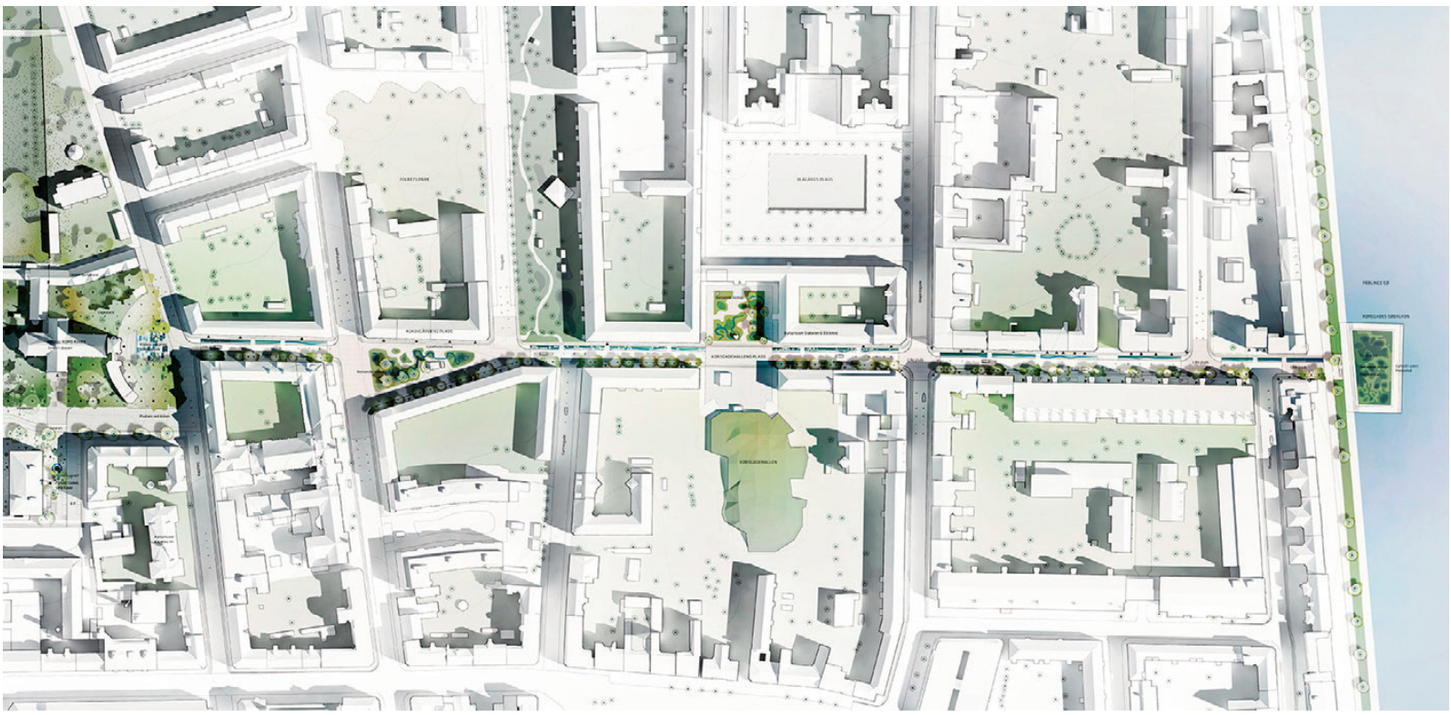


Fig. 11 | Korsgade Street Plan (source: SLA studio).





Figg. 12, 13 | Hans Tavsens' Park in Copenhagen's Nørrebro district is undergoing climate adaptation renovations aimed at retaining and slowing rainwater flow during extreme weather events (credits: SLA studio).

2014-2023[7], i giorni con oltre 30 gradi sono passati da 9,4 a 29,6[8] mentre le notti tropicali rilevate presso l'Austrian Central Institute for Meteorology and Geodynamics (alla periferia di Vienna) sono passate da 1,25 a 8,9 fino ad arrivare, a causa dell'effetto isola di calore, a 40,5 nel periodo 2017-2024 al centro di Vienna[9]; in Germania il differenziale termico fra zone urbane e rurali ha raggiunto i 10 °C, il doppio rispetto al 1982 (Fischer, 2022)

Situazioni simili sono riscontrabili anche in altre aree geografiche del Nord Europa, mentre nelle zone con climi mediterranei le criticità climatiche si sommano a quelle della disponibilità idrica che agiscono come moltiplicatore di rischio, soprattutto in ampie zone dell'Italia meridionale e della Spagna, minacciate da fenomeni di desertificazione che mettono a rischio l'agricoltura[10]. Affrontare l'una senza l'altra è inefficace e costa anche in termini di vite umane (Ballester et alii, 2023).

Proiettando al 2100 l'attuale tendenza delle emissioni di gas climalteranti l'IPCC prevede un aumento della temperatura media globale a circa 4,5 °C (IPCC, Lee and Romero, 2023); negli insediamenti urbani più densamente popolati tale incremento di temperatura si traduce in ondate di calore più lunghe, stress idrico cronico, blackout energetici e maggiore mortalità 'dovuta al caldo', che in Europa ha già superato le 175.000 vittime annue[11]. Se da un lato i centri urbani sono la maggiore causa dei cambiamenti climatici, dall'altro rappresentano un'importante leva per fronteggiarli, offrendo stimolanti opportunità grazie a infrastrutture blu e verdi, regimentazione delle acque piovane, disponibilità di acque reflue e reti sociali. Da qui la tesi che le città possano essere trasformate in 'nodi di raffreddamento' di una rete mondiale, capaci di mitigare le isole di calore urbane e attenuare le condizioni estreme regionali.

Tale tesi è fondata innanzitutto sul fatto che attualmente nei centri urbani vi è una scarsa presenza di vegetazione e di corpi idrici di superficie, che riducono notevolmente l'effetto di raffrescamento dell'evaporazione, e che le superfici costruite (strade e parcheggi, coperture e facciate), spesso prive di ombreggiatura, assorbono la radiazione solare di giorno e la rilasciano come calore sensibile di notte, con un incremento termico che può raggiungere anche 8-10 °C rispetto alle zone rurali circostanti (Stewart and Oke, 2012): in teoria ogni città dispone di una 'batteria termica' che può essere scaricata e ricaricata in continuo.

Altro elemento che fonda la tesi è legato alla morfologia urbana: in un singolo isolato compatto si concentrano migliaia di metri quadrati di superfici (strade e parcheggi, coperture e facciate) che potenzialmente possono ospitare vegetazione, rivestimenti riflettenti o dispositivi evaporativi. Una tale densità costruita si somma a una densità di flussi idrici altrettanto elevata: ogni giorno la città produce reflui termicamente carichi che, se trattati e deviati verso infrastrutture verdi, alberature e corpi idrici, possono supportare l'evapotraspirazione anche in regime di siccità, proteggendo al contempo la risorsa potabile. L'effetto congiunto di queste due disponibilità – superficie orizzontale e verticale del costruito e acqua 'di riciclo' – può produrre benefici e ricadute sanitarie ed economiche non trascurabili: recenti modellazioni indicano che una riduzione di appena 2 °C della temperatura media estiva in ambito urbano ha il potenziale da un lato di abbassare la mortalità cardiovascolare di circa il 7%, dall'altro di accrescere la produttività dei lavoratori fino al 5% annuo (ILO, 2019).

Altre simulazioni condotte su metropoli europee mostrano che se tutte le coperture fossero convertite in tetti verdi irrigati l'intensità media dell'isola di calore si ridurrebbe di un valore variabile tra 0,7 e 1,2 °C (Spyrou et alii, 2024); altre ancora mostrano che bacini d'acqua di media dimensione, in particolari condizioni di contesto, possono abbassare la temperatura superficiale diurna fino a 3-4 °C in un raggio di 500-800 metri (Sun et alii, 2012). Il potenziale mitigativo di scala dei centri urbani è quindi notevole se consideriamo che nel 1975 coprivano l'1% della superficie terrestre e nel 2015 tale percentuale è aumentata all'1,5% (JRC, 2020).

La logica termodinamica che sorregge la tesi di trasformare le città in 'nodi di raffrescamento' parte dalla constatazione che la biomassa urbana può convertire il calore sensibile accumulato dal costruito in flussi di vapore latente, purché sia irrigato con continuità: un albero stressato non produce evapotraspirazione, perde precocemente le foglie, diventa vulnerabile a vari patogeni e l'ombra prodotta non è sufficiente a mitigare la temperatura di superficie; di contro un esemplare maturo ben irrigato, a seconda della specie, in una giornata estiva calda può funzionare da pompa frigorifera naturale, producendo un'evapotraspirazione da 500 a 2.000 litri.[12]

Assumendo il calore latente di vaporizzazione pari a 2,45 MJ/kg (Allen et alii, 1988), un platano di grandi dimensioni può sottrarre fino a 5 GJ giorna-



Fig. 14 | The IABR-Project Atelier Rotterdam examined how the urban metabolism framework could support sustainable city development; nine essential flows were identified: goods, people, waste, biota, energy, food, fresh water, air, sand and clay (credit: IABR, 2014).

lieri a un'atmosfera urbana secca, un valore paragonabile al fabbisogno di raffrescamento di decine di appartamenti. Inoltre la sua ombra ne amplifica l'effetto sulla superficie di strade asfaltate e marciapiedi cementati, abbassandone la temperatura di circa 20 °C ed evitando che si raggiungano picchi di 60-70 °C che vengono poi rilasciati di notte (Kaluarachichi, Tjoelker e Pfautsch, 2020). È da rilevare che esistono anche specie che richiedono poca acqua e che sono capaci di fornire comunque ombra, ma producono un'evapotraspirazione più modesta, riducendo l'efficacia di raffrescamento proprio nei periodi caldi e secchi.

Per sostenere questi flussi in un clima sempre più arido occorre tuttavia disaccoppiare l'irrigazione del verde dall'acqua potabile, attingendo alle acque reflue depurate. Il caso di studio di Tijuana (Garcia et alii, 2022) dimostra la fattibilità tecnica e sanitaria di questo approccio: in una 'città dei 15 minuti' ciò significa realizzare micro-impianti decentralizzati di trattamento delle acque in corrispondenza di edifici, isolati o quartieri, convogliando l'effluente verso filari di alberi, pergolati e micro zone umide su strada; la stessa rete può essere implementata con la fitodepurazione sui tetti verdi (Fig. 24).

Al livello intermedio della sezione stradale, dove la densità infrastrutturale impedisce spesso nuove alberature a radice profonda, il sistema termodinamico può essere integrato con pergolati vegetali a sviluppo orizzontale: le piante rampicanti raggiungono rapidamente un'elevata superficie fogliare, garantendo una schermatura solare continua e una quota significativa di evapotraspirazione (Fig. 25). Nelle ore di insolazione massima la canopia orizzontale riduce il flusso termico anche sui fronti edilizi, limitando l'assorbimento murario e abbassando la temperatura radiante percepita dai pedoni (Jareemit and Srivanit, 2022); ne deriva un guadagno diretto in salute pubblica perché il carico calorico metabolico, che cala di decine di watt per persona, si traduce in minore incidenza di colpi di calore e stress cardiovascolare, in linea con le stime di riduzione di mortalità menzionate dall'IPCC (IPCC, Lee and Romero, 2023).

Il terzo livello, quello dei tetti, è altrettanto cruciale per ottimizzare l'efficienza della 'batteria termica'. Le coperture piane tradizionali possono abbandonare il loro ruolo passivo di accumulatori termici (con punte fino a 25 MJ/mq in una giornata estiva, in clima mediterraneo) per diventare attive nella regolazione microclimatica e nella produzione agricola con coltivazioni aeroponiche (Fig. 26), la cui irrigazione efficiente richiede solo 1/10 dell'acqua rispetto a sistemi tradizionali. Misure sperimentali indicano che la differenza di temperatura tra la superficie di un tetto verde irrigato e quella di una copertura tradizionale adiacente può raggiungere gli 8 °C nelle ore di picco (Rahman et alii, 2022), ampliando ulteriormente l'effetto di raffrescamento.

I benefici sono quindi di duplice ordine perché da un lato si sostituisce una superficie con capacità termica elevata e albedo basso con una matrice vegetata ad alto albedo e dissipazione latente, dall'altro si genera cibo locale con un'impronta idrica quasi nulla. L'efficienza di un sistema aeroponico ben progettato è documentata da AeroFarms che nel suo impianto a Newark (New Jersey) sostiene di utilizzare il 95% di acqua in meno rispetto a un'azienda agricola tradizionale[13]. Anche l'esperienza parigina di Agripolis dimostra la scalabilità commerciale di un progetto che prevede di riconvertire le coperture di uno dei maggiori complessi espositivi nel 15° arrondissement, il Paris Expo Porte de Versailles, con 14.000 mq di orto idroponico capace di produrre circa 1.000 kg di frutta e verdura ogni giorno.[14]

Uno studio condotto a Bologna ha inoltre stimato che se si sfruttassero tutti i tetti piani disponibili la città potrebbe coprire fino al 77% del proprio fabbisogno annuo di ortaggi freschi, confermando così il potenziale di scala della coltivazione in quota (Wilson, 2023). In generale, con una resa di circa 70 kg/mq annui, un chilometro quadrato di tetti coltivati potrebbe soddisfare il fabbisogno di 100 mila residenti riducendo drasticamente le emissioni di CO_2 dovute al trasporto; è infine ipotizzabile che con la progressiva robotizzazione della produzione orticoltura si possano ridurre i costi di raccolta e di gestione e aumentare ulteriormente la resa per unità di superficie[15]. Dal punto di vista termico ogni litro d'acqua atomizzata nel sistema aeroponico asporta 0,68 kWh di calore latente; se soltanto il 30% del refluo urbano di un quartiere venisse trattato e impiegato sui tetti si potrebbero sottrarre all'atmosfera decine di megawatt durante le ore di punta, decongestionando la rete elettrica e limitando l'uso degli impianti di condizionamento.

Esiste poi un quarto dispositivo climatico potente, quello dei corpi idrici urbani (laghi, fiumi, specchi d'acqua, ecc.), che tratteremo nel paragrafo successivo. L'acqua, grazie alla sua elevata capacità termica e all'evaporazione continua, assorbe calore durante i picchi diurno-estivi e lo cede gradualmen-

te dopo il tramonto, attenuando le minime notturne che alimentano le isole di calore.

Studi recenti documentano che bacini idrici di superficie variabile tra 1 e 3 ettari possono abbassare la temperatura dell'aria di circa 3 °C nelle ore calde e di oltre 1 °C di notte, estendendo il beneficio termico fino a 600-800 metri dal margine; l'intensità dell'effetto dipende da dimensione, geometria, e profondità del corpo idrico, ma anche dalla tipologia di suolo e di vegetazione al contorno (Yu et alii, 2020); inoltre fasce di vegetazione igrofila su zattere galleggianti possono ampliare la superficie evapotraspirante, creando corridoi di ventilazione naturale orientati sui venti prevalenti e incrementando la biodiversità. Le prestazioni dei corpi idrici possono essere implementate anche con dispositivi tecnologici 'intelligenti': sensori di livello e qualità, gestiti con logiche basate sulle previsioni, possono collegarsi con tetti blu-verdi per modulare i deflussi e massimizzare la capacità di laminazione durante gli eventi meteo severi (Busker et alii, 2022). Sul fronte energetico i corpi idrici possono anche ospitare moduli fotovoltaici galleggianti, favorendo un ombreggiamento che può ridurre l'evaporazione fino al 90% e producendo elettricità rinnovabile senza consumo di suolo (Rahaman et alii, 2025).

Accogliere i corpi idrici come quarto livello non aggiunge semplicemente un nuovo tassello al mosaico urbano, ma sovverte il paradigma stesso della progettazione climatica: con un 'sistema di raffrescamento 4D' – tridimensionale nello spazio e programmabile nel tempo – la città cessa di essere una superficie passiva[16] da mitigare e diventa un enorme scambiatore termico. Il risultato non è una somma di dispositivi blu e verdi, ma una rete metabolica che modula temperatura, umidità e luce: in questa prospettiva la sfida non è più 'aggiungere' ma 'progettare scenari operativi' – idraulici, vegetazionali, digitali e sociali – capaci di far dialogare fra loro i quattro livelli blu-verdi lungo le tre dimensioni spaziali e la variabile tempo del clima urbano, anticipando l'evento estremo anziché inseguirlo.

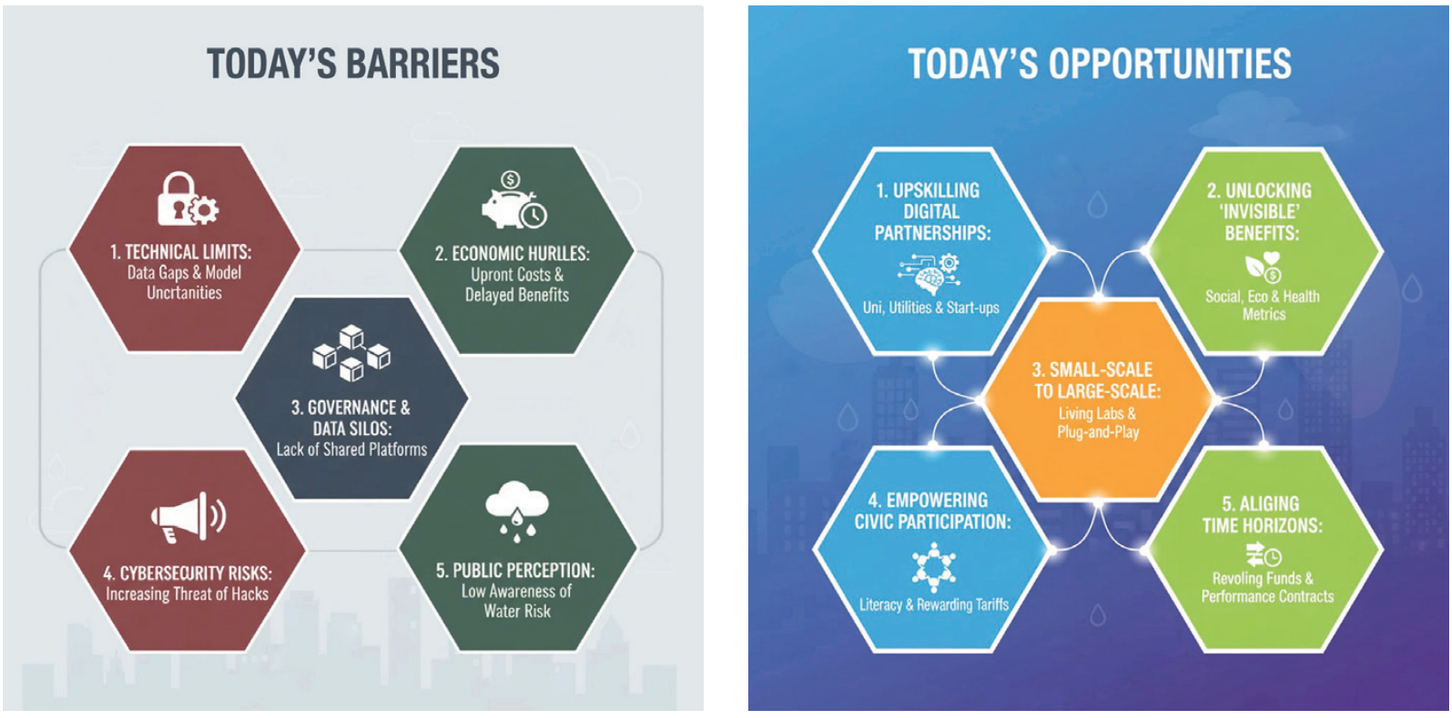
La sinergia operativa dei quattro livelli – corpi idrici, alberi su strada, pergolati a quota intermedia e coltivazioni aeroponiche sui tetti – configura una rete ecologica multidimensionale (blu e verde) di scambi termici che converte l'isola di calore in fonte di raffrescamento per le città. La simbiosi tra superficie fogliare e approvvigionamento idrico da riciclo può costituire il perno di una rigenerazione morfologica dell'ambiente costruito. La densità urbana, tradizionalmente considerata un moltiplicatore del rischio calore (Tucci, Altamura and Pani, 2023; Gourfi et alii, 2022), viene riletta come un'opportunità di concentrare interventi ad alto impatto: migliaia di metri quadrati di tetti, facciate, strade e parcheggi diventano il supporto fisico per una rete di raffrescamento multilivello.

Allo stesso tempo il potenziale di stoccaggio carbonico della biomassa, l'assorbimento di polveri sottili, la riduzione dei flussi piovani non regimentati e la creazione di habitat per impollinatori concorrono agli obiettivi di neutralità climatica e biodiversità richiesti dal Regolamento dell'Unione Europea sul Nature Restoration (European Parliament and Council of the European Union, 2024). Economicamente il modello esposto si autofinanzia parzialmente: la produzione orticola di un tetto come quello del Paris Expo Porte de Versailles può generare un fatturato superiore al milione di euro annuo a fronte di un investimento di circa 200 €/mq, mentre i risparmi sanitari ed energetici ricadono sulla comunità in forma di minori costi pubblici. La co-localizzazione di produzione alimentare, spazi ricreativi ombreggiati e corridoi pedonali-ciclabili riduce la necessità di trasporto motorizzato e restituisce qualità di vita ai residenti, consolidando il modello della 'città dei 15 minuti' che coincide con quella della 'città temperata', dove prossimità e densità sono bilanciate da un comfort termico garantito dai processi ecologici.

Con questa infrastruttura integrata la città cessa di essere una delle principali cause del cambiamento climatico; la città 'impermeabile' diventa 'spugna evaporativa' e la 'batteria termica' urbana da problema diventa parte della soluzione: bacini idrici, alberi, pergolati e tetti con coltivazioni aeroponiche e fitodepurazioni costituiscono un nesso circolare acqua / energia / cibo che trasforma le aree urbane in nodi attivi e resilienti, veri polmoni blu-verdi-alimentari capaci di mitigare il clima regionale, garantire servizi ecosistemici essenziali e migliorare la qualità della vita entro orizzonti di vivibilità di pochi minuti a piedi.

Il ruolo dei corpi idrici nella regolazione del clima e loro integrazione con la vegetazione | Affinché la 'città temperata' funzioni come nodo di raffrescamento di una rete planetaria occorre dotarla di superfici scambianti ad alta inerzia. In quest'ottica i corpi idrici – naturali o artificiali, lineari o puntuali – non sono semplici elementi estetici del paesaggio urbano, ma veri e propri accumulatori termici che combinano tre risorse chiave: volume d'acqua, superficie di evaporazione e capacità di stoccaggio temporaneo. Interconnessi a un tessuto verde irrigato con reflui depurati, i corpi idrici diventano il cuore pulsante del sistema di raffrescamento: prima ancora di essere specchi d'acqua sono dispositivi di temporizzazione climatica la cui efficacia risiede nella capacità di dialogare con le infrastrutture verdi al contorno (Figg. 27, 28).

In quest'ottica un'attenta pianificazione urbana dovrebbe realizzare corpi idrici artificiali e valorizzare



Figg. 15, 16 | On the left, five current barriers to proactive urban water planning are identified: technical limitations, economic obstacles, governance and data silos, cybersecurity risks, and poor public perception. On the right, immediate opportunities transform these barriers into levers for action: digital partnerships, leveraging 'invisible' benefits, small-scale experimentation for scaling up, incentivised civic participation, and alignment of time horizons (credits: C. Sposito, 2025).

quelli esistenti strutturando sinergie con le infrastrutture verdi, da un lato per aumentare la disponibilità di aree decentralizzate di stoccaggio dell'acqua, dall'altro per mitigare l'effetto isole di calore urbane, le cui cause principali sono attribuibili alle attività antropiche e alla concentrazione di infrastrutture che assorbono calore (Mortezazadeh, Jandaghian and Wang, 2021; Hayes et alii, 2022); queste ultime determinano l'aumento della domanda di energia per il raffrescamento indoor e comportano rischi significativi per la salute pubblica (Jandaghian and Akbari, 2021).

Per mitigare queste sfide sono stati condotti diversi studi che hanno esplorato il potenziale mitigativo dei corpi idrici attraverso meccanismi naturali quali il raffrescamento evaporativo e la convezione; in particolare Bowler et alii (2010), che hanno condotto una ricerca a Wuhan, hanno concluso che i bacini idrici possono ridurre le temperature superficiali diurne fino a 3 °C, estendendo gli effetti benefici fino a 800 m dal loro perimetro. Altri studi come quelli di Gunawardena, Wells e Kershaw (2016) hanno riscontrato che l'effetto di raffrescamento dei corpi idrici è più pronunciato entro 500 metri dal loro perimetro e diminuisce gradualmente oltre tale distanza, mentre quello di Sun et alii (2012) a Pechino riportano che le zone umide hanno effetti di raffrescamento significativi, potendo ridurre fino a 4 °C la temperatura dell'aria entro il raggio di un chilometro.

I diversi risultati dimostrano che l'efficienza del raffrescamento dei corpi idrici è influenzata da diversi fattori tra cui la loro dimensione, profondità e forma, le condizioni climatiche, la direzione e l'intensità dei venti e la natura dei suoli circostanti (Fig. 29). Corpi idrici più grandi producono generalmente effetti di raffrescamento maggiori grazie all'ampia superficie che favorisce un maggiore assorbimento del calore e una più alta evaporazione. Du et alii (2016) hanno scoperto che i laghi di Shanghai hanno un impatto di raffrescamento più elevato rispetto ai fiumi, con riduzioni medie della temperatura dell'aria di 3,3 °C per i laghi e di 2,3 °C per i fiumi; lo studio ha anche evidenziato che oltre alle dimensioni anche la profondità dei corpi idrici influenza la temperatura dell'aria e della superficie terrestre nell'intorno.

Jandaghian e Colombo (2024) riportano diversi studi secondo i quali i laghi più profondi nelle aree urbane forniscono un raffrescamento più prolungato rispetto a corpi idrici poco profondi perché, grazie alla maggiore inerzia termica, possono immagazzinare più calore e rilasciarlo gradualmente, in particolare durante la notte. Inoltre, grazie alla loro profondità, i corpi idrici più profondi subiscono variazioni di temperatura meno elevate tra il giorno e la notte (Gill et alii, 2007): questa caratteristica contribuisce a mantenere un microclima più fresco nell'area circostante poiché il rilascio graduale di calore impedisce bruschi aumenti delle temperature notturne (Jacobs et alii, 2020), fattore che risulta particolarmente vantaggioso nelle aree urbane in cui la temperatura notturna si mantiene elevata (Zhao et alii, 2018).

Anche la configurazione geometrica dei corpi idrici gioca un ruolo cruciale: secondo lo studio di Sun e Chen (2012) gli elementi di forma regolare, circolare o quadrata, tendono a fornire un raffrescamento più uniforme in tutte le direzioni rispetto a quelli di forma irregolare. Un'altra ricerca condotta da Sun et alii (2012) a Pechino ha dimostrato che anche le zone umide hanno effetti di raffrescamento significativi, segnalando che la temperatura dell'aria entro un chilometro dal loro perimetro poteva ridursi fino a 4 °C.

Le condizioni climatiche influiscono in egual modo sugli effetti del raffrescamento dei corpi idrici e tra questi, a titolo esemplificativo, l'umidità, i venti e la temperatura ambiente. Nei climi caldi e aridi l'effetto di raffrescamento è in genere più pronunciato grazie a un'evaporazione più veloce, mentre nei climi umidi può essere meno significativo poiché l'elevato contenuto di umidità nell'aria inibisce l'evaporazione. Uno studio condotto su Vancouver da Kokkonen et alii (2018) ha dimostrato che i corpi idrici urbani forniscono un raffrescamento rilevante durante i mesi estivi caldi e secchi, mentre il beneficio diminuisce durante la stagione invernale più umida.

L'effetto mitigativo è particolarmente apprezzabile durante le ondate di calore, determinando un microclima locale più confortevole; l'effetto rinfrescante nei climi mediterranei è spesso più evidente durante il giorno, poiché il contrasto tra l'aria calda e la superficie dell'acqua più fresca contribuisce a moderare le temperature diurne, mentre di notte è più pronunciato nei climi aridi. Comprendere il comportamento dei corpi idrici nelle diverse zone climatiche è fondamentale per ottimizzare la loro progettazione e collocazione in ambito urbano al fine di massimizzarne il potenziale di raffrescamento.

Anche i venti svolgono un ruolo fondamentale nel 'modulare' e 'veicolare' il loro effetto di raffrescamento. Una ricerca condotta da Stewart e Oke (2012) ha evidenziato che le variazioni della direzione e della velocità del vento possono alterare in modo significativo l'estensione e l'entità del raffrescamento fornito dai corpi idrici adiacenti: venti forti e costanti possono fornire sollievo termico ad aree urbane più estese.

La natura del suolo circostante fornisce un ulteriore rilevante contributo all'efficacia del raffrescamento; le aree con una maggiore percentuale di spazi verdi (parchi, alberi, foreste, tetti verdi, superfici permeabili, ecc.) adiacenti ai corpi idrici beneficiano degli effetti sinergici del raffrescamento, creano microclimi più freschi e migliorano il comfort termico urbano: la vegetazione infatti favorisce l'evapotraspirazione e genera ombra, migliorando anche la resilienza urbana complessiva alle ondate di calore (Smith, Fabian and Hutyra 2023).

Tan et alii (2021) hanno condotto uno studio approfondito per confrontare gli effetti di raffrescamento dei corpi idrici e degli spazi verdi in un ambiente urbano tropicale. I risultati hanno indicato che i corpi idrici possono abbassare la temperatura fino a 4 °C, mentre gli spazi verdi raggiungono una riduzione della temperatura di circa 2-3 °C. Lo studio ha anche osservato che i corpi idrici forniscono effetti di raffrescamento più stabili durante il giorno e la notte, a differenza degli spazi verdi, che offrono principalmente raffrescamento durante il giorno grazie all'evapotraspirazione (Simsek and Odul, 2018).

L'integrazione di corpi idrici e vegetazione può creare microclimi più freschi e migliorare il comfort termico urbano in modo più efficace (Fig. 30): Norton et alii (2015) hanno studiato il raffrescamento combinato degli effetti delle infrastrutture verdi e blu a Melbourne scoprendo che le aree con la presenza di corpi idrici e vegetazione fitta possono far registrare fino a 5 °C in meno, in funzione non solo delle caratteristiche dei corpi idrici descritte in precedenza, ma anche in base a fattori quali le specie vegetali, la densità e la copertura della chioma.

Un altro fattore rilevante da considerare nella progettazione è l'impatto delle superfici impermeabili che circondano i corpi idrici urbani (Bowler et alii, 2010; Zhang, Murray and Turner, 2017). L'impiego di materiali come asfalto e cemento, così come la presenza di edifici di grandi dimensioni, favorisce l'assorbimento di notevoli quantità di calore durante il giorno che viene rilasciato lentamente durante la notte; il calore immagazzinato aumenta la temperatura ambiente, riducendo gli effetti di raffrescamento naturale dei corpi idrici vicini e diminuendo il gradiente di temperatura necessario per un efficace scambio termico. Durante le ore notturne l'elevata inerzia termica porta i materiali impermeabili a cambiare temperatura lentamente, mantenendo valori elevati più a lungo durante la notte e riducendo l'efficacia dei corpi idrici. L'inerzia termica di questi materiali da un lato determina un maggiore consumo di energia per il raffrescamento degli edifici limitrofi, dall'altro crea l'effetto isole di calore urbane, in particolare durante i periodi di intensa radiazione solare, alterando il microclima e rendendo l'aria costantemente più calda e secca, entrambe condizioni che possono annullare gli effetti di raffrescamento forniti dai corpi idrici, soprattutto nelle aree densamente edificate con spazi verdi limitati (Zarcone, Nava and Tucci, 2024).

Per contrastare questi effetti negativi è quindi necessario potenziare l'impiego di suoli permeabili e la messa a dimora della vegetazione in prossimità dei corpi idrici. La progettazione di tali paesaggi urbani più sostenibili e confortevoli richiede tuttavia un posizionamento strategico delle infrastrutture blu e verdi per massimizzarne i benefici. Gli studi suggeriscono che il potenziale di raffrescamento di queste infrastrutture può essere ottimizzato collocandole in aree dove l'effetto delle isole di calore urbane è più pronunciato, come nei quartieri densamente popolati e nelle aree con scarsa vegetazione (Wang, Zhan and Ouyang, 2019; Magliocco and Oneto, 2023), valutando anche direzione e velocità dei venti, topografia ed esposizione al sole, che possono influenzarne significativamente l'efficacia. La ricerca ha dimostrato che l'integrazione di alberature e di giochi d'acqua in punti chiave può ridurre le temperature circostanti di 2-5 °C e che la loro integrazione con i corridoi verdi può migliorare la ventilazione e trasferirne i benefici a un'area urbana più ampia (Depietri, Renaud and Kallis, 2012). Una corretta progettazione può fornire una vasta gamma di benefici ambientali, sociali ed economici sempre più riconosciuti come componenti fondamentali nella pianificazione urbana sostenibile (Moscatelli and Raffa, 2023). Dal punto di vista ambientale l'integrazione delle due infrastrutture può svolgere un ruolo significativo nella gestione delle acque piovane, assorbendone il deflusso, contribuendo a ridurre i rischi di allagamento e mitigando l'impatto di piogge ad alta intensità.

Un'altra sinergia è rappresentata dalla loro capacità di migliorare la qualità dell'acqua e dell'aria: la vegetazione sequestra carbonio rilasciando ossigeno, mentre i suoli permeabili e le zone umide filtrano le acque piovane, riducendo lo stress delle infrastrutture idriche. Altri benefici ambientali documentati nella letteratura scientifica (Probst et alii, 2022; Smith, Fabian and Hutyra 2023; Ziaeemehr et alii, 2023) riguardano la biodiversità e i servizi ecosistemici: la creazione di habitat per una varietà di specie può sostenere lo sviluppo di flora e fauna diversificate, favorendo servizi essenziali come l'im-

pollinazione e contribuendo alla salute e alla resilienza degli ecosistemi urbani.

Ulteriori benefici ambientali, con riflessi anche sulla sostenibilità economica, sono legati all'efficienza energetica, poiché l'effetto di raffrescamento prodotto dalla sinergia di spazi verdi e corpi idrici riduce la domanda di energia per il condizionamento dei fabbricati limitrofi durante i periodi caldi, con un notevole risparmio delle emissioni di gas serra e sostegno concreto nel mitigare i cambiamenti climatici (Jandaghian and Colombo, 2024). Le politiche che incoraggiano l'integrazione delle due infrastrutture in ambito urbano possono ulteriormente stimolare la crescita economica, rigenerando ambiti urbani degradati, aumentando il valore degli immobili e sviluppando il turismo locale.

Da un punto di vista sociale l'integrazione di infrastrutture blu e verdi contribuisce al miglioramento della qualità di vita della comunità e del benessere psico-fisico degli abitanti, offrendo spazi per l'incontro, l'esercizio fisico, il relax e lo svago, come dimostrato da studi di settore sul rapporto tra ambienti naturali, stress, umore e interazione sociale (Gómez-Baggethun and Barton, 2013), soprattutto in quelle aree urbane densamente popolate dove l'accesso alla natura è spesso limitato (Nowak, Crane and Stevens, 2006).

Sebbene le ricerche sull'integrazione di infrastrutture blu e verdi abbiano riportato esiti promettenti sul metabolismo dell'acqua e sul raffrescamento in ambito urbano, mancano ancora studi quantitativi che ne misurino con precisione gli effetti sinergici e i compromessi. Inoltre sono necessarie ulteriori ricerche per valutare l'impatto diretto del raffrescamento fornito dai corpi idrici sulla salute e sul benessere dell'uomo, soprattutto per le popolazioni più vulnerabili durante gli eventi di calore estremo. È anche necessario mettere a punto tecniche di modellizzazione avanzate, con un approccio olistico e multidisciplinare, per simulare gli impatti a lungo termine dei corpi idrici sul clima urbano, fornendo così informazioni utili a una pianificazione proattiva basata sul tempo e capace di affrontare le incertezze.

Parallelamente sarà utile formulare e promuovere politiche e incentivi che incoraggino l'inclusione di corpi idrici, corridoi e aree con vegetazione e permeabilità dei suoli nei progetti di rigenerazione urbana e nello sviluppo di nuove urbanizzazioni, strutturando semplici ma efficaci linee guida per la progettazione, gestione e manutenzione di tali aree; l'alfabetizzazione e la sensibilizzazione dei cittadini sui benefici ambientali, economici e sociali generati dall'integrazione delle due infrastrutture sarà infine fondamentale per il loro successo a lungo termine.

Raffrescamento con acque reflue, da rifiuto residuo a risorsa | Se i corpi idrici e le infrastrutture verdi funzionano da 'condensatori' urbani capaci di dissipare il calore accumulato nello spazio pubblico, l'anello mancante di questa catena termodinamica scorre 'invisibile' nelle reti di scarico: ogni metrocubo di refluo che abbandona la città porta con sé energia e nutrienti che, se intercettati alla fonte, possono alimentare un raffrescamento latente distribuito. Questo cambio di scala consente di spostare il baricentro dell'azione sul clima dall'infrastruttura al metabolismo degli edifici, trasformando l'effluente domestico da rifiuto in fluido a servizio delle 'città temperate'. L'AR6-WG I dell'IPCC (2023a) evidenzia che diverse aree geografiche stanno registrando un aumento statisticamente significativo di frequenza e intensità delle ondate di calore, tendenza destinata ad acuirsi a metà secolo in tutti gli scenari emissivi simulati. Parallelamente il recente monitoraggio del Joint Research Centre (Rossi et alii, 2023) mostra, per il triennio 2020-2022, anomalie di umidità del suolo persistenti su oltre un terzo del territorio dell'Unione Europea, confermando l'allungamento dei periodi di siccità severa. In questo contesto per raffrescarsi la città ha bisogno di più acqua proprio quando la disponibilità diminuisce e le risorse idriche urbane continuano a seguire un percorso lineare – captazione, uso, depurazione centralizzata e rilascio a mare – che disperde annualmente decine di chilometri cubi d'effluente ancora ricco di nutrienti e carico di microinquinanti, con ricadute eutrofiche sulla fascia costiera, come documentato dall'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA, 2019).

L'agricoltura europea sopperisce alla dispersione dei nutrienti con fertilizzanti prodotti quasi per intero con il processo Haber-Bosch, un processo che assorbe circa l'1-2% del consumo energetico globale e richiede in media 0,7-0,9 kg di metano per ogni chilogrammo di azoto fissato (Nancharaiah, Venkata Mohan and Lens, 2016). L'alternativa





Figg. 17, 18 | Gardens by the Bay (on the right) is a futuristic park and botanical garden in Singapore; covering 101 hectares, it forms part of the government's project to transform the city from a 'garden city' to a 'city in a garden', blending technology and nature sustainably. The Marina Barrage, (on the bottom) constructed at the confluence of five rivers, enhances the nation's water self-sufficiency by providing water storage, flood control, and a variety of recreational activities (sources: esquire.com; pub.gov.sg).



Fig. 19 | A hydroponic cultivation system near Changi Airport in Singapore: AeroFarms' farmers mist the roots of all crops; this technique allows harvesting of around 700 varieties of fruits and vegetables in 10 to 14 days, compared to 30 to 45 days with traditional farming methods (credit: aerofarms.com).

è cambiare scala e sistema di depurazione: i piccoli impianti (decentrati) di fitodepurazione con letto di ghiaia e piante, costruiti per un massimo di 50 abitanti equivalenti secondo la norma UNI EN 12566-3:2016 e lo Standard DWA-A 262 (DWA, 2017), consumano circa 0,15 kWh per metro cubo di refluo trattato ed eliminano in media il 90% della sostanza organica, circa il 75% dell'azoto e fino al 90% del fosforo, il cui residuo è pari a circa 1-3 mg per litro: la concentrazione residua di tali nutrienti rende l'effluente adatto alla irrigazione di tetti verdi, alberature e aiuole senza bisogno di ulteriori trattamenti.

Se immaginassimo di impiegare questo sistema di fitodepurazione a tutta la città metropolitana di Napoli, che al 2025 conta circa 2,96 milioni di abitanti[17] e considerassimo un consumo domestico medio di circa 200 litri pro-capite al giorno, ci troveremmo la disponibilità di circa 592mila metri cubi di refluo riciclabile al giorno. Irrigando 354.667 alberi – messi a dimora a interasse di 6 metri lungo i due lati della rete stradale di circa 1.064 km[18] – con un fabbisogno giornaliero prudenziale di 100 litri ad albero potremmo utilizzare 35.467 metricubi di reflui al giorno (Tab. 1): l'evapotraspirazione trasformerebbe l'acqua in un flusso latente di 24,12 GWh al giorno, calcolo basato su 0,68 kWh per litro di evaporato, valore che discende dal calore latente di 2,45 MJ/kg (Tab. 2).

I restanti 556.533 metri cubi di acque reflue al giorno potrebbero irrigare 79,5 milioni di metri quadrati di giardini e aiuole sui tetti (7 l/m²) o 111,3 milioni di metri quadrati di coltivazioni aeroponiche in copertura (5 l/m²); tale irrigazione si tradurrebbe in altri 378,44 GWh di raffrescamento latente al giorno e in una produzione orticola annua prossima a 8 milioni di tonnellate, valore allineato alla resa dei 70 kg/mq annui dei sistemi produttivi di ultima generazione.

Sommando i contributi dell'irrigazione su strada e sui tetti nei 120 giorni più caldi dell'estate si svilupperebbe un servizio di raffrescamento pari a 402,56 GWh, una quantità di energia termica equivalente alla potenza erogata da oltre 3.354.000 climatizzatori da 5 kW funzionanti 24/24h per lo stesso periodo (Tab. 3). Tale raffrescamento produrrebbe una riduzione della domanda di energia per il raffrescamento degli edifici, come attestato da modelli dinamici secondo i quali un abbattimento di 1,5 °C della temperatura dell'aria da un lato può ridurre il picco estivo di consumo energetico di circa il 12% (Santamouris et alii, 2020) dall'altro può favorire incrementi della biodiversità superiori al 25% in prossimità di suoli ben irrigati (Frene et alii, 2022; Christel et alii, 2023).

Se assumessimo poi che il refluo trattato abbia la concentrazione massima consentita dalla UNI EN 12566-3:2016 per l'azoto (15 mg/litro) e per il fosforo (2 mg/litro) e che la quantità di acqua fitodepurata (600.300 metri cubi) venga tutta utilizzata per l'irrigazione di alberi e tetti con coltivazioni aeroponiche, allora riusciremmo a recuperare circa 3.286,64 t/anno di azoto e 438,22 t/anno di fosforo. Inoltre, considerando come fattori di emissione i valori di 4 kg CO_{2eq} per chilogrammo di azoto e di 1,4 kg CO_{2eq} per chilogrammo di fosforo, il riciclo locale del refluo consentirebbe di evitare ogni anno l'immissione di circa 13.800 t CO_{2eq}, stima che comprende sia la quota energetica di produzione dei fertilizzanti minerali sostituiti sia le emissioni legate al loro trasporto. Il riciclo dei reflui consentirebbe così di non utilizzare acqua potabile per uso irriguo nei periodi di siccità e di alleggerire sensibilmente i volumi scaricati nella rete fognaria nei giorni di precipitazioni intense, con minore frequenza di sovrappieno e pressione eutrofica sui litorali campani.

Un caso spesso citato come apripista mondiale nel riuso delle acque reflue è quello di Israele: oggi oltre il 90% dei volumi civili trattati finisce per irrigare i campi, una quota di gran lunga superiore a quella di qualsiasi altro Paese[19], grazie a grandi impianti centralizzati di depurazione che, con tecnologie differenti, consumano mediamente 1 kWh per metro cubo trattato (Walker, Prysor Williams and Styles, 2021). Al di là dei costi di trattamento, variabili tra 7 e 16 volte quelli di un impianto di fitodepurazione, se si volessero reimpiegare le acque per il raffrescamento evaporativo urbano bisognerebbe realizzare nuove infrastrutture idriche su scala metropolitana, con costi non irrilevanti. Il caso di Israele che dimostra attenzione al riciclo per fini irrigui è tuttavia irrilevante per il raffrescamento urbano che richiede una diffusa rete micro nodi in cui ogni fabbricato diventa un 'modulo climatico' capace di sigillare il proprio ciclo idrico, trasformare l'energia termica in eccesso in flusso latente e restituire nutrienti alla vegetazione.

Una riflessione sul passaggio dalla scala macro dei 600mila metri cubi di reflui di Napoli a quella edilizia dei 10 metri cubi di un condominio tipo consente di dimostrare che il principio funziona anche in assenza di economie di scala: non occorrono reti adduttive chilometriche o costosi impianti di sollevamento, ma sono sufficienti poche pompe di modesta potenza e un progetto che preveda la fitodepurazione sulla copertura di un edificio o in uno spazio limitrofo.

Alla scala edilizia la decentralizzazione consente di ridurre drasticamente l'energia grigia infrastrutturale, le perdite di rete e il consumo di acqua potabile e al contempo di smaltire con maggiore facilità le acque piovane, aumentare la ridondanza in caso di blackout e abbattere i costi ambientali: il 'calore evaporato' non grava più sulla bolletta pubblica perché è intercettato là dove si genera, mentre l'acqua resa disponibile localmente solleva il sistema idrico da pressioni estive che, con il cambiamento climatico, diventeranno strutturali.

Il più efficiente ed economico sistema decentralizzato è quello che impiega la fitodepurazione a flusso verticale con pretrattamento aerobico (UNI EN 12566-3:2016). Ogni modulo, fino a un massimo di 50 abitanti equivalenti (Fig. 31), è innanzitutto costituito da una 'camera di decomposizione' con filtro di paglia (1), installata in cantina o al piano terra e ventilata; poiché avvengono solo processi aerobici, non vi è alcun fastidio causato da odori. Da qui l'acqua reflua arricchita di ossigeno viene pompata in copertura (2) nella vasca filtrante con le piante (3); al terminale della vasca è presente un pozzo di controllo dal quale partono due condotte, una per l'irrigazione del tetto verde (4a), l'altra per lo stoccaggio in una cisterna (10), nella quale possono essere convogliate anche l'acqua piovana e quella residua dell'irrigazione; attraverso altre canalizzazioni (T, U, V, W e X) le acque della cisterna vengono immesse nella rete idrica resiliente locale.

L'energia necessaria è fornita da due pompe, con un consumo massimo di 1 kWh al giorno per un edificio di cinque piani con 50 residenti e una produzione di 10.000 litri d'acqua al giorno. In aree collinari la gravità sostituisce integralmente le pompe di rilancio (Fig. 32).

Per un condominio con 50 abitanti equivalenti, per il quale si stima una superficie di lastrico solare pari a 450 mq, la superficie del letto di ghiaia necessario alla fitodepurazione varia da 1 a 4 mq per abitante equivalente[20], a seconda della zona climatica. Ai fini del seguente calcolo si prevede di utilizzare il parametro più alto poiché tale sovradimensionamento facilita la manutenzione e prolunga la vita utile del filtro, pertanto si prevede che il letto di ghiaia si sviluppi su un massimo di 200 mq.

I dieci mila litri di reflui giornalieri che i 50 abitanti equivalenti inviano all'impianto vengono intercettati dalla vasca di preossigenazione; poi i filtri di ghiaia e di radici li chiarificano con un dispendio energetico di appena 0,06-0,15 kWh per metro cubo, che è da sette a sedici volte inferiore a quello di un depuratore centralizzato. Su questa sola differenza di prestazione si fonda un primo beneficio climatico: i dieci metri cubi trattati localmente evitano di consumare 8,5 kWh di elettricità al giorno; moltiplicando per il fattore emissivo medio del mix italiano rilevato nel 2024[21] (circa 0,27 kg CO_{2eq} per kWh) si ottiene un risparmio di 2,3 kg CO_{2eq} al giorno, vale a dire 275 kg CO_{2eq} nei centoventi giorni più caldi dell'anno e oltre 800 kg CO_{2eq} su base annua.

Una parte di quest'acqua, circa 1,5 metri cubi al giorno, potrebbe rientrare nelle cassette di scarico dei wc attraverso una canalizzazione dedicata, risparmiando circa 1.500 metri cubi di acqua potabile l'anno. L'effluente restante – 8,5 metri cubi al giorno – può essere utilizzato per l'irrigazione del verde condominiale o del verde pubblico di prossimità, dove evapotranspira interamente; è qui che il sistema mostra la sua forza, trasformando il refluo in raffrescamento latente e poiché per ogni litro evaporato corrispondono 0,68 kWh di calore sottratto all'aria, gli 8.500 litri sottraggono 5.780 kWh al giorno, equivalenti all'effetto termico di quarantotto climatizzatori da 5 kW sempre accesi per 120 giorni.

Considerando tutto il periodo estivo il calore latente sottratto equivale a circa 694 MWh, producendo un raffrescamento 'a costo zero' che non grava sulla rete elettrica e abbatte di riflesso la temperatura delle superfici, con ricadute positive su comfort, biodiversità e bilanci energetici degli appartamenti. I flussi dei nutrienti, lungi dall'essere un problema, diventano un fertilizzante in soluzione. Gli 8,5 metri cubi quotidiani di acqua trattata contengono, ai limiti della norma UNI EN 12566-3:2016, poco meno di 130 g di azoto e 17 g di fosforo che su base annuale diventano rispettivamente 46 e 6 kg, sufficienti a sostenere la crescita di una cortina arborea e del manto erboso di un condominio senza ricorrere a concimi minerali. Se traduciamo questi nutrienti in emissioni evitate, utilizzando i fattori di emissione già citati per azoto e fosforo, evitiamo l'immissione di 190 kg CO_{2eq} all'anno.

A questo beneficio si somma lo sgravio energetico: trattare i reflui in situ con la fitodepurazione richiede soltanto 0,06-0,15 kWh per metro cubo contro il kilowattora necessario in un impianto centralizzato. Per i 10 metri cubi giornalieri del condominio significa evitare 3.100 kWh di elettricità all'anno che, con il mix elettrico italiano del 2024, equivalgono a circa 840 kg CO_{2eq} non emessi in atmosfera.

Oltre all'impianto di fitodepurazione il tetto del condominio di 450 mq può accogliere 200 mq di colture aeroponiche ad alta densità. Il fabbisogno idrico di un orto in quota – 5 litri per metro quadrato al giorno – viene interamente soddisfatto dalla risorsa già disponibile e pertanto non occorrono nuovi prelievi di acqua potabile. La resa stimata in 70 kg/mq annui consente così di portare alla tavola dei condomini fino a quattordici tonnellate l'anno (circa 750 grammi al giorno a persona) di ortaggi freschi senza occupare un centimetro di suolo urbano e senza l'uso di fertilizzanti minerali. Dal punto di vista termico, la quota d'acqua dedicata alla coltivazione aeroponica contribuisce per altri 680 kWh di raffrescamento latente al giorno, ma rientra già nel bilancio globale di 5,8 MWh; il beneficio aggiuntivo è soprattutto dovuto al fatto che lo scambio avviene direttamente sopra gli alloggi riducendo il carico termico sul solaio di copertura.

Nel panorama internazionale un caso studio di interesse è la 'casa ecologica' realizzata nel 2015 a Bangalore (Figg. 33, 34). Seppur realizzata in un ecosistema normativo fragile, in un tessuto urbano denso e in un clima monsonico caratterizzato da lunghi periodi di siccità, la 'casa ecologica' consente di mettere alla prova la citata logica multiscalare, dimostrando che i principi dell'autosufficienza idrico-energetica e del raffrescamento latente possono essere tradotti con successo anche in condizioni estreme. L'edificio, abitato da una famiglia, è progettato per ridurre il prelievo di acqua potabile, non scaricare reflui in fognatura né smaltire rifiuti organici fuori dal lotto. Quattro fonti d'acqua – piovana, di pozzo, di rete e riciclata – convergono in una rete di stoccaggio e trattamento alimentata da fotovoltaico; il consumo domestico di acqua potabile scende così a 90 litri a persona al giorno rispetto alla media nazionale di 150 litri.

Il fabbricato è dotato di quattro colonne di scarico separate (urine, feci, acque grigie di cucina e acque grigie di lavello e doccia del bagno), per ottimizzare al meglio il trattamento dei reflui, recuperare nutrienti, ridurre i volumi da depurare e ottenere acqua di riuso direttamente in loco. Questi flussi convergono in un piccolo impianto di trattamento collocato sul retro dell'edificio, dove è presente un corridoio tecnico addossato alla parete su cui corrono anche le colonne di scarico. Le frazioni solide vengono avviate a disidratazione e compostaggio per poi essere mescolate con scarti alimentari e diventare ammendante per gli orti sul tetto e nei terrazzamenti. Le acque grigie attraversano uno strato di materiale organico (erba, foglie, compost, paglia, aghi di pino, ecc.) e un letto filtrante a doppia zona (prima anaerobica e poi aerobica) al termine del quale il refluo, ormai chiarificato e igienicamente sicuro, è raccolto in cisterna e destinato a usi non potabili, tra cui scarichi dei WC, irrigazione del verde e degli orti pensili e lavaggi esterni. Per risolvere il problema di eventuali cattivi odori i progettisti hanno puntato su tenuta stagna e ventilazione passiva: le acque nere sono raccolte in un armadio a tenuta d'aria e le urine in un serbatoio chiuso, mentre l'ispezione avviene attraverso sportelli in plexiglass con il risultato che l'area di trattamento risulta 'pulita e senza odori'.

Se analizziamo attentamente il caso studio, l'elemento innovativo principale non è tecnologico, ma gestionale: la casa funziona grazie a una convergenza di scelte – consumo prodotti biodegradabili, separazione dei reflui, manutenzione attiva delle unità di trattamento – che trasferisce ai residenti responsabilità normalmente delegate al gestore idrico.

La 'casa ecologica' dimostra che, con utenti motivati, si può rendere circolare ogni flusso domestico, ma mette anche in luce fragilità socio-tecniche. Sotto lo stesso tetto sono presenti quattro reti per altrettanti tipi di reflui che se da un lato consentono di ottimizzare i processi di riciclo, dall'altro introducono una complessità impiantistica che mal si presta a un'edilizia di massa. Va però riconosciuto il merito di aver testato, in condizioni abitative reali, soluzioni spesso confinate ai laboratori: ad esempio il compost derivato dalla miscelazione di feci e frazione umida dell'organico produce un fertilizzante che ha già superato le prove agronomiche (Drangert and Kjerstadius, 2023).

Il caso di Bangalore dimostra che la transizione da infrastrutture idriche centralizzate a reti distribuite e basate sulla natura è tecnicamente fattibile e già in esercizio. La forza del prototipo non risiede nelle singole innovazioni tecniche – tutte ampiamente note in letteratura – ma nell'integrazione sistemica di processi che chiudono in loco i cicli di acqua, energia e nutrienti. Tuttavia questa stessa integrazione ha un'elevata dipendenza dal comportamento degli utenti e da 'rituali domestici quotidiani' che possono amplificare o ridurre le prestazioni dell'impianto. Si pongono quindi due interrogativi chiave per la replicabilità: quale grado di automazione è necessario per sollevare gli utenti dagli oneri gestionali senza sacrificare la resilienza del sistema e quale forma di governance – alle diverse scale – può garantire nel tempo manutenzione, salubrità ed equa distribuzione dei benefici.

Per passare dalla scala della sperimentazione alla diffusione di massa occorrerà un doppio salto: semplificare l'ingegneria degli impianti – ad esempio integrando fitodepurazione, raccolta piovana e batterie di accumulo in moduli prefabbricati – e affiancare agli incentivi economici specifiche campagne di alfabetizzazione idrica che trasformino cit-

tadini-utenti in co-gestori consapevoli della risorsa. Senza questa sinergia fra tecnica e cultura, la promettente 'sperimentazione' di Bangalore rischia di restare un'eccezione virtuosa rispetto ai sistemi centralizzati pensati per allontanare rapidamente l'acqua, anziché trattenerla e valorizzarla nel luogo stesso dove nasce il bisogno.

Sinergie e compromessi tra i 17 SDG: implicazioni ambientali, sociali, culturali ed economiche | Il percorso fin qui delineato – dal ciclo lineare a quello circolare, dagli approcci operativi delle 4R alla triade resilienza / sostenibilità / antifragilità – ci consegna una nuova visione della città che non si limita più a 'gestire' l'acqua, ma la metabolizza per temperarsi e produrre benessere per tutti i suoi esseri viventi. Questo cambio di paradigma impone di riflettere su come la nuova infrastruttura idrico-climatica si intrecci con l'Agenda 2030 nella sua interezza. Gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) non sono un semplice catalogo di obiettivi monotematici, ma costituiscono una matrice coerente che misura la capacità dei sistemi eco-socio-tecnici di distribuire benefici senza spostare i costi, non solo economici, ad altri territori o a generazioni future. L'acqua, per la sua natura di fluido connettivo, diventa la lente più efficace per evidenziare sinergie e compromessi tra obiettivi e target apparentemente distanti, rivelando che la transizione verso le città temperate non è legata a un semplice avanzamento tecnologico, ma si basa su una riconfigurazione culturale ed economica di lungo periodo.

L'SDG 6 è il fulcro evidente di questa matrice: garantire disponibilità e gestione sostenibile dell'acqua significa, in chiave urbana, sostituire le reti centralizzate e monofunzionali con quelle decentrate e metaboliche capaci di generare raffrescamento latente. L'effetto domino delle sinergie con gli altri obiettivi è piuttosto intuitivo: l'acqua che irriga i tetti con coltivazioni aeroponiche (SDG 2) stempera l'isola di calore urbana (SDG 13) e fa diminuire la mortalità da stress termico (SDG 3); allo stesso tempo sottrae nutrienti ai reflui, riducendo la domanda di fertilizzanti di sintesi e di conseguenza le emissioni del settore chimico (SDG 9). Il circuito idrico-energetico chiuso abbassa inoltre i carichi di picco sulla rete elettrica, facilitando l'adozione delle rinnovabili (SDG 7) e liberando risorse finanziarie che possono essere riallocate in programmi di sviluppo o sociali quali quelli per l'emergenza abitativa delle fasce più deboli (SDG 1 e 10).

Inoltre quando in alcune aree geografiche il riuso dell'acqua alimenta gli orti comunitari si osserva anche una ricaduta positiva sull'SDG 5: il tempo speso tradizionalmente dalle donne per reperire o trasportare l'acqua si riduce sensibilmente, liberando ore che possono essere reinvestite in istruzione o occupazione e contribuendo anche all'SDG 10 (Baratta, Finucci and Magarò, 2025; UNESCO, 2023). Partendo dal nesso tra riuso idrico e riduzione delle disuguaglianze è possibile dimostrare che un impianto di fitodepurazione consente di riscontrare la stessa logica nell'edilizia sociale: grazie ai bassi costi energetici e gestionali l'infrastruttura garantisce risparmi diretti per inquilini e gestore, rendendo tangibile il vantaggio economico nel lungo periodo.

Il caso del social housing per circa cento residenti a Herzogenburg (Austria) ne è prova: nella Figura 35 la freccia in basso a sinistra indica un piccolo locale tecnico nel quale sono presenti due filtri di paglia per il trattamento delle acque reflue che vengono poi riutilizzate per irrigare i giardini attigui, riducendo prelievi di potabile e costi d'esercizio. Il materiale filtrante, sostituito e compostato ogni 6-12 mesi, chiude il ciclo della materia e accresce la biodiversità locale. Poiché i canoni di locazione rimangono legati all'edilizia sociale, l'intervento dimostra che tali infrastrutture circolari sono economicamente accessibili e, integrando riuso irriguo e servizi ecosistemici, contribuiscono congiuntamente agli SDG 6, 10 e 11, replicando negli alloggi popolari lo stesso effetto inclusivo osservato negli orti comunitari.

Se diverse sono le sinergie possibili tra i 17 SDG, numerosi sono i compromessi da valutare; basti pensare che ogni pompa di rilancio richiede rame e ogni membrana osmotica richiede energia per produrla: l'SDG 12 (consumo e produzione responsabili) ricorda che l'impronta materiale dell'innovazione non è neutra e che l'impronta di carbonio incorporato nella produzione di tubazioni e serbatoi può erodere parte dei benefici climatici dichiarati.

Il metabolismo idrico consente anche benefici economici non indifferenti: gli investimenti iniziali per i moduli di fitodepurazione sono più elevati rispetto al semplice allaccio a una rete idrica pubblica, ma si ripagano in tempi inferiori ai dieci anni grazie alla riduzione della bolletta energetica e ai minori picchi della rete (SDG 7). Il beneficio più trascurato – eppure importante ai fini dell'SDG 8 – è la creazione di un nuovo mercato del lavoro per la manutenzione degli impianti diffusi: agronomi, architetti, ingegneri, idraulici, tecnici informatici e dell'elettronica ed esperti dell'IoT dovranno acquisire nuove specializzazioni rigenerando competenze e professionalità in crisi, allineandosi ai principi dell'economia della ciambella: prosperare senza superare i limiti planetari (Raworth, 2023).

Le ricadute culturali sono meno quantificabili, ma altrettanto concrete: nelle culture mediterranee, dove la fontana e il lavatoio erano collocati in spazi pubblici di socialità, riportare l'acqua in superficie attraverso canali di irrigazione o corpi idrici in prossimità di parchi o giardini riplasma il linguaggio dello spazio civico facilitando le relazioni. L'acqua potabile che solitamente è utilizzata per irrigare i giardini e per i servizi igienici, soprattutto in periodi di siccità e durante le ondate di calore, può essere impiegata per alimentare sistemi di raffrescamento negli spazi pubblici (Fig. 36) – tramite nebulizzazioni a bassa portata, fontane a ricircolo, pavimentazioni bagnate a ciclo temporizzato, rain garden – aiutando la popolazione a fronteggiare le ondate di calore.

Il raffrescamento latente da prestazione energetica diviene in tal modo esperienza sensoriale che ristabilisce la continuità fra il corpo umano e il microclima, orientando l'SDG 11 verso una dimensione di 'abitabilità aumentata' che va oltre la mera infrastruttura fisica. Prende corpo così una nuova 'cittadinanza dell'acqua' nella quale chiunque fornisca un contributo, con la fitodepurazione domestica o con i programmi di monitoraggio del sistema, sviluppa un senso di appartenenza che riduce la distanza psicologica fra azione del privato e beneficio pubblico, terreno fertile per l'SDG 16 sul rafforzamento delle istituzioni inclusive.

Lo stesso metabolismo idrico può tuttavia trasformarsi in un vettore di disuguaglianza se non è accompagnato da adeguate politiche redistributive. Numerosi casi di eco-gentrificazione dimostrano che la rigenerazione urbana, ancor più se è accompagnata da un miglioramento della qualità di vita e delle condizioni climatiche, aumenta il valore dell'edilizia e rischia di far migrare i residenti meno abbienti (Triguero-Mas et alii, 2022; Anguelovski et alii, 2022). Per contrastare tale fenomeno gli SDG 10 e 11 si prefiggono di attivare modelli di governance capaci di trasferire gli stessi benefici nelle aree di migrazione, per esempio destinando una quota degli oneri di urbanizzazione o di concessione per la loro rigenerazione urbana: in questo senso l'acqua si configura come un bene comune da ridistribuzione per onorare il principio 'senza lasciare indietro nessuno' su cui si fonda Agenda 2030.

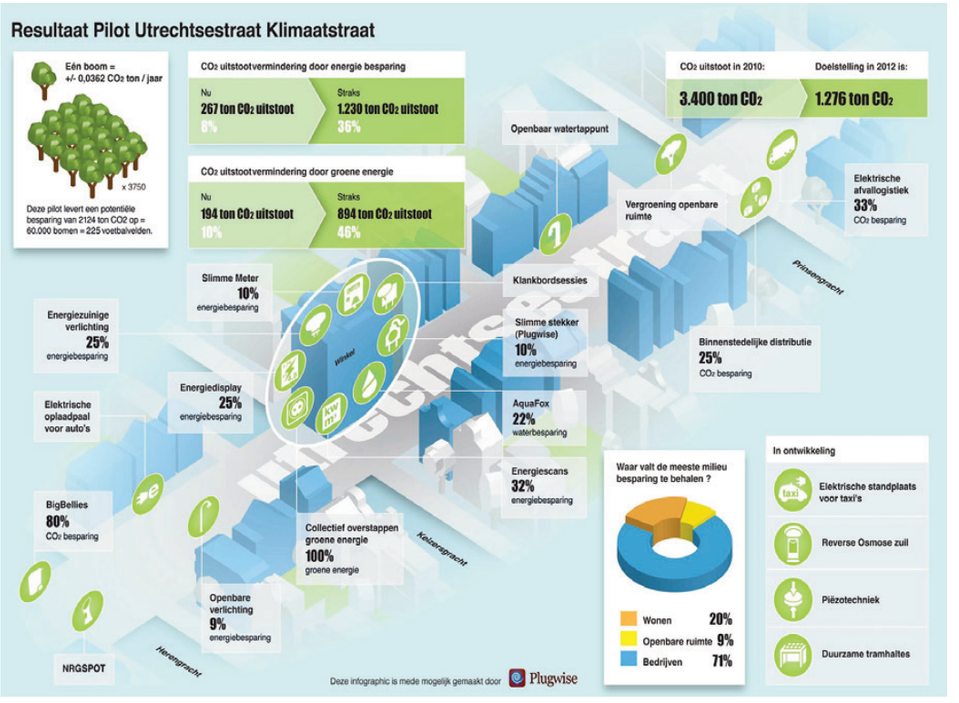
La dimensione intergenerazionale degli SDG 4 e 13 emerge nelle pratiche educative; inserire il metabolismo urbano dell'acqua nei programmi scolastici significa passare dalla pedagogia dell'allarme a quella dell'azione: i gemelli digitali urbani, proiettati in realtà aumentata nei laboratori didattici, possono permettere agli studenti di simulare come un litro di acqua piovana diventi raffrescamento, fertilizzante e cibo entro il loro quartiere. Questa alfabetizzazione operativa costruisce anticorpi culturali contro il ritorno alle soluzioni lineari, trasformando ogni giovane in potenziale 'tutor del ciclo metabolico' per la propria comunità. I risultati pilota di Singapore – che ha integrato la storia della NEWater nei manuali di scienze – indicano un aumento dell'accettabilità del riuso potabile dal 48 al 78% fra gli studenti, un capitale sociale che nessuna tariffa progressiva potrebbe generare da sola.

Sul fronte degli obiettivi legati alla vita sulla Terra e sotto l'acqua (SDG 14 e 15) il metabolismo idrico urbano ha un rapporto ambivalente; il recupero di nutrienti riduce l'eutrofizzazione marina e la pressione sugli ecosistemi costieri, ma i micropolimeri rilasciati dai sistemi di filtrazione, al pari dei PFAS che sfuggono alla maggior parte dei trattamenti, possono accumularsi nei corpi idrici con effetti dannosi per gli ecosistemi. Qui il compromesso diventa più stringente: massimizzare il riciclo senza investire nella ricerca di materiali filtranti a bassa tossicità rischia di 'scaricare' l'onere ambientale alle generazioni future; a tal proposito la roadmap europea sull'SDG 14 invita a protocolli di monitoraggio rafforzati e ad accordi con l'industria chimica per la produzione di membrane 'cradle-to-cradle', anticipando scenari di responsabilità estesa del produttore (European Commission, 2023).

Un ulteriore livello di complessità si apre con l'SDG 17, dedicato alle partnership per gli obiettivi. Se il ciclo idrico circolare non è di competenza di un singolo assessorato, la trasformazione delle città in nodi di raffrescamento della rete planetaria richiede un salto di scala: accordi transcalari che travalicano i confini amministrativi e frontalieri e mettono in relazione più aree urbane lungo corridoi climatici condivisi. La logica reticolare del raffrescamento funziona solo se le catene di scambio acqua / energia / cibo fra città temperate sono rese operative da nuovi soggetti intermedi (consorzi inter-municipali, green-bond metropolitani, reti di dati microclimatici open-source) e da vincoli contrattuali che ribaltano il paradigma 'dal bene pubblico al servizio climatico per l'umanità'.

La citata esperienza del Cloudburst Master Plan di Copenaghen dimostra che la scalabilità dall'edificio al quartiere e alla città avviene solo quando la partnership è formalizzata in contratti di prestazione che attribuiscono ad ogni attore un beneficio tangibile, ad esempio riduzione dei premi assicurativi per le imprese, condivisione strutturata dei dati, disponibilità delle superfici dei tetti piani per le coopera-





tive sociali agricole (Follesa et alii, 2024) o agevolazioni tariffarie per i cittadini prosumer.

In chiave SDG 17 occorrono accordi tra città di nazionalità diverse, che colleghino ad esempio il surplus notturno di acqua depurata di Rotterdam (Paesi Bassi) con i deficit diurni di Anversa (Belgio), o che integrino la sensoristica urbana di una Barcellona (Spagna) con i modelli previsionali di Marsiglia (Francia) per costruire 'corridoi' transfrontalieri tra i nodi di raffrescamento'. L'SDG 17 diventa quindi la cerniera che trasforma la circolarità idrica locale in un'infrastruttura termodinamica di scala planetaria, capace di modulare i gradienti termici regionali e di ridurre in ultima analisi la vulnerabilità del Pianeta agli eventi climatici estremi.

Una matrice 4R-SDG per il progetto del metabolismo urbano dell'acqua | Le tensioni tra sinergie e compromessi sono quindi inevitabili e vanno assunte come vero motore progettuale, a patto di dotarsi di uno strumento capace di farle emergere prima che si realizzino soluzioni irreversibili. Allo scopo si propone una matrice multi-driver che mette a sistema le 4R del metabolismo idrico con i 17 SDG (Tab. 4), declinandola lungo tre linee di lettura complementari: flussi bio-fisici, ricadute socio-economiche, dispositivi di governance.

La matrice prevede che in primo luogo si quantifichino per ogni R gli indicatori chiave di prestazione desiderati, ad esempio litri di acqua risparmiati (Ridurre), percentuale di domanda coperta dal riuso 'fit-for-purpose' (Riutilizzare), kWh o kg di nutrienti recuperati per metro cubo di refluo (Recuperare), ettari di suolo de-impermeabilizzati o gradi ridotti tramite evapotraspirazione (Rigenerare). Gli indicatori andranno posizionati lungo le ordinate della matrice; tipo e numero degli indicatori sono variabili che dipendono dal progetto e dal contesto a cui si riferisce. A ciascun indicatore viene associato un coefficiente di intensità carbonica e un fattore di vulnerabilità sociale, in modo da riflettere simultaneamente gli impatti sul clima e le ricadute sociali, superando la tradizionale separazione tra analisi ambientale e valutazione di equità, come suggerito dal modello 'nexus plus justice' (Boas, Biermann and Kanie, 2016).

Una volta normalizzate le prestazioni si proiettano sui 17 SDG, collocati lungo l'asse delle ascisse, attribuendo punteggi da '+3' (elevata sinergia) a '0' (neutro) a '-3' (elevato compromesso). A titolo di esempio l'irrigazione di tetti verdi con acque reflue trattate produce sinergie elevate con gli SDG 3, 6, 11 e 13, ma può entrare in conflitto con l'SDG 14 se lo scarico residuo veicola tensioattivi, nutrienti e microinquinanti verso l'estuario; la matrice evidenzia così la necessità di un trattamento avanzato prima dello scarico. Il risultato è un grafico radar a 17 raggi che rende visibili le asimmetrie di progetto: dove la curva scende sotto lo zero, il progettista è chiamato a ricalibrare materiali, tecnologie o scala dell'intervento.

Un ultimo passaggio è la restituzione del grafico radar in un indice sintetico (4R-SDGs Index) calcolato come media ponderata dei punteggi sinergia-compromesso moltiplicati per l'importanza relativa dei singoli SDG stabilita a livello locale. In uno specifico contesto salute pubblica e parità di accesso all'acqua possono valere il doppio in quartieri a bassa capacità adattiva, mentre una stessa infrastruttura può risultare altamente virtuosa ad esempio in un centro storico dove riduce l'isola di calore

Figg. 20, 21 | One of many canals (on the right) characterising Amsterdam's urban landscape (source: getyourguide.it). The Climate Street project (on the bottom) involves retailers, citizens, multi-utility energy distributors, and small businesses working together to make the city centre's shopping streets more energy-efficient: developed as part of the Amsterdam Smart City programme, it combines technology with cultural awareness (source: fomentosansebastian.eus).





Figg. 22, 23 | The Milan Nosedo wastewater treatment plant and the Naviglio Grande canal (sources: veoliawatertechnologies.it; ojeventi.it).

Next page

Fig. 24 | A rooftop in Vienna (credit: G. Mittersteiner, 2024).

Fig. 25 | Flying Gardens (credit: RATAPLAN – Architektur ZT GmbH).

(peso alto a SDG 3, 11) o poco efficiente lungo i waterfront, dove il peso maggiore assegnato alla tutela degli ecosistemi marini e costieri (SDG 14) e alla resilienza idraulica (SDG 9) fa emergere che l'irrigazione del verde pubblico con acque grigie può persino introdurre carichi residui indesiderati.

Il principale vantaggio della matrice è la sua natura implementabile, ma anche quella dialogica: consente a progettisti e Amministrazioni di esplicitare le priorità locali, misurare i compromessi e trattare l'acqua come vettore trasversale di equità, decarbonizzazione e resilienza. La matrice si traduce in un cruscotto operativo che permette di simulare scenari alternativi (materiali, tecnologie, scale), individuare dove le sinergie superano i compromessi e giustificare le scelte progettuali davanti agli stakeholder con un linguaggio condiviso.

La stessa struttura offre alla comunità scientifica una piattaforma comparativa capace di superare la frammentazione disciplinare: il confronto fra due progetti non si limita più ai metri cubi trattati, ma considera la misura in cui ciascuno avanza o ostacola l'insieme degli obiettivi dell'Agenda 2030. In tal modo la matrice costituisce un protocollo replicabile che colma il divario fra studi idraulici, energetici e sociourbani, aprendo nuove traiettorie di ricerca fra città, clima e contesti istituzionali differenti, mentre il paradigma delle 4R smette di essere una sequenza lineare per trasformarsi in un dispositivo critico e adattivo che valorizza le sinergie, riduce i compromessi e rende trasparenti le decisioni sul futuro termico e idrico delle aree urbane.

Affinché da esercizio teorico diventi un efficace dispositivo decisionale, occorre innanzitutto che la matrice multi-driver venga tradotta in ambiente digitale e sia capace di interagire con i gemelli urbani che alcune città stanno già sperimentando per gestire energia, traffico e qualità dell'aria (Longo et alii, 2024). Collegando la matrice a reti di sensori di portata, qualità idrica, temperatura superficiale e indicatori sociodemografici sarà possibile trasformare ogni cella della matrice in un nodo aggiornato in tempo quasi reale. L'algoritmo di fusione dati calcolerà gli indicatori (litri risparmiati, chilowattora recuperati, gradi di mitigazione, metri cubi infiltrati, ecc.) e ricalibrerà automaticamente il coefficiente d'intensità carbonica e il fattore di vulnerabilità sociale, rendendo la piattaforma un cruscotto evolutivo capace di anticipare gli impatti di scenari progettuali alternativi e verificando le prestazioni dei singoli elementi lungo l'intero ciclo vita dell'infrastruttura.

Parallelamente la ponderazione degli SDG potrà diventare adattiva attraverso processi di coinvolgimento dei diversi portatori d'interesse: workshops e conferenze di servizio con gestori, associazioni di quartiere e di categoria, imprese e operatori, start-up digitali e Istituzioni sanitarie costituiranno occasione per concordare la modulazione dei pesi sulla base delle priorità locali. In tal modo la matrice assumerà la funzione di dispositivo di alfabetizzazione idrica costringendo gli attori a negoziare apertamente il valore di servizi ecosistemici e rischi distribuiti, superando la tradizionale opacità con cui vengono prese decisioni su importanti temi che interessano la comunità.

Perché le sinergie individuate si traducano poi in progetti finanziabili occorre agganciare ogni indicatore a una risorsa finanziaria locale, regionale o statale o reperibile attraverso la fornitura di servizi ecosistemici, sempre tenendo a mente che perdite di rete, chilowattora termici recuperati dalle acque reflue e chilogrammi di nutrienti sono comunque monetizzabili. La matrice diviene così anche uno 'strumento di valutazione economico-finanziaria 4R-SDG' che può convertire benefici ambientali e sociali in flussi di cassa, facilitando l'uso di 'certificati bianchi e verdi', tariffe dinamiche o contratti di prestazione climatica sul modello dell'Energy Citizenship Contract sviluppato dal progetto H2020 – GRETA (Boeri et alii, 2024). In tal modo la dimensione etica della matrice, fondata sul redistribuire benefici e costi, si intreccia con la sostenibilità finanziaria, precondizione per superare la fase pilota e scalare gli interventi. Nella sua attuale formulazione concettuale la matrice multi-driver non è esente da





limiti intrinseci che possono tuttavia costituire linee di ricerca per renderne più robusta l'affidabilità operativa. Due direzioni appaiono particolarmente promettenti.

La prima riguarda l'affinamento dei pesi e dei coefficienti che sostengono i calcoli della matrice; finché l'intensità carbonica di un indicatore o il fattore di vulnerabilità sociale resteranno stimati su valori medi di letteratura, il risultato finale continuerà a risentire di incertezze che possono amplificare o attenuare i compromessi tra gli SDG. Occorrono dunque campioni di dati localizzati – ottenuti con monitoraggi in situ e campagne socio-economiche – per costruire funzioni di 'taratura territoriale' capaci di restituire l'eterogeneità climatica, idrologica, sociale ed ecosistemica dei contesti urbani. In quest'ottica future ricerche potrebbero indagare come la matrice reagisca quando i coefficienti vengono appresi da algoritmi di machine learning addestrati su serie temporali di sensori microclimatici, dati catastali, indici di deprivazione e tracciati di mobilità, ecc.

La seconda direzione riguarda la verifica longitudinale degli impatti; la matrice fotografa uno scenario statico pre-intervento e lo può confrontare con un ipotetico post-intervento; occorrerebbe però sviluppare nella sua versione digitale una funzione di retroazione che aggiorni gli indicatori durante l'esercizio dell'infrastruttura, registri variazioni sensibili prestazionali e riveli effetti inattesi che possono emergere solo nel medio periodo. Una linea di ricerca futura potrebbe dunque consistere nello sviluppo di moduli che tengano conto dell'intero ciclo vita degli elementi (viventi e non) del sistema idrico, degli scenari di cambiamento climatico e delle dinamiche sociali e immobiliari, trasformando la matrice in uno strumento di monitoraggio continuo e di manutenzione adattiva.

Resta aperto infine il nodo della trasferibilità; la matrice è concepita per i contesti urbani dell'Europa mediterranea, ma dovrà dimostrare di saper dialogare con le specificità di regioni monsoniche o subsahariane, dove la stagionalità delle piogge, l'informalità insediativa e l'esiguità di serie storiche attendibili di dati pongono sfide aggiuntive. La costituzione di una rete di Living Labs internazionali – in cui città di climi diversi testino la matrice su tetti verdi, corridoi blu-verdi e sistemi di fitodepurazione – costituirebbe un banco di prova decisivo sia per calibrare gli indicatori sia per valutare quanto i 'pesi' attribuiti localmente agli SDG riescano a catturare i gradienti di vulnerabilità sociale su scala globale.

Lungo questi assi di ricerca si giocherà la maturazione della matrice da schema concettuale a strumento analitico di supporto alle politiche urbane e la sua utilità per orientare la transizione idrico-climatica, non come sommatoria di tecnicismi, ma come processo adattivo in cui la scienza dei dati, la progettazione sistemica e una governance responsabile della città mirano sinergicamente al raggiungimento degli obiettivi dell'Agenda 2030.

Oltre l'ingegneria: frontiere emergenti per il progetto urbano e ambientale delle città temperate | L'Economia circolare dell'acqua si propone come paradigma risolutivo di molteplici crisi urbane, ma il suo utilizzo dipenderà sempre meno dall'affinamento dei dispositivi tecnici – ormai ampiamente disponibili – e sempre più dalla capacità di affrontare tre nodi strutturali, spesso trascurati dal dibattito internazionale.

Il primo nodo riguarda la trasparenza della gestione e della tariffazione: recuperare calore dai reflui o estrarre nutrienti come fertilizzanti richiede il monitoraggio capillare dei flussi e la gestione di grandi quantità di dati. Pur essendo le infrastrutture idriche di proprietà pubblica, le tecnologie digitali sono solitamente gestite da società di servizio private: senza la garanzia di un costante controllo della gestione dei dati da parte del settore pubblico, il rischio è che gli stessi possano essere manipolati per generare profitti non dovuti, riproponendo le dinamiche dell'Hydro-social Contract descritte da Swyngedouw (2004). L'innovazione non può quindi esaurirsi nell'installazione di dispositivi o impianti, ma è necessario vincolare a un codice etico chi 'governa' l'infrastruttura digitale, chiarire come la trasparenza dell'informazione tuteli l'utenza e se le tariffazioni siano proporzionate ai costi di gestione.

Il secondo nodo riguarda il mito che 'la tecnologia possa azzerare l'impatto ambientale'; la promessa di chiudere cicli e azzerare scarti può indurre l'illusione di infinita rigenerabilità delle risorse, occultando i limiti termodinamici e gli impatti delle stesse tecnologie 'pulite': la produzione di idrogeno, così come la dissalazione, se alimentata da fonti di energia rinnovabili richiede grandi superfici per gli impianti, mentre i materiali high-tech hanno un'elevata impronta ambientale, dalla fase di estrazione della materia prima alle attività di produzione. A tal riguardo Wiedenhofer, Haas and Haberl (2023) rilevano che la 'circolarità totale' è un impossibile fisico; l'etica progettuale deve quindi rimanere vigile, riconoscendo l'esistenza di scarti non eliminabili e di confini ecologici non negoziabili.

Il terzo nodo infine è la temporalità della trasformazione: strategie che funzionano su orizzonti decennali possono generare emissioni iniziali o investimenti elevati e picchi tariffari che confliggono con l'urgenza sociale del momento. La letteratura sulle transizioni invita a valutare non solo lo stato finale, ma anche la distribuzione di costi e benefici nel tempo (Heffron and McCauley, 2018): ciò si traduce nella necessità di introdurre criteri di 'equità intertemporale' nei modelli LCA e nelle analisi costi / benefici, andando oltre la consolidata attualizzazione finanziaria. A tal proposito sono da segnalare alcuni studi che hanno dimostrato come l'investimento in strategie proattive agli eventi climatici estremi produca benefici dieci volte superiori ai costi necessari per ritornare alla normalità dopo l'emergenza: spostare gli investimenti al pari degli incentivi fiscali e finanziari verso la prevenzione è dunque non solo eticamente doveroso, ma economicamente vantaggioso (Frantzeskaki et alii, 2019).

In questo quadro il contributo originale che le discipline dell'Architettura possono offrire non è l'ennesimo prototipo di tetto blu-verde, quanto evidenziare le tensioni socio-ecologiche che tali dispositivi portano con sé. Progettare la circolarità non equivale a ottimizzare un 'sistema tecnico', ma a costruire una continua materializzazione di valori pubblici: governance trasparente, distribuzione equa dei rischi, riconoscimento dei limiti biofisici e rispetto delle temporalità sociali. Se queste dimensioni restano marginali i chilometri di condotte intelligenti o i ge-



Fig. 26 | 'Step Up on Vine', a rooftop tower farm in Hollywood recognised as a LEED Platinum-certified, solar-powered shelter for the chronically homeless. The aeroponic roof farm supplies tenants with about half a tonne of healthy food annually (source: agrotonomy.com).

melli urbani più sofisticati produrranno soltanto l'ennesima replica delle infrastrutture idriche novecentesche, mentre dando loro un ruolo centrale la città potrà davvero passare da 'nodo dissipativo' a 'motore di rigenerazione'. L'attuazione non è più questione di 'se' la tecnologia è pronta, ma di 'chi' decide, 'per chi' e 'fino a che punto' siamo disposti a cambiare il nostro modo di vivere con l'acqua.

Guardando oltre la contabilità di metri cubi e tonnellate, il trinomio decentralizzazione / fitodepurazione / coltivazione aeroponica suggerisce che la mitigazione climatica urbana dovrebbe agire sul continuum edificio / isolato / quartiere: non basta disseminare dispositivi isolati, ma occorre mettere in relazione i flussi affinché il refluo trattato su un tetto diventi umidità disponibile al filare alberato della strada sottostante e il drenaggio di quest'ultimo ricarichi il corpo idrico di quartiere. Si struttura così una logica relazionale che coincide con quella della 'città dei 15 minuti', nella quale la prossimità funzionale – abitazione, trasporto, lavoro, servizi, verde, produzione alimentare e gestione dell'acqua entro una distanza pedonale o ciclabile – è assunta come principio fondativo; il metabolismo idro-climatico locale diventa quindi parte integrante dell'accessibilità quotidiana, non infrastruttura remota e invisibile.

Il quartiere si configura come un 'organismo omeotermico' grazie a costanti feedback locali: l'evapotraspirazione abbassa la temperatura dell'aria, riducendo la domanda di climatizzazione e quindi le emissioni di CO_2 che avrebbero ulteriormente aumentato la temperatura terrestre. È un circuito virtuoso che trasforma l'isola di calore in pompa di vapore e che, se ben strutturato, può spingere la temperatura di bulbo umido sotto le soglie di pericolo per la salute umana, superate sempre più spesso nei Paesi del Mediterraneo.

Al contempo la maggiore disponibilità di suoli umidi e canopie crea micro-habitat che alimentano catene trofiche urbane, rafforzando gli ecosistemi e contrastando la perdita di biodiversità causata dal tessuto costruito. Ne risulta un quartiere-giardino 'spugna' autosufficiente che, aderendo al paradigma dei 15 minuti, riduce la necessità di spostamenti motorizzati, con ulteriori benefici in termini di qualità dell'aria e decongestionamento della rete stradale.

In tale prospettiva il 'riciclo dei reflui' non è più un capitolo separato della pianificazione, ma un pilastro della strategia urbana di mitigazione e di adattamento multiscalare: la fitodepurazione degli edifici, le reti blu-verdi degli isolati e i corpi idrici di quartiere costituiscono un'unica infrastruttura metabolica che assorbe calore, chiude i cicli dei nutrienti e preserva la falda. Per trasformare questo enorme potenziale in applicazione reale serve un quadro normativo, fondato sul riconoscimento dei numerosi vantaggi sistemici, che preveda ad esempio l'esenzione dal canone di depurazione per gli edifici a ciclo chiuso, certificati di risparmio energetico per sistemi di fitodepurazione sui tetti e un mercato dei crediti di fosforo e azoto che valorizzi la riduzione di fertilizzanti sintetici. In tal modo l'iniziativa privata troverà un orizzonte di ritorno economico sufficientemente certo da far decollare la filiera e le Pubbliche Amministrazioni locali potranno allinearsi agli obiettivi europei 'Fit for 55' (European Commission, 2021a) e 'Zero Pollution' (European Commission, 2021b), offrendo un percorso operativo per trasformare i reflui in vettori di decarbonizzazione e rigenerazione ecologica.

Se volessimo spingerci oltre e immaginare l'obbligo normativo di realizzare impianti di micro-fitodepurazione e colture aeroponiche sui tetti di ogni nuova costruzione, a prescindere dalla sua destinazione d'uso e tipologia, a ben riflettere è probabile che la prescrizione non verrebbe percepita come un aggravio regolamentare, ma come il nuovo standard igienico-ambientale di una città esposta a stress idrici e termici sempre più frequenti. Perché questa 'normalità' si affermi è indispensabile accompagnarla con percorsi di alfabetizzazione sull'acqua e sul clima (Valenti et alii, 2024), capaci di far comprendere ai cittadini come il tetto che depura e coltiva non sia soltanto una 'macchina impiantistica', ma uno strumento di benessere collettivo che rigenera le risorse invece di consumarle.

Un tale cambio di paradigma impone da un lato la rifondazione degli strumenti urbanistici per superare la mera prescrizione dimensionale e introdurre criteri prestazionali che intrecciano idrologia, energetica e servizi ecosistemici, dall'altro specifici Piani di Resilienza che contabilizzino la capacità di ritenzione idrica e di riduzione dei picchi termici lungo l'intero ciclo vita dell'intervento. È su questo terreno ibrido – in cui normativa tecnica, diritto urbanistico e partecipazione civica si sovrappongono – che le discipline dell'Architettura sono chiamate a reinventare il proprio ruolo, passando dal disegno di involucri passivi alla progettazione di ecosistemi in grado di plasmare il clima e generare energia e salute come veri e propri commons urbani.

Un adeguamento normativo, oltre che mitigare i rischi climatici e idrici, offre l'opportunità di integrare nuove metriche di performance ecologica – indici di ricchezza florofaunistica, continuità degli habitat, capacità di sequestro di carbonio e qualità dell'aria – trasformando la città in una 'risorsa a uso comune' nella quale i flussi di acqua, energia, cibo e biodiversità vengono rigenerati all'interno di un unico metabolismo urbano circolare; in tal modo gli interventi di micro-fitodepurazione e di agricoltura in quota non sono più semplici addizioni verdi, ma dispositivi cardine di una strategia integrata che riconfigura la sostanza stessa del progetto urbanistico, ambientale, architettonico e tecnologico.

Le ricerche sull'economia circolare dell'acqua stanno rapidamente oltrepassando il perimetro dell'ingegneria idraulica per innervarsi nei domini della progettazione urbana, dell'architettura sperimentale e della progettazione ambientale avanzata. Nel decennio che ci attende la sfida non consisterà più soltanto nel far funzionare reti duali o pompe di calore ad alta efficienza, ma nel re-immaginare lo spazio urbano come interfaccia metabolica capace di generare conoscenza, energia, nutrimento e senso estetico attraverso la stessa acqua che oggi trat-

tiamo come refluo. La ricerca – di base e applicata – è chiamata a elaborare paradigmi radicalmente innovativi, alle diverse scale del progetto, superando gli steccati disciplinari e perseguendo letture ibride di materia viva, algoritmi generativi e governance distribuita. Essa potrà sciogliere o stringere i tre nodi citati a seconda della scala considerata e ordinare i temi secondo una progressione di scale rende evidente che nessuna innovazione da sola è risolutiva: solo la sinergia tra diverse discipline – continuamente riletta alla luce della partecipazione e dell'alfabetizzazione idrica – può trasformare la 'nuova normalità' auspicata in un percorso praticabile di rigenerazione climatica e sociale per le città temperate del XXI secolo.

Il punto di svolta perché la circolarità idrica diventi prassi è riconoscere che la scala risolutiva non è né quella urbana, troppo ampia per orientare i comportamenti quotidiani, né quella del singolo edificio, troppo piccolo per governare i processi ecologici. Il vero laboratorio metabolico è il quartiere, inteso come cluster di prossimità nel quale interagiscono infrastrutture blu-verdi, servizi pubblici, filiere alimentari corte e reti sociali. Proprio la dimensione 'intermedia' consente di chiudere i cicli fisici entro tempi di ritorno percepibili dagli abitanti e al tempo stesso di aggregare volumi idrici, termici e finanziari sufficienti a rendere scalabili gli investimenti.

Alla scala del quartiere le discipline dell'Architettura in generale e la Progettazione Tecnologica e Ambientale in particolare possono coordinare e sviluppare ricerche su tre direttrici interconnesse – sperimentazione tecnica, co-progettazione sociale e governance adattiva – che trasformano il tessuto urbano in un vero laboratorio di metabolismo idrico-climatico.

La prima direttrice riguarda la creazione di Living Lab idro-climatici in cui tetti blu-verdi, bacini idrici, corridoi verdi e micro-fitodepuratori vengono monitorati con sensori distribuiti che restituiscono portate, qualità, flussi termici e parametri di comfort in tempo reale. Le esperienze pilota che integrano sensori climatici e display pubblici – il ClimateCafé Malmö e la rete Sentilo a Barcellona – mostrano che rendere visibili in tempo reale temperatura di bulbo umido, qualità dell'aria o volumi di acqua riciclata favorisce un uso più intenso e consapevole dello spazio aperto[22] (Boogaard et alii, 2020).

Su questa base un'agenda di ricerca dovrebbe testare come densità e posizione dei sensori influenzino la modellazione predittiva del gemello digitale di quartiere, verificando se la potenza di calcolo disponibile e la velocità di trasmissione dei dati sia effettivamente in grado di comandare valvole di rilancio e batterie termiche entro cicli di cinque minuti, soglia oltre la quale la mitigazione perde efficacia nei picchi di calore nei Paesi mediterranei (Giustolisi et alii, 2023).

Un fronte ancora poco esplorato è anche quello della modellazione incrociata dei cicli vita: sul presupposto che tetti blu-verdi, fitodepuratori e reti duali hanno cicli vita diversi, la ricerca potrebbe sviluppare algoritmi di programmazione evolutiva che, all'interno del gemello digitale, suggeriscano finestre di retrofit coordinate per minimizzare sprechi di materiali e ridurre l'impronta di carbonio nella fase operativa. L'obiettivo, in prospettiva decennale, è passare dal quartiere come somma di lotti a un distretto omeostatico dove la pianificazione edilizia, la gestione idrica e la finanza climatica dialoghino in uno stesso cruscotto di service-life, offrendo a progettisti e amministratori l'equivalente metabolico dello 'stato di salute' urbano.

La seconda direttrice esplora la dimensione socio-culturale del metabolismo locale, in ragione del fatto che un'economia circolare esiste solo se gli abitanti ne riconoscono il valore e ne sostengono i costi della gestione quotidiana. Studi sperimentali a Singapore dimostrano che, quando i benefici del riciclo dell'acqua vengono mostrati agli utenti tramite dispositivi immersivi (realtà virtuale o aumentata), la disponibilità a sostenere una tariffazione indicizzata alle condizioni micro-climatiche cresce di circa un quarto (Iftekhar et alii, 2019). In questo caso la ricerca futura potrebbe indagare quali strumenti di alfabetizzazione e sensibilizzazione – realtà aumentata, rappresentazioni tattili dei flussi, gaming di quartiere – riescano a legare in modo più efficace il gesto domestico (separare le acque grigie) all'esito urbano (raffrescamento), costruendo metriche di 'coinvolgimento emotivo idrico' che confluiscano negli indicatori di vulnerabilità sociale della matrice 4R-SDG.

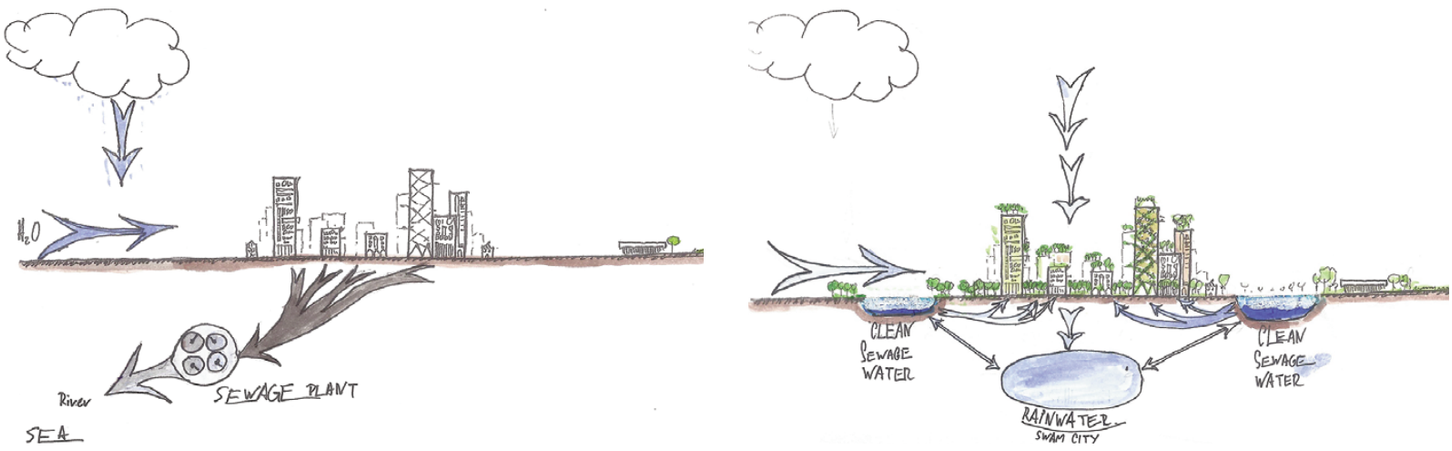
La terza direttrice non può trascurare la governance economica e normativa; se i benefici del riuso diffuso restano esternalità non contabilizzate, l'adozione della pratica circolare stenta; occorre perciò sperimentare tariffe dinamiche che convertano i chilowattora termici sottratti all'isola di calore in crediti tariffari spendibili in servizi di quartiere. La ricerca potrebbe quindi verificare se modelli blockchain con 'contratti smart' che distribuiscono i crediti in tempo reale fra utenti, gestore e Pubblica Amministrazione siano in grado di incrementare la trasparenza percepita e ridurre i contenziosi su qualità e disponibilità dell'acqua di riciclo.

Sviluppare queste linee di ricerca può permettere di dotare il quartiere di una 'cassetta degli attrezzi' che unisce sperimentazione high-tech, alfabetizzazione diffusa e innovazione (concettuale, tecnologica e regolamentativa), trasformando la scala intermedia non in un semplice campo di prova, ma nel vero motore di una transizione idro-climatica che ambisca a essere al tempo stesso socialmente giusta ed ecologicamente solida.

La ricerca accademica e industriale dei prossimi anni sarà chiamata a sviluppare e validare linee di indagine entro un quadro coerente che punti, prima di tutto, al disaccoppiamento fra crescita urbana e consumo di risorse primarie. Si ribadisce che non si tratterà di sommare soluzioni, ma di comporre veri e propri ecotoni culturali, sociali, economici e ambientali nei quali materiali viventi, geometrie generative e crediti finanziari dialogano senza compromessi. Il progetto dovrà integrare nuove metriche nei processi parametrici e l'architettura sarà tenuta a modellare facciate che respirano umidità e condensano rugiada, mentre la progettazione ambientale dovrà estendere la valutazione d'impatto a catene di valore integrate che includono acqua / energia / cibo e servizi ecosistemici.

In questo nuovo ecosistema l'acqua rigenerata, termicamente caricata e simbolicamente celebrata, diventa il filo rosso che cuce insieme il metabolismo urbano e la sua proiezione di futuro, dimostrando che solo un disaccoppiamento effettivo può trasformare la città nel nodo di raffrescamento di una rete planetaria (Figg. 37, 38).

The biosphere is a complex network system in which every biological process is linked to flows of energy and matter, and the entry point for almost all energy is photosynthesis: over more than three billion years, cyanobacteria, algae and plants have refined their ability to convert solar radiation into biomass, laying the foundations for terrestrial food chains (Falkowski, 2008). Countless living creatures continuously decompose the organic fraction produced: up to



Figg. 27, 28 | Water in the city today and water in future cities (credit: G. Mittersteiner, 2025).

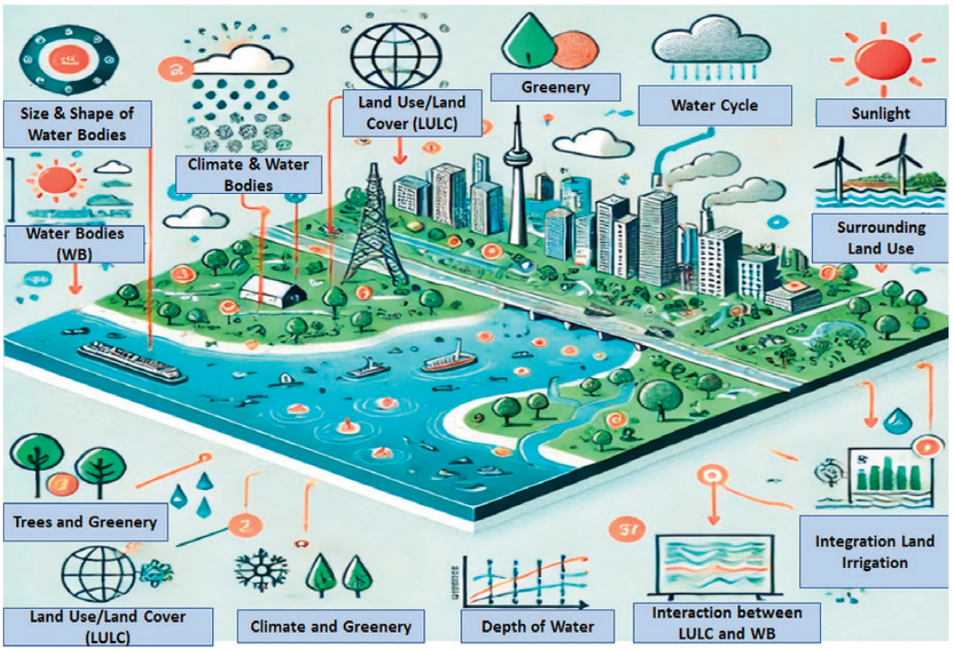


Fig. 29 | Factors influencing the cooling efficiency of water bodies (source: Jandaghian and Colombo, 2024).

100 billion bacterial cells can coexist in one cubic centimetre of soil, mineralising organic matter and returning nutrients to support plant growth, closing bio-geo-chemical cycles such as those of nitrogen, phosphorus and carbon (Chapin, Matson and Vitousek, 2011). The relatively slow pace of these cycles has ensured the stability of ecosystems and a constant supply of 'bioavailable' resources for living beings for millions of years (Steffen et alii, 2015).

However, when humans began to dissociate their well-being from these slow cycles, replacing the logic of transformation with that of extraction and indiscriminate use of resources, the balance was broken. With advances in technical knowledge, humans gradually stopped perceiving themselves as part of a finite ecosystem and began to exploit natural resources at will: the measure of efficiency shifted from the ability to maintain balance to the speed with which a resource could be extracted, transformed, and capitalised upon.

Land, water and energy thus became readily available stocks rather than bonds to be preserved, fuelling the idea that material production could continue without limits. This shift resulted in a context in which, in 2023 alone, global resource extraction exceeded 100 billion tonnes, while the actual recycling rate stagnated below 9% (Circle Economy, 2024), signalling the crisis of the linear model (Fig. 1). Within this scenario, the resilience, sustainability and anti-fragility of an ecosystem emerge as essential parameters of any regenerative proposal.

The relationship between humans and nature has been transformed into one of domination of the former over the latter, generating an economy based on the extraction of raw materials, construction, use and disposal of used products, a model that has its roots in the Industrial Revolution of the 18th century: the primary objective of improving people's lives through growth and profit has found numerous technical solutions to accelerate the 'slowness' of the traditional economy. The warning of John Stuart Mill seems to have been in vain. In 1848, observing the triumph of the Industrial Revolution, he issued a stark warning in his book Principles of Political Economy: an economy that pursued unlimited growth would end up destroying the environment from which it drew its sustenance, while a condition that was at least stationary, based on equity and sobriety, would offer greater guarantees of prosperity over time (Mill, 1848).

Until after World War II, the rhetoric of 'more is better' continued to dominate public debate: it was believed that prosperity could grow without limits and that the environment was an inexhaustible reservoir of resources into which waste could be dumped indefinitely. The first theoretical shift is generally attributed to Kenneth E. Boulding (1966) who, in his essay The Economics of the Coming Spaceship Earth, invited economists to measure growth not in terms of the flow of goods, but in terms of the degree of internal recycling of materials and energy: this was the first systematic elaboration that explicitly criticised unlimited linear development and anticipated concepts that are central today, such as the circular economy and planetary boundaries.

A subsequent development was offered by Meadows et alii (1972) with The Limits to Growth, which, on the one hand, popularised the issue among the general public and, on the other, constituted a milestone in studies of the period. The concepts of 'sustainability' and 'sustainable development' were then promoted by the Report Our Common Future (UN, 1987) and subsequently integrated with new meanings, strategic policy documents and increasingly frequent initiatives involving the construction sector, prompting reflection on the concepts of resilience, degrowth, decoupling, circularity and urban ecology.

The efforts so far have been insufficient to meet the goals of the 2030 Agenda (UN, 2015); nearly two centuries later, Mill's insight reappears with urgent significance, alarming the scientific community and international bodies. Recent results from the workshop sponsored by IPBES and IPCC (Pörtner, 2021) confirm a state of emergency, showing that the depletion of non-renewable resources[1], the climate crisis[2], and biodiversity loss[3] are interconnected processes driven by human pressures and intensified by feedback loops (Fig. 2).

Confirmation of a state of planetary crisis also comes from other sources: the number and duration of droughts have increased by 29% since 2000, compared to the previous two decades[4]; approximately 50% of the world's population (4 billion people) and almost a third of the world's major cities suffer from severe water shortages for at least one month a year, a condition that is set to worsen by 2050[5]. In the same time frame, the crisis will affect between 42% and 79% of global river basins (IPCC, 2023a): exceeding 1.5 °C of average warming, therefore, means compromising key ecosystem functions and triggering potentially irreversible transitions.

The cities of the Third Millennium, where climate crisis, demographic pressure, water stress, and energy demand all converge, are becoming the epicentre of this emergency; hence the ethical obligation to rethink the production of value and well-being without eroding the resources and natural cycles that make it possible.

Within climate policies, one of the concrete strategies is to rethink the urban water metabolism by promoting a new circular water / energy / food paradigm (Fig. 3) that acts simultaneously on water availability, latent cooling and food security. In this strategy, the circular water economy plays a decisive role: it is not just a matter of 'closing' a water cycle, but of rethinking the entire urban metabolism with the technical and natural architectures of 'evolutionary stationarity' as advocated by Mill, activating a condition in which well-being derives from the efficiency of cycles and not from the continuous extraction of resources. However, recognising the value of these approaches is not enough; they must be equipped with a cultural, cognitive and institutional infrastructure that supports their ambition.

At the same time, Nature-based Solutions (NbS) and integrated water / energy / food governance (Ingaramo et alii, 2023; Bologna and Hasanaj, 2023) can constitute the operational arm of the transition, reducing pressure on fresh water and biodiversity, gradually replacing grey infrastructure with hybrid solutions (Valente et alii, 2024) and balancing incoming and outgoing material and energy flows.

In this scenario, water recycling is not an ancillary measure, but a structural component of an urban metabolism capable of regenerating environmental quality and microclimatic comfort through integrated strategies, measures and actions (He et alii, 2021; Ward et alii, 2020). To achieve this goal, a paradigm shift is needed, from 'reactive management', which intervenes ex post on the effects, to 'proactive planning', which addresses stress factors for water resources in advance, building modular and integrated solutions and, in some cases, evaluating the outcomes through transparent and comparable indicators.

This new paradigm is based on the three key elements of resilience, sustainability and anti-fragility, the first understood as the system's ability to absorb shocks and recover functionality, the second as the ability to maintain performance in the long term without eroding natural and infrastructural capital, and the third as the system's ability to improve through learning and reconfiguration.

In light of the above, this paper argues that urban settlements can be transformed from 'hot spots' into 'cooling nodes' within a planetary network, mitigating heat islands and, overall, attenuating their effects on a regional scale. It advocates rethinking the city's metabolism as a technical-ecological architecture capable of integrating resilience, sustainability, and anti-fragility with a twofold objective: on the one hand, to offer a theoretical and operational framework for designing and implementing circular systems that manage water, energy, and on the other, to equip administrators, designers, and researchers with a critical analysis to stimulate scientific debate and develop scenarios and policies aimed at carbon neutrality.

Targeted at urban planning, architecture, and technological and environmental design, the text also aims to 'dialogue' with socio-economic sciences, climate studies, and agricultural sciences, in the belief that only an interdisciplinary approach can grasp the complexity of the water / energy / food relationships and propose a new interpretation of the issue through the connections between the 4R framework (Reduce, Reuse, Recover, Regenerate) paradigm and the triad of resilience / sustainability / anti-fragility. This hybridisation allows us to go beyond a linear interpretation of the water cycle and propose the city as a 'cooling node' capable of transforming heat islands into veritable 'urban evaporation pumps'.

Compared to existing literature, which is characterised by sectoral or exclusively technological approaches, this contribution presents an integrated model that relates hydraulic, microclimatic, energy and social criteria from a critical perspective: in addition to illustrating techniques and good practices, the text highlights power asymmetries, risks of eco-gentrification and environmental compromises, providing tools for deciphering limits and overcoming systemic barriers. The scientific bibliography was selected through systematic research on Scopus, Web of Science and Google Scholar, supplemented by institutional databases (IPCC, EEA, OECD) and examining the period 2000-2025 with keywords, combined in pairs and in English, such as 'circular urban water', 'water metabolism', 'water-energy-food nexus', 'water decentralisation', 'urban heat island mitigation' and 'urban resilience', 'urban anti-fragility', '4R and urban water'.

The 5,718 records identified were subjected to two further filters: 1) analysis of titles and abstracts, with the selection of publications or institutional reports concerning urban or peri-urban contexts and jointly analysing at least two elements among water, energy, food or heat island mitigation; 2) evaluation of peer-reviewed scientific articles or volumes presenting experimental data or quantitative models, while for grey literature those documents that constitute guidelines or policy documents. This ensures a broad but coherent corpus, capable of reflecting the most recent developments in the debate and research without neglecting the grounding and reference texts on the subject.

To demonstrate the proposed thesis, the contribution is organised into several sections. The first section explores the elements that can facilitate the transition from the linear water cycle to the circular 4R framework, highlighting how local flow closure can reduce withdrawals, energy consumption, and temperatures in urban areas. The second section introduces a new 'assessment' framework based on the triad of resilience / sustainability / anti-fragility, which is crucial for evaluating the robustness of networks and techniques under conditions of climate uncertainty; the third section, focused on proactive planning, translates this framework into operational tools that assist in selecting the optimal level of water and energy redundancy.

The fourth section provides an overview of five circular cities situated in different climatic contexts, verifying the transferability of the solutions adopted. The fifth section focuses on the role of water bodies (lakes, canals, and urban basins), interpreted as natural thermal batteries whose synergy with green infrastructure enhances the mitigation of the urban heat island effect. The sixth section explores the potential of urban wastewater, demonstrating how micro-phytoremediation and dual networks transform waste into widespread cooling and fertiliser, offering direct benefits for social housing and food security.

This is followed by a mapping of synergies and trade-offs between the proposed urban metabolism and the 17 Sustainable Development Goals (SDGs), serving as a prelude to the 4R-SDGs matrix designed to make complexity manageable and reduce decision-making conflicts among stakeholders. The paper concludes with a reflection 'beyond engineering', urging architects, administrators, and communities to recognise regenerated water as cultural infrastructure – a driver of equity and a tool for carbon-neutrality policies.

From a linear to a circular water cycle | For centuries, water supply has followed a linear pattern of 'withdrawal-use-discharge', conceived in an era of presumed abundance of the resource. Faced with increasingly frequent water stress and increasingly unsustainable demographic pressures, the linear model is daily revealing its physical and economic limitations, including scarce water availability, copious losses and high energy costs of the supply network, as well as failure to recover nutrients. An approach based on the circular economy, on the other hand, proposes to 'close the loop' by reducing input flows, extending the useful life of water resources and recovering energy and nutrients from effluents.[6]

This perspective is reflected in both the Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020), in which the European Commission has included water among its strategic resources, and the most recent scientific literature, which links water circularity to systemic resilience (Bouziotas et alii 2023; Marques, Pinto and Miranda, 2023). A new design criterion is thus beginning to take shape, 'blue circularity', which is not merely technological: water is a 'renewable raw material' capable of generating environmental, economic and social co-benefits and interfacing with energy and food cycles, in a new logic in which inclusiveness, resilience and circularity are integrated to address the many challenges of the new millennium and contribute to the achievement of the 17 Sustainable Development Goals.

One of the core principles of 'blue circularity' is decoupling, i.e., the ability to develop added value without increasing resource extraction. Applied to water in urban areas, it has the potential to produce growth, attractiveness and quality of life; at the same time, less groundwater has to be extracted, and the construction of new pipelines that bring water from the mountains to the cities becomes unnecessary: recent studies of some Chinese manufacturing macro-regions show that, thanks to more efficient technologies, behavioural changes and recycling, it is possible to move from weak to high decoupling, significantly growing the local economy in less than fifteen years (Gong et alii, 2025).

Day Zero crises – such as those experienced by Cape Town (2018), São Paulo (2014-15) and Chennai (2019), where cities announce the imminent depletion of water supplies – remind us what happens when the circular transition comes too late: the water crisis does not depend solely on hydrological factors, but on a combination of factors such as growth in demand, network losses, dependence on a few surface sources, insufficient storage capacity and delays in decision-making. With this in mind, some administrations have rethought the water cycle by initiating proactive planning, which has become an operational imperative to avoid heavy human, environmental and social costs.

To avert Day Zero scenarios and translate their lessons into concrete action, the operational framework of the so-called '4Rs' (Reduce, Reuse, Recover, Regenerate) must be consistently implemented. Reduction is the hierarchical priority, involving measures to contain both network losses – still above 35% in many cities in southern Europe – and water demand: analyses of water balances produced by the International Water Association show that a set of measures linked to constant monitoring of losses, careful management that differentiates water pipe pressure according to the needs of the neighbourhoods served, and continuous verification of infrastructure efficiency make it possible to replace a reactive model with a 'proactive' one, achieving significant benefits in terms of operating costs, service continuity and water quality (Kwon et alii, 2025).

On the demand side, it has been estimated that the use of taps and shower heads with aerators and dual-flush toilet cisterns can save 20-25% of residential water use and up to 25 litres per person per day in Mediterranean climates (Vinayagam et alii, 2024). These results confirm the importance of the 'first R' of water circularity, which is also the most economical to implement: various experimental evidence has shown that behavioural levers and emotional engagement of users, coupled with tariff measures, efficient devices and new technologies (i.e., ultrasonic meters and cloud platforms that allow domestic micro-leaks to be identified and notifications sent to the user), can reduce domestic consumption in a statistically significant and continuous manner

(Agarwal et alii, 2022; Koop, Van Dorssen and Brouwer, 2019), unlike results typically achieved through prescriptions and impositions by governance (Lee and Jepson, 2020).

Reducing network losses and consumption is therefore the first strategy for any city aspiring to water circularity; however, as long as the entire drinking water demand depends on a single source of supply, reduction alone is not enough. A second complementary step is needed: Reuse, i.e., collecting and treating blackwater and rainwater so that it can be returned to the urban fabric – for irrigation, firefighting, cooling, etc. – or, when necessary, even for drinking purposes through indirect or direct routes.

Reuse is only 'sustainable' and truly effective if it is managed according to the 'fit for purpose' principle: the quality of treatment must be commensurate with the end use, avoiding energy-intensive processes that would unnecessarily increase costs and environmental impact. Empirical evidence confirms this: in Singapore and Los Angeles, under conditions of severe water stress, indirect potable reuse systems now cover up to 40% of total demand (Lefebvre, 2018; Luthy, Wolfand and Bradshaw, 2020); in Europe, the Barcelona Living Labs have shown that dual neighbourhood networks meet 35% of water needs, mitigate pressure peaks on the main pipeline and stabilise the price of water at €0.82/mc, which is significantly more affordable than the alternative based on large desalination plants.

The versatility of the solutions available allows water reuse to be scaled from the neighbourhood to the individual building. Blue-green roofs equipped with smart tanks – programmed based on weather forecasts – guarantee greater storage volumes than traditional counterparts, transforming each roof into a multifunctional micro-reservoir.

However, technology does not thrive on energy balances alone: its success is determined by social acceptability. A survey of over a thousand families in Singapore shows that confidence in reuse rises significantly when the intervention is supported by institutional branding campaigns and online platforms that publish water quality parameters in real time (Iftekhar et alii, 2019). A public narrative of the cycle, based on clear operational thresholds, can therefore guide daily practices and legitimise complex plant choices such as indirect potable reuse (Warner and Meissner, 2021; Luan, 2010).

In California, the definition of 'fit for purpose' regulatory protocols and the implementation of the Groundwater Replenishment System project have enabled Orange County to meet the needs of approximately 600,000 residents with indirect potable reuse. Looking ahead, the convergence of demand reduction and targeted reuse will enable cities to diversify their sources, relieve pressure on aquifers and make their water metabolism more resilient, efficient and equitable (Lazarova et alii, 2025).

The third pillar of water circularity is Recover and comes into play when the resource has already been reduced in consumption and reused in urban cycles: sewage, which is usually 'removed', should no longer be considered waste to be disposed of, but a source of energy and nutrients. The change in perspective is clear as we are moving from traditional treatment plants to Water Resource Recovery Facilities (WRRF), true hubs capable of extracting heat and producing biogas and low-emission fertilisers.

The first benefit is the recovery of latent heat. Wastewater enters the sewer system at an average temperature of 8-12 °C higher than the environment; by conveying this heat through plate collectors installed on pipes with a diameter greater than 600 mm, between 450 and 600 kWh per year per linear metre can be obtained, enough to cover approximately 20% of the heating requirements of a medium-sized residential building.

On the bioenergy side, anaerobic digestion of sludge produces biogas, but the best results are achieved when sludge is co-digested with the organic fraction of municipal waste: studies by Yoshida, Gable and Park (2012) and Tonanzi et alii (2021) show a significant increase in biogas yield, sufficient to make the plant self-sufficient in terms of electricity and heat. They demonstrate that co-digestion saves 189 kg CO_{2eq} per tonne of compost and halves production costs.

Recovery ultimately means returning nutrients (phosphorus, nitrogen and carbon) from dry sludge to the cycle, reducing the eutrophic load downstream and providing a fertiliser with almost zero emissions. Closing the nutrient cycle also reduces dependence on mineral fertilisers (produced industrially) and contributes to food security in peri-urban areas. In summary, the Recover pillar transforms a cost centre – the wastewater treatment plant – into a value generator: it produces thermal and electrical energy and raw material for fertiliser, contributes to urban decarbonisation and links water to the city's energy and agricultural metabolism.

The fourth pillar, Regenerate, completes the '4R' framework by linking the technical water cycle to its ecological cycle. While Reduce, Reuse and Recover mainly focus on the 'how much' and 'how' of the resource, Regenerate shifts the focus to 'where', bringing water back into the urban organism and restoring its ecological, climatic and social functions. The key idea is that an efficient city is not enough: to be truly circular, it must also reactivate permeable soils, riparian corridors, recharge basins and biodiversity, so as to transform water from a linear vector to a complex circuit in which infiltration, phytoremediation and evaporation simultaneously contribute to heat, nutrient and carbon balances.

In particular, from the perspective of recycling and bio-circular supply chains, native species such as common reed ('Phragmites australis'), broadleaf cattail ('Typha latifolia') and rush ('Juncus effusus'), whose roots create an ideal habitat for microorganisms that degrade pollutants and absorb excess nutrients, improving water quality. These species can be periodically harvested and transformed into fibres for insulating panels and biodegradable textiles, thus closing the loop between water purification, ecological regeneration and local production of biomaterials (Morpurgo, 2024).

The examples of Seoul, Wuhan and Copenhagen illustrate how water regeneration can translate into tangible benefits. In Seoul, the demolition of an elevated road allowed the Cheonggye stream to be restored to a river corridor nearly six kilometres long (Figg. 4-7) capable of retaining 120,000 cubic metres of rainwater. Within a radius of half a kilometre, the average air temperature has dropped by 1.5 °C, and fish biodiversity has increased fivefold in just ten years (Kulkarni, 2025). In the Guanggu district of Wuhan, the Sponge City programme, also adopted in other cities in China (Figg. 8-10), has implemented blue-green roofs, permeable paving and open-air rainwater collection channels over approximately 30% of the urban area: runoff has decreased significantly, while post-monsoon peaks have fallen by several centimetres, preventing flooding in several homes (Peng and Reilly, 2021).

Finally, in Copenhagen, the Cloudburst Master Plan has transformed oversized roads into blue-green boulevards which drain up to 30 mm of rain in half an hour into retention parks used as recreational spaces (Figg. 11-13). This and other solutions included in the Plan are estimated to generate a total socio-economic surplus of 5 billion Danish kroner over 100 years, compared to a scenario in which the city takes no action (City of Copenhagen, 2014).

Although distant in latitude and scale, these cases share three recurring elements: they shift the focus from a single project to a widespread ecological-urban network; they treat water as an ally rather than a threat, allowing it to expand, infiltrate and cool; and finally, they generate added value – environmental, social and economic – that far exceeds the initial investment. In the language of urban metabolism, this means reducing water inputs and the energy spent on pumping, but above all reducing entropic outputs – flooding, sensible heat and pollutants – transforming the city into a 'multi-domain' system in which water, energy and vegetation interact harmoniously, generating climatic well-being, public health and sustainable economic development: the city thus increases its functional resilience by strengthening an 'autopoietic' metabolism.

The strength of the 4R framework lies in its apparent hierarchical simplicity, but its weakness lies precisely in its linear sequence: Reduce, Reuse, Recover and Regenerate describe a logical operation, but practice in urban areas shows that the four pillars are often simultaneous, sometimes even centrifugal.

Reducing network losses, for example, can decrease the minimum flow rate required for a sewage energy recovery plant to operate under negative pressure, limiting the cost-effectiveness of Recovery; similarly, pushing for Reuse through dual networks can subtract nitrogen and phosphorus flows, making the circular fertiliser supply chain more expensive. As a result, circular design based on the 4R framework requires management capable of assessing, above all, hydraulic, energy and biochemical trade-offs in real time, for example, through post-crisis audits and periodic updating of indicators capable of transforming shock into learning opportunities and push resilience towards anti-fragility.

The design challenge is therefore not to 'follow' the individual Rs in sequence, but to balance them dynamically according to the hydro-climatic context and, above all, the local socio-economic geography. In this sense, the true indicator of a project's maturity should not be how much water it regenerates, but how many actors and levels of governance it can coordinate and for how long. A blue-green roof only performs if the condominium agrees to install 'smart valves', if the water manager monitors the data through a platform and if the local administration assigns incentives and rewards to the ecosystem service. Without an integrated urban management system that is aware of the trade-offs and redistributes benefits, costs and responsibilities, the 4Rs risk remaining mere operational solutions: attractive on the surface but fragile at the first sign of crisis.

An underestimated issue concerns the trade-offs that can result from specific actions: each R acts on grey energy, soil, financial capital, and social capital, and there is no zero-impact solution. The most innovative research is attempting to reduce side ef-



Fig. 30 | Benjakitti Forest Park in Bangkok offers ecosystem services including cooling urban temperatures and managing rainwater to adapt to changing monsoon patterns; it also exemplifies a nature-based solution for urban wastewater treatment, supports native species, and serves as a public recreational space (source: worldlandscapearchitect.com).

fects, but it will never eliminate them. From this perspective, therefore, we need to move from a logic of 'damage reduction' to one of 'equitable redistribution of benefits'. In this regard, Ness (2024) warns that any increase in efficiency can result in a 'rebound effect' if there is no absolute cap on consumption: transposed to the urban water cycle, this means combining water-saving technologies with a per capita limit and redistribution mechanisms, so that reclaimed water does not fuel new demand and its distribution can be rebalanced.

Complementing this systemic vision, a second perspective reverses the apparent order of the 4Rs: when the city reintegrates ecosystems into its fabric, Regenerate becomes the prerequisite that triggers and simplifies the other Rs. Reduce and Reuse become almost automatic consequences, because the population recognises the intrinsic value of water and accepts changing its habits, while Recover focuses on smaller and more predictable volumes. In other words, Regenerating the city is the prerequisite for regenerating its flows of matter and energy.

In this dual perspective, the future of water circularity in urban areas will therefore not depend on any additional Rs that may come into play, but on cultivating the ability to manage the tensions between the existing ones, transforming technical infrastructures into ecological, cultural and social devices: only in this way can we move towards a water cycle that 'helps' us to redefine the form and meaning of the contemporary city.

Resilience, sustainability and anti-fragility of urban water supply | Having highlighted the importance of the 4R framework for identifying 'which solutions to adopt', we shift our focus to another question, namely 'with what capacity to resist, endure and improve will we be able to evolve the 4Rs over time'. It is within this perspective that the triad 'resilience / sustainability / anti-fragility' goes from being a slogan to becoming a real driving force for urban water supply projects, offering an integrated lens through which to evaluate networks, technologies and governance throughout the entire urban water cycle.

Understanding how they influence each other and with what tools they can be measured and designed means moving from a simple list of good practices to the construction of a true 'ganglia system' of urban supply, capable of anticipating critical thresholds, distributing benefits equitably and evolving after each stress.

In the lexicon of environmental design, the terms 'resilience', 'sustainability' and 'anti-fragility' take on partially different definitions and metrics, but converge in guiding spatial and technological choices; today, they constitute the preferred conceptual triad for deciphering an era marked by a polycrisis: far from being interchangeable slogans, they represent complementary lenses that allow us to grasp the complexity of water / energy / food interactions and the infrastructures that support them.

In conditions of increasing climate variability and uncertainty, resilience does not simply mean 'returning to the initial state', but rather the ability of urban socio-ecological systems to absorb shocks and reorganise themselves while maintaining their essential processes, functions, identities and feedback loops (Folke, 2016; Folke et alii, 2010, 2021). In urban water infrastructure, resilience is expressed along three operational dimensions: structural (redundancy and robustness of components), functional (ability to maintain essential service levels during and after the event), and organisational (coordination between various operators and managers, procedures, updates).

The scientific literature reports a variety of assessment frameworks, based simply on risk or on multi-criteria parameters. This perspective includes approaches such as Safe & Sure, which combines risk management, reliability and recovery processes (Butler et alii, 2014), or conceptual frameworks that integrate political-regulatory, economic and environmental dimensions (Bertilsson et alii, 2021), or even interoperability devices between water systems and other urban subsystems (Vercruysse, Dawson and Wright, 2019). However, Asghari et alii (2023), in their critical review of methods, highlight the need to com-

bine holistic and technical-performance readings – the latter focusing on indicators of network robustness, flow redundancy, recovery times and acceptable losses – to translate resilience from principle to operational tool.

Sustainability, while incorporating resilience, broadens the horizon of service to the long term with the aim of avoiding the loss of natural and artificial capital, focusing on the dynamic balance between resource extraction and regeneration within planetary boundaries (Rockström et alii, 2009), enhancing end-of-use efficiency, containing physical losses, diversifying resources (including unconventional ones) according to the 'fit for purpose' logic, reducing energy consumption and promoting equitable access. In conditions of climate variability, sustainability requires decoupling water demand and economic growth, redesigning the whole urban metabolism (including food, water, energy, raw materials; Fig. 14) with consistent and transcalar technical and regulatory tools (Capodaglio, 2024). For example, at the basin and city level, the integration of strategies for drought and flooding – no longer treated as separate risks – is a key step towards long-term resilience (Ward et alii, 2020).

Finally, anti-fragility introduces a paradigm shift because it postulates the possibility for systems not only to withstand shocks, but to improve as a result of them, drawing on the experience of local failure in overall growth to reduce the extent of future systemic losses. It therefore values the study of possible scenarios, local experimentation and adaptive learning, which are particularly important aspects of water planning and management (Taleb and Douady, 2013; Blecic and Cecchini, 2017, 2020; Babovic, 2018).

Technological modularity, gradual decentralisation (recovery plants and multiple networks at neighbourhood, block and building level), selective redundancies at critical nodes and real-time informative feedback (through sensors) make it possible to avoid cascading failures in interdependent networks and to scale efficiency and innovation without system blockages. In spatial terms, this approach evokes a porous and adaptive city, in which blue and green infrastructure are integrated with distributed storage and treatment devices, producing microclimatic co-benefits (for humans and nature) and reducing the energy requirements of buildings (Beceiro, Brito and Galvão, 2020). From this perspective, anti-fragility does not simply coincide with increased redundancy: it manifests itself in the ability of widespread, modular and maintained systems to learn from extreme events, reallocate benefits and progressively reduce asymmetries in exposure and vulnerability between neighbourhoods.

With regard to the factors of time and space, for the comparability of the solutions to be implemented, anti-fragility assesses robustness and reliability, two important requirements of the urban water system. The robustness of the network can be described as the ability to supply a significant portion of demand even during events that are severe in terms of duration and intensity; in stress tests, a reasonable design objective could be to keep at least 75% of users in service even in the event of a specific failure or linear break in the pipeline, restoring the level of service in a time proportionate to the criticality of the context and minimising service loss. Reliability, i.e., the ability to maintain expected performance standards, must be accompanied by a qualitative assessment of vulnerability, understood as the system's propensity to functional collapse when hit by cascading shocks.

Resilience, sustainability and anti-fragility are therefore not linear stages in the economic development of a community, but contribute to the same horizon, since resilience ensures immediate stability, sustainability guarantees continuity over time, and anti-fragility encourages the transformation from crisis into opportunity for evolution. When integrated, they outline a strategy capable of combining prudence and development, memory and perspective, local and global.

Only through policies that reward diversity of solutions, functional redundancy and the capacity for continuous learning is it possible to aspire to water-secure, economically prosperous and culturally resilient communities; and it is precisely in this aspiration that the triad reveals its 'existential' rather than technical nature, reminding us that caring for water is ultimately equivalent to caring for life.

These three concepts applied to water infrastructure converge in the design of polycentric, modular and redundant networks, capable of combining savings and recycling with microclimatic and social functions with direct effects on cooling demand and health (IPCC, 2023b). In this sense, the city is not only a place of resource consumption, but also a metabolic device capable of producing ecosystem services – flow regulation, filtration, groundwater recharge, evapotranspiration, cooling, increased biodiversity – which scientific literature has linked to well-being and health (Costanza et alii, 1997; Hartig et alii, 2014; Elmqvist et alii, 2018). The outcome in this case is also a paradigm shift from 'project design' to 'service design', where blue-green devices, interfaced with grey networks and digital technologies, become part of the lexicon of the contemporary city. However, it should be noted that there are barriers to the joint adoption of the three paradigms. A first obstacle is determined by the complexity of the issue and the need for different skills to define a set of indicators that are not easily superimposable: aligning annual indicators (typical of resilience), thirty-year targets (sustainability) and iterative trial-and-error logic (anti-fragility) can generate conflicts that operators and managers struggle to resolve (Kaya et alii, 2025).

The current dependence on centralised water networks exacerbates the situation: 20th-century aqueducts and plants are locked-in capital, the amortisation of which pushes towards refinancing the existing rather than investing in scalable modules, compromising the selective redundancy required by resilience (Horton, 2025). On the economic front, systemic benefits (first and foremost the reduction of collective risk) are not yet factored into consumption pricing mechanisms, rendering business plans for anti-fragile solutions ineffective (US Water Alliance and Stantec, 2023).

At the institutional level, there is a fragmentation of responsibilities between water, energy and civil protection, resulting in longer decision-making times and a lack of integrated performance standards. Digital barriers, on the other hand, mainly concern cybersecurity and interoperability: IoT sensors expose systems to attacks that many operators are not pre-

Naples Metropolitan Region [inhabitants]	**Drinking water consumption per inhabitant per day [l/d]**	**Fertilizer water obtained [l/d]**
2,960,000	200	592,000,000
Road network [m]	A tree every 3 meters (considering both sides of the road)	**Number of trees**
1,064,000	3	**354,667**
	⬇	
Water consumption of a tree in summer [l/d]	Water consumption of 354,667 trees [l/d]	**Remaining fertilizer water [l/d]**
100	35,466,667	**556,533,333**
Water consumption of gardens or raised beds on roofs in summer [l/d]	**Total size of the gardens and raised beds that can be irrigated [m²] (net area)**	
7	**79,504,762**	
or waterconsumption of aeroponic roofs [l/d]	**Total size of aeroponic roofs that can be irrigated [m²] (net area)**	
5	**111,306,667**	

Tab. 1 | Maximum calculation of how many trees and gardens can be irrigated with treated wastewater in Naples (Italy); the potential of the sponge city has not been included (credit: the Authors, 2025).

Cooling capacity per liter of evaporate Water		0.68	kwh
Calculation of the cooling capacity of trees			
Number of trees	Evaporation water [l/d]	Cooling capacity / day	
	100 litres / 1 Tree per day		
354,667	35,466,667	24,117,333	kWh
		24.12	**GWH**
Calculation of of the cooling capacity of roof gardens or aeroponic agricultural systems			
	Evaporation water [l/d]	Cooling capacity / day	
	556,533,333	378,442,667	kWh
		378.44	**GWH**
The total potential cooling capacity of domestic wastewater in Naples		**402.56**	**GWH**

Tab. 2 | Cooling capacity of wastewater in Naples (credit: the Authors, 2025).

pared to deal with (Goodwin, 2024), while the proliferation of proprietary platforms can lead to blockages and technological gaps (Salih et alii, 2025).

On the social front, equity remains unresolved: without compensation funds, the costs of modularity and redundancy are passed on to bills, penalising the most vulnerable users. Furthermore, anti-fragility requires tolerance for small, controlled failures, but Public Administration often fears reputational damage from any voluntary service interruption, thereby reducing its willingness to experiment.

Despite the significant barriers, the triad of resilience / sustainability / anti-fragility cannot remain a manifesto of principles, but must translate into decisions capable of governing climate variability and uncertainty, which have become structural. It is, therefore, necessary to move from describing complexity to building tools that anticipate its effects, rethinking project hierarchies, investment schemes and regulatory logic. In concrete terms, this means replacing the traditional static water system with modular solutions, integrating probabilistic models that include scenarios of change over several decades, and linking water objectives with energy, food, environmental, ecological and health objectives, so that the same intervention can guarantee continuity of service, reduce energy demand and improve ecosystem quality.

Intelligent redundancy, local experimentation and adaptive learning should thus become the key criteria in deciding whether to maintain, adapt or decommission existing infrastructure: the cultural leap is clear, and it is precisely this reversal of perspective – from concept to practice, from presumed stability to dynamic risk management – that brings 'proactive planning' into play, in which time itself becomes a project variable and uncertainty a starting point.

Proactive planning between time and uncertainty | In the field of urban water management, the three dimensions of resilience, sustainability and anti-fragility are therefore inevitably intertwined: water infrastructure designed in the last century is no longer adequate in contexts where 'fifty-year rainfall events' have become more frequent and alternate with prolonged periods of drought, both of which are anything but predictable. Uncertainty is, therefore, the 'new normal': in the collective narrative, we must overcome the oxymoron of 'returning to normal' and embrace the vision of a 'new normal' where change is constant and where quality of life depends on our ability to live creatively with uncertainty.

Civilisations of the past have prospered or collapsed depending on their relationship with water; archaeological evidence of collection and distribution systems in arid regions suggests that today's challenge should be addressed by reviving traditional systems and updating them with the best available technologies for recovery, treatment, distribution and digital monitoring (Angelakis et alii, 2021). In this context, water scarcity must be distinguished from drought, as the former arises from excessive demand and insufficient supply due to infrastructural or institutional constraints, while the latter is a climatic and exogenous phenomenon.

Reducing dependence on already stressed surface and groundwater sources requires a mosaic of different solutions that must be integrated with mitigation and adaptation strategies capable of recognising the polycentric nature of risk (Moser and Ekstrom, 2010) through a holistic approach in which, in addition to diversifying sources, it is necessary to prioritise the interconnection between subsystems and the use of green infrastructure, capable of providing additional ecosystem services compared to traditional grey infrastructure. Research on water security (Bakker, 2012) shows that vulnerability does not depend solely on the amount of water available, but is primarily linked to the institutional capacity to manage its variability. From this perspective, proactive planning must take time as a project variable: in a context where hydrological shocks (droughts and heavy rainfall) are more frequent, complex and unpredictable, plans must be developed using tools, matrices and scenarios that test the stress on the system through sensitivity analyses and approaches based on realistic options, to decide when, how and how much to invest in additional capacity and flexibility (Asghari et alii, 2023; Coccia, Cipolletti and Corvaro, 2024).

Waste water – Cooling capaity / day	402.56	GWH
	402,560,000	kwh
5 kw airconditon / day (24 hours)	120	kwh
Number of airconditions	**3,354,667**	**Pieces**

Tab. 3 | Cooling capacity in Naples: domestic wastewater and air conditioning systems (credit: the Authors, 2025).

The use of urban digital twins that integrate hydraulics, air quality, microclimate and energy can enable ex ante assessment of the effects of dual networks, neighbourhood basins and NbS, as well as the impacts on urban heat islands and cooling loads. At the same time, the digitisation of the water cycle – with sensors, ICT and IoT – can enable the 'water-smart city' paradigm, in which real-time data connects hydraulic management, quality and predictive maintenance. The interscalar dimension thus becomes an integral part of proactive planning, structuring synergies between works at the basin, city, neighbourhood and building scales (Bertilsson et alii, 2019; Oberascher et alii, 2022).

Although metropolitan cities still need centralised systems to benefit from economies of scale, hybridisation with decentralised neighbourhood, block or building solutions can reduce dependence on a small number of backbones, distribute the water stress of the network and make it less costly to adapt to the standards required by the current water and climate emergency. Plug-and-play modules and sensors, as well as adaptive management capable of incorporating multiple scenarios and iterative corrections – as proposed in the water governance transition models outlined by Pahl-Wostl (2007) – make it possible to address the 'new normal' by redirecting flows, isolating failures and learning from mistakes, characteristics typical of resilience that translates into anti-fragility.

From an analytical perspective, alongside qualitative matrices and risk management-oriented checklists, estimates of area retention, increased evapotranspiration and reduced air and soil temperatures during critical hours cannot be overlooked, as they support hydrological and thermo-radiative modelling. In recent years, Global Resilience Analysis has also become established, a method which evaluates the response of the distribution network to multiple failure scenarios with synthetic metrics of residual functionality and recovery times (Diao et alii, 2016). When integrated into a planning / operation / learning cycle, these tools allow alternative configurations to be tested under stress and the optimal level of redundancy to be calibrated.

At the urban-territorial level, composite resilience indices support the localisation of blue and green infrastructure and the prioritisation of interventions (Bertilsson et alii, 2019), while frameworks with stakeholder validation help to recognise the contribution of NbS to functional resilience and adaptive capacity (Beceiro, Brito and Galvão, 2020): their adoption as service infrastructure (Corradi et alii, 2024) makes it possible to simultaneously achieve the water, energy and climate objectives of the 2030 Agenda within a single evaluation matrix, making performance traceable and verifiable over time (Kabisch et alii, 2017; Dumitru and Wendling, 2021; IPCC, 2023b). In this context, the transition from prescriptive to performance standards allows for innovative solutions and empowers stakeholders, while maintaining consistency with health and environmental safety objectives.

Finally, it should not be overlooked that urban water infrastructures are primarily socio-technical systems, since the physical components (plants, networks, storage basins, etc.) are accompanied by regulations, processes, practices and behaviours: the resilience of the water system also depends on procedures, roles, interoperability and the ability to coordinate actors – citizens, politicians, municipal technicians, water and electricity network operators, civil protection and planners – before, during and after the event (Vercruysse, Dawson and Wright, 2019).

In this regard, the paths to user acceptance of reuse and the methods of governance involving citizens are relevant: literacy on the value of water and water availability, transparency of communication and treatment / reuse procedures, as well as responsible neighbourhood management programmes, reduce the distance between users and the technical system, optimising the efficiency of the water system, widespread maintenance, predictive control and rapid response to extreme weather conditions (Luan, 2010; Tortajada, 2006). All these factors consolidate the effectiveness of the measures over time and reduce their 'operational' costs (Dumitru and Wendling, 2021; Dieperink et alii, 2023); in this way, infrastructure should not be seen as a plant system but as an 'urban institution' whose resilience reflects the quality of the social relations that support it.

However, such a holistic approach requires that forecasting tools also be linked to ecosystem service metrics and environmental and social justice indicators, so as to guide fair, sequential and reversible decisions, especially to ensure accessibility and distribution of co-benefits to the most vulnerable social groups (Gómez Martín et alii, 2020). The combination of these metrics and indicators makes it

possible to avoid 'partial optimisation' – typical of scenarios that maximise water security by offloading negative impacts onto the ecosystem or specific communities – and characterises proactive and adaptive planning in which NbS represent 'scalable solutions' and communities become an active part of the resilience of the water system.

In summary, it can be said that proactive planning of urban water supply in conditions of climate variability and uncertainty requires a convergence of methods (holistic and systemic, qualitative and quantitative), solutions (decentralised and hybrid, as well as grey, green and blue), technologies (traditional and digital) and governance (interoperable, performance-based, co-participatory), aimed at generating resilience / sustainability / anti-fragility and co-benefits between water, energy and food systems. In the absence of this convergence, supported by a robust assessment system and solid cross-scale integration, interventions ultimately consolidate inequalities and prove less effective in periods of prolonged drought and heavy rainfall.

There are certainly technical, economic and managerial limitations and barriers that can hinder proactive, holistic planning. Transforming weather into a project variable requires hydro-climatic models with a higher resolution than that currently available from IPCC, Lee, and Romero (2023), whose margins of uncertainty are still too wide to support large investments in blue and green infrastructure (Panduro, Nainggolan and Zandersen, 2024). This results in a condition of 'paralysis-by-analysis', i.e., planning suspended pending 'certain data', which adds to the misalignment between the immediacy of the costs necessary for the creation of digital twins and the distant time horizon in which the benefits of the investments will be seen (Chen et alii, 2024).

On the administrative side, however, the opportunity to integrate the basin, city, neighbourhood and building scales requires new professional figures and shared data platforms, which are not currently available, and which could raise security issues, particularly in relation to increasing hacking activities. Finally, it is particularly difficult to influence public perception of water risk, which remains rather low in communities where no recent extreme events have occurred (Pacific Institute, 2024).

The technical, economic and social challenges outlined above, like the climate uncertainties that complicate planning today, offer a powerful stimulus to innovate in high-resolution environmental data science and the convergence of digital technologies and hydraulic engineering, opening up new public-private partnerships for shared risk management. Above all, they invite cities to reclaim their water capital as a strategic common good. If taken as a driver of change, today's barriers can translate into five immediate opportunities (Figg. 15, 16):

1) strengthen partnerships between Universities, operators and digital start-ups to quickly bridge the skills gap in digital technologies in general and digital twins and cybersecurity in particular;

2) leverage 'invisible' benefits by integrating social, ecosystem and health indicators into cost / benefit analyses to unlock new climate change funding resources;

3) experiment on a small scale to scale up through neighbourhood Living Labs that test plug-and-play modules, dual networks and NbS, reducing the public risk of large-scale investments;

4) encourage civic participation through literacy programmes with emotional involvement and rewarding tariffs that transform users into co-managers of the system, multiplying distributed control points;

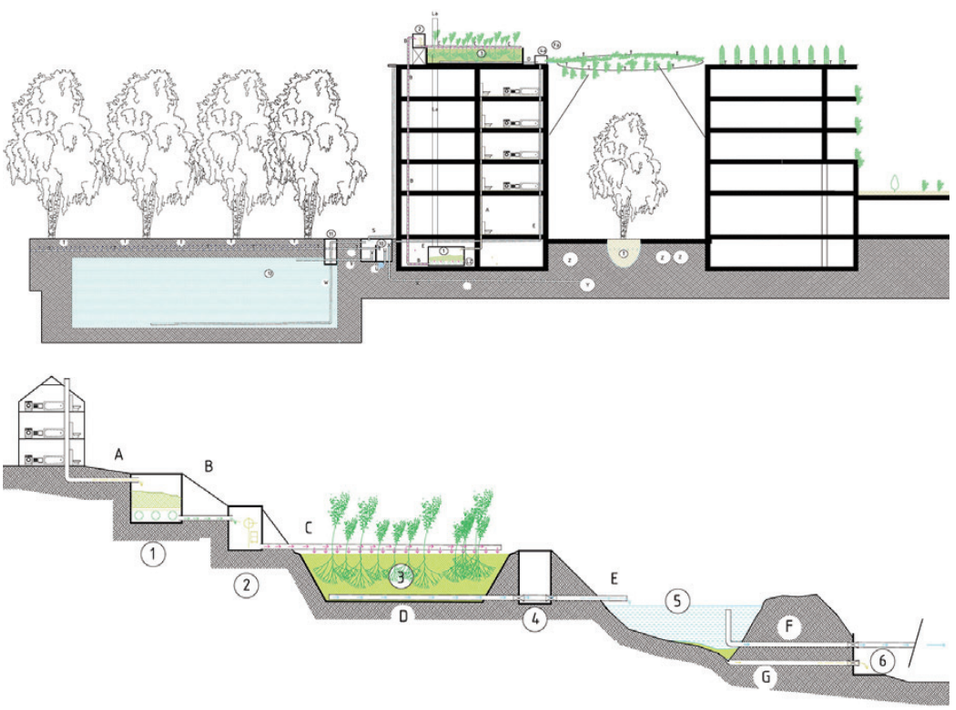
5) align time horizons through revolving funds and performance-based contracts to link short-term economic returns (loss reduction, energy efficiency) with long-term benefits (robustness and equity).

With this agenda, proactive planning can move from theory to shared operation: increasingly accurate data, cooperating institutions, active citizens as co-managers and learning infrastructures can make the 'new normal' climate no longer a threat to be endured, but fertile ground on which to build water-secure, energy-efficient and socially inclusive cities together.

Best practices for circular cities | The circular water cycle takes on its full meaning when observed through best practices. Therefore, five cities are presented below with a critical approach. These cities, using different strategies, have already made resilience, sustainability and anti-fragility a daily practice in their projects, and in which the circular reuse of water has become a driver of social change, showing how the same 4R grammar can be interpreted in different ways depending on the climate, context and collective imagination.

The case studies were selected by applying three filters. Firstly, the integration of water / energy / food: each city links the water cycle to energy and/or food flows, overcoming the logic of single-function intervention. Secondly, the measurability of results, i.e., the availability of peer-reviewed data on reused flows, energy, recovered nutrients and climate benefits, is an essential condition for an 'autopoietic' urban metabolism and for assessing the transferability of the solutions adopted. Finally, climatic and institutional diversity: from the humid tropical climate of Singapore to the sub-oceanic and temperate climate of Amsterdam, from the Mediterranean climate of Milan to the semi-arid climates of Adelaide and Los Angeles, in order to test the transferability of strategies in different climatic, regulatory and cultural contexts.

Singapore, considered the global laboratory for indirect potable reuse (Tortajada, 2006; Figg. 17, 18), covers its water needs partly from local reservoirs, partly from imports, desalination and recycling, the latter covering 40% of demand. The ener-



Legend

A wastewater pipe
1 straw rotting house (oxygen enrichment and solids separation)
B oxygen-enriched waste water pipe
2 charging system
C water distribution pipes
3 planted soil filter
D treated water pipe
4 control and distribution shaft
E water pipe (process water / collecting basin)
5 water collection basin
F irrigation pipe
G backwash pipe (sludge discharge)
Lz supply air
La exhaust air
10 water control-collection-, mix-, and distribution-shaft
S rain water
T irrigation pipe
U irrigation network pipe
V supply line of the sponge city body
11 control and pump shaft
12 water storage (part of the sponge city)
W backflow pipe from the 'sponge' / irrigation and drainage in the event of flooding
X overflow pipe to the sewer
Y municipal sewerage

Figg. 31, 32 | Schematic diagrams of a phytodepuration plant designed for a building with 50 equivalent inhabitants and a slope house (credits: G. Mittersteiner, 2024).

gy used in the recycling process has fallen in recent years from 3.5 to 2.8 kWh/mc, thanks to pressure recovery osmosis membranes and micro-turbines installed on the main lines. The waste heat from the pipes is conveyed via titanium exchangers to the hydroponic greenhouses at Changi Airport (Fig. 19): 14,000 square metres of soilless crops produce one tonne per day of vegetables for the airport catering supply chain, reducing the footprint of long-haul flights. The Pulse-Net digital twin manages the flow, quality, temperature and demand of the greenhouses in real time, allowing water flows to be diverted according to air traffic peaks and monsoon weather forecasts.

Amsterdam has achieved the water / wastewater / marine surface cycle thanks to the Blue Doughnut strategy, which aims to retain as much water as possible in the city (Doughnut Economics Action Lab, 2020). The canals, which are an integral part of the landscape, become thermal batteries for the 14 °C district heating network, supplying NZEB buildings in Climate Street (Figg. 20, 21). The Westpoort water treatment plant, converted to positive energy balance, produces struvite and ammonium sulphate, which are used to fertilise peri-urban greenhouses, reducing the import of synthetic fertilisers by 12%. With the launch of the Digital Canal, the city of Amsterdam plans to further cut energy consumption and CO_2 emissions by 25% by scheduling the opening of locks and the switching on of pumps at the same times when offshore wind farms feed more low-cost electricity into the grid.

In Milan, the Nosedo wastewater treatment plant (Fig. 22) treats 25,000 mc/h of wastewater and, since 2019, a plate heat exchanger on the pipeline has been returning 9 MW of thermal energy to the district heating system, covering 18% of the neighbourhood's needs (Mooren et alii, 2025). The treated water irrigates 1,200 hectares of suburban rice fields, providing 15 million cubic metres per year of a resource that would otherwise have required withdrawals from the Naviglio canal (Fig. 23); the additional nutrient load covers 30% of nitrogen requirements, reducing the need for mineral fertilisers. The Bosco Idrico project has extended the strategy to 200 hectares of green corridors in the urban fabric: blue-green roofs store rainwater, prevent 1.8 million cubic metres of sewage from entering the sewer system and lower summer daytime temperatures by about 1.2 °C within a 250-metre radius.

Los Angeles has set itself the goal of eliminating water imports by 2050. Hyperion, the largest wastewater treatment plant in the United States (Meilinger and Monstadt, 2025), will be converted for direct potable reuse of 1.5 million cubic metres per day with a project that involves extracting heat from the main collectors to power 18 hydroponic food hubs in peripheral food deserts: 30,000 square metres of greenhouses will provide 4,000 tonnes of fresh vegetables each year, reducing the indirect water footprint of imports from the Salinas Valley; in addition, progressive tariffs will reward those who purchase food-hub products with 20% discounts on their bills.

Adelaide, in the semi-arid climate of South Australia, built a 100 million cubic metre-per-year desalination plant in 2008. To reduce the energy costs required for its operation, the new 2030 Plan aims to reduce its use by 30%, replacing it with a network of river corridors, groundwater recharge basins and dual irrigation networks. The heat produced by the plant will be recovered and transferred, via graphite exchangers, to 240 greenhouses installed on the same coastline: evaporation will restore humidity and reduce the internal temperature of the horticultural greenhouses by 15 °C (Vahedi, Ledari and Fani, 2025), while solar energy will power the high-pressure pumps, closing the energy balance to almost zero. Viewed in sequence, the five cases offer a mosaic of circular solutions whose transferability is, however, limited to contexts with similar characteristics. The Singapore paradigm, for example, is based on a regulatory framework that allows indirect potable reuse thanks to a single national agency and a public brand – NEWater – built up over twenty years of campaigns aimed at creating consumer confidence. Transferring this model to other 'institutionally fragmented' cities means addressing the 'challenge of coordination' between water and energy network operators and health authorities.

Amsterdam's strength lies in its extensive network of canals, where thermal batteries are closely linked to the river topography that is an integral part of the urban fabric: where this network is lacking, replicability is constrained by the creation of hydro-vegetation corridors, with potential impacts on private property and vehicular traffic.

The Nosedo treatment plant has become a small 'urban refinery', but while the technical result is excellent, the transferability of the project is limited by a strategy that works thanks to the proximity between the plant, the neighbourhood and the peri-urban area. Extending the network into the city reduces the efficiency of heat transport and increases the embodied carbon of the new pipes, which can be partially offset by using stabilised recycled polyethylene pipes for the backbones and mini-exchangers in neighbourhood terminals.

The case of Los Angeles highlights the socio-spatial dimension of the intervention, but direct potable reuse is only a lever for 'nutritional equity' if it is located close to a 'food desert'. Furthermore, subsidised rates designed to encourage the purchase of vegetables could lead to increased consumption of the product and, in turn, increased overall consumption of recycled water. Transferability to an urban setting would require architecture to define a new hybrid typology, a thermal hub for food production whose envelope would need to be able to control internal humidity, ensure thermal insulation and offer transparency to daylight, thereby limiting the use of artificial lighting.

Finally, the 2030 Plan still needs to optimise the use of brine (produced by desalination) as a source of humidity for greenhouses along the coast, as the graphite exchangers that are supposed to recover its heat corrode quickly and the crystallisation of residual salt requires costly cleaning cycles, with an economic return on the plant of around twenty years; in areas with less solar radiation, the entire scheme would become uneconomical. Among the possible solutions to be tested through research and durability protocols, brine could be reused in flooring or reflective façade cladding: salt crystals, which have a high albedo, could be encapsulated in a transparent matrix, reflecting much of the solar radiation and reducing surface overheating.

The five good practices examined show that the water / energy / food cycle can be translated into operational architectures, but they also reveal how much the outcome depends on the way in which the technical elements are 'put into form and system' within the urban fabric. The circular paradigm does not advance by simply adding up technical solutions, but requires a cultural leap that only a socio-spatial project can trigger.

For water circularity to become widespread practice, architecture must take on a narrative and political role that is currently lacking in traditional technical systems. The first step is to transform infrastructure into narrative: citizens place their trust in recycling when they can 'see' it, not when they are asked to take a leap of faith: paths and illuminated indicators running along the pipes, as well as displays showing the quantity and quality parameters of recycled water in real time, are just some of the solutions that can restore a 'perception of transparency' more effectively than any technical flow diagram.

In urban areas, the material from which circular water cycle devices are made should become the second narrative element. Operational efficiency cannot ignore the environmental cost of materials: one kilometre of steel pipe can cancel out the energy advantage of a heat exchanger, while a pre-insulated backbone made of recycled polyethylene or a geopolymer concrete tank provides the same service while halving the embodied carbon footprint. The construction poetics must therefore bring together performance, life cycle and tactile imagery.

Architectural design is also called upon to produce hybrid typologies in which the separation between infrastructure and public space dissolves. Market greenhouses that house agricultural production and places for socialising, pedestrianised canals that cool neighbourhoods in summer and accommodate soft mobility, and park-like purification plants where the tanks become scenic pools of water show a visible circularity and, as a result, are politically sound and socially acceptable: only if the infrastructure enters the imagination will political and behavioural barriers be reduced.

The project must also be based on the requirement of reversibility: climate, food and regulatory standards change more rapidly than the life cycle of the works, and only modular systems and plug-in exchangers can reduce the margins of constraint, allowing functions to be reallocated without demolition and disposal. In this context, the issue of governance remains to be addressed, which cannot overlook the incentives for action: implementation plans could encourage the use of systems through, for example, volumetric rewards for those who build blue-green roofs connected to dual networks or relief from urbanisation charges for those who plan to build hydroponic greenhouses.

The success of the circular water economy ultimately will not depend on the performance of a membrane, but on the ability to develop real 'hydro-morphologies', spatial forms, systems, interfaces and materials that make the water cycle perceptible, desirable and adaptable. It is not a question of promoting a technological patent, but of claiming a design authorship capable of transforming pipes and tanks, which are currently hidden, into new shared landscapes through the recognition of the 4Rs as part of the cultural identity of a community.

Temperate cities as potential cooling nodes in a global network | The case studies examined show that when water reuse becomes an integral part of the urban metabolism, the city acquires a new 'ecosystem function': no longer just a place of consumption and disposal, but a true 'thermodynamic reactor'. If this paradigm shift applies at the

local level, the challenge is to develop thousands of similar 'reactors' – distributed across different latitudes, climate zones and cultures – in a planetary cooling network so that the mitigating effect is not confined within the administrative boundaries of cities, but helps to rebalance altered regional thermal gradients and hydrological cycles. The notion of a 'temperate city' arises from this need for an intermediate scale: designating urban agglomerations as 'active nodes' of water / energy / food exchange with local autonomy but connected at a global level.

Cities have become the true barometer of the main causes of the global climate crisis: heat waves and intense rainfall are occurring more and more frequently, giving us a glimpse of what our daily lives will be like in a few decades. In Vienna, the average temperature has risen from 9.27 °C in the decade 1955-1964 to 11.97 °C in the decade 2014-2023[7]. The number of days exceeding 30 degrees has increased from 9.4 to 29.6[8], while the tropical nights recorded at the Austrian Central Institute for Meteorology and Geodynamics (on the outskirts of Vienna) have risen from 1.25 to 8.9, reaching as high as 40.5 in the period 2017-2024 due to the urban heat island effect (at the centre of Vienna)[9]; in Germany the temperature differential between urban and rural areas has reached 10 °C, double that of 1982 (Fischer, 2022).

Similar situations can also be found in other geographical areas of Northern Europe, while in areas with Mediterranean climates, climate issues are compounded by water availability issues, which act as a risk multiplier, especially in large areas of southern Italy and Spain, threatened by desertification phenomena that put agriculture at risk[10]. Addressing one without the other is ineffective and also costs lives (Ballester et alii, 2023).

Projecting the current trend in climate-changing gas emissions to 2100, the IPCC predicts an increase in global average temperature of around 4.5 °C (IPCC, Lee and Romero, 2023); in the most densely populated urban settlements, this temperature increase translates into longer heat waves, chronic water stress, energy blackouts and higher 'heat-related' mortality, which in Europe has already exceeded 175,000 victims per year[11]. While urban centres are the main cause of climate change, they are also an important lever for tackling it, offering significant opportunities thanks to blue and green infrastructure, rainwater regulation, wastewater availability and social networks. Hence, the argument that cities can be transformed into 'cooling nodes' of a global network, capable of mitigating urban heat islands and alleviating extreme regional conditions.

This thesis is based primarily on the fact that there is currently a lack of vegetation and surface water bodies in urban centres, which significantly reduce the cooling effect of evaporation, and that built surfaces (roads and car parks, roofs and facades), often without shade, absorb solar radiation during the day and release it as sensible heat at night, with a temperature increase that can reach up to 8-10 °C compared to surrounding rural areas (Stewart and Oke, 2012): in theory, every city has a 'thermal battery' that can be continuously discharged and recharged. Another element that supports this thesis is related to urban morphology: a single compact block contains thousands of square metres of surfaces (roads and car parks, roofs and facades) that could potentially accommodate vegetation, reflective coatings or evaporative devices. This built density is compounded by an equally high density of water flows: every day, the city produces thermally charged wastewater which, if treated and diverted to green infrastructure, trees and water bodies, can support evapotranspiration even in drought conditions, while protecting drinking water resources.

The combined effect of these two resources – horizontal and vertical built surfaces and 'recycled' water – can produce significant health and economic benefits and spin-offs: recent modelling indicates that a reduction of just 2 °C in the average summer temperature in urban areas has the potential, on the one hand, to lower cardiovascular mortality by about 7% and, on the other, to increase worker productivity by up to 5% per annum (ILO, 2019).

Other simulations conducted on European cities show that if all roofs were converted to irrigated green roofs, the average heat island intensity would be reduced by between 0.7 and 1.2 °C (Spyrou et alii, 2024). Others show that medium-sized water basins, under certain conditions, can lower the daytime surface temperature by up to 3-4 °C within a radius of 500-800 metres (Sun et alii, 2012). The mitigation potential of urban centres is therefore considerable when we consider that, in 1975, they covered 1% of the Earth's surface and in 2015 this percentage had increased to 1.5% (JRC, 2020).

The thermodynamic logic behind the idea of transforming cities into 'cooling nodes' is based on the observation that urban biomass can convert the sensible heat accumulated by buildings into latent vapour flows, provided that it is continuously irrigated: a stressed tree does not produce evapotranspiration, loses its leaves prematurely, becomes vulnerable to various pathogens and the shade it produces is not sufficient to mitigate the surface temperature; on the other hand, a mature, well-irrigated specimen, depending on the species, can act as a natural cooling pump on a hot summer's day, producing evapotranspiration of 500 to 2,000 litres.[12]

Assuming a latent heat of vaporisation of 2.45 MJ/kg (Allen et alii, 1988), a large plane tree can remove up to 5 GJ per day from a dry urban atmosphere, a value comparable to the cooling requirements of dozens of flats. Furthermore, its shade amplifies the effect on the surface of asphalt roads and concrete pavements, lowering their temperature by about 20 °C and preventing them from reaching peaks of 60-70 °C, which are then released at night (Kaluarachichi, Tjoelker and Pfautsch, 2020). It should be noted that there are also species that require little water and are still capable of providing shade, but produce more modest evapotranspiration, reducing cooling effectiveness in hot and dry periods.

However, to sustain these flows in an increasingly arid climate, it is necessary to decouple the irrigation of green spaces from drinking water, drawing on treated wastewater. The Tijuana case study (Garcia et alii, 2022) demonstrates the technical and health feasibility of this approach: in a '15-minute city', this means creating decentralised micro-water treatment plants in buildings, blocks or neighbourhoods, channelling the effluent to rows of trees, pergolas and micro-wetlands on the streets; the same network can be implemented with phytoremediation on green roofs (Fig. 24). At the intermediate level of the road section, where infrastructure density often prevents new deep-rooted trees, the thermodynamic system can be integrated with horizontally growing plant pergolas: climbing plants quickly reach a high leaf area, ensuring continuous solar shading and a significant amount of evapotranspiration (Fig. 25). During peak sunlight hours, the horizontal canopy also reduces heat flow on building facades, limiting wall absorption and lowering the radiant temperature perceived by pedestrians (Jareemit and Srivanit, 2022). This results in a direct gain in public health because the metabolic heat load, which drops by tens of watts per person, translates into a lower incidence of heatstroke and cardiovascular stress, in line with the mortality reduction estimates mentioned by IPCC, Lee, and Romero (2023).

The third level, that of roofs, is equally crucial for optimising the efficiency of the 'thermal battery'. Traditional flat roofs can abandon their passive role as heat accumulators (with peaks of up to 25 MJ/m^2 on a summer day in a Mediterranean climate) to become active in microclimate regulation and agricultural production with aeroponic crops (Fig. 26), whose efficient irrigation requires only 1/10 of the water compared to traditional systems. Experimental measurements indicate that the temperature difference between the surface of an irrigated green roof and that of an adjacent traditional roof can reach 8 °C at peak times (Rahman et alii, 2022), further amplifying the cooling effect.

The benefits are therefore twofold: on the one hand, a surface with high thermal capacity and low albedo is replaced with a vegetated matrix with high albedo and latent dissipation; on the other hand, local food is produced with an almost zero water footprint. The efficiency of a well-designed aeroponic system is documented by AeroFarms, which claims to use 95% less water than a traditional farm at its facility in Newark, New Jersey[13]. The Parisian experience of Agripolis also demonstrates the commercial scalability of a project that plans to convert the roofs of one of the largest exhibition complexes in the 15th arrondissement, the Paris Expo Porte de Versailles, into 14,000 square metres of hydroponic gardens capable of producing around 1,000 kg of fruit and vegetables every day.[14] A study conducted in Bologna also estimated that if all available flat roofs were exploited, the city could cover up to 77% of its annual fresh vegetable needs, thus confirming the potential scale of high-altitude cultivation (Wilson, 2023). In general, with a yield of around 70 kg/sqm per year, one square kilometre of cultivated roofs could meet the needs of 100,000 residents, drastically reducing CO_2 emissions from transport. Finally, it is conceivable that with the progressive robotisation of horticultural production, harvesting and management costs could be reduced and yields per unit of area could be further increased[15]. From a thermal point of view, every litre of water atomised in the aeroponic system removes 0.68 kWh of latent heat; if only 30% of a neighbourhood's urban wastewater were treated and used on rooftops, tens of megawatts could be removed from the atmosphere during peak hours, decongesting the electricity grid and limiting the use of air conditioning systems.

There is also a fourth powerful climate control device, namely urban water bodies (lakes, rivers, ponds, etc.), which we will discuss in detail in the next section. Thanks to its high thermal capacity and continuous evaporation, water absorbs heat during daytime and summer peaks and gradually releases it after sunset, mitigating the night-time lows that fuel heat islands. Recent studies show that water bodies ranging in size from 1 to 3 hectares can lower

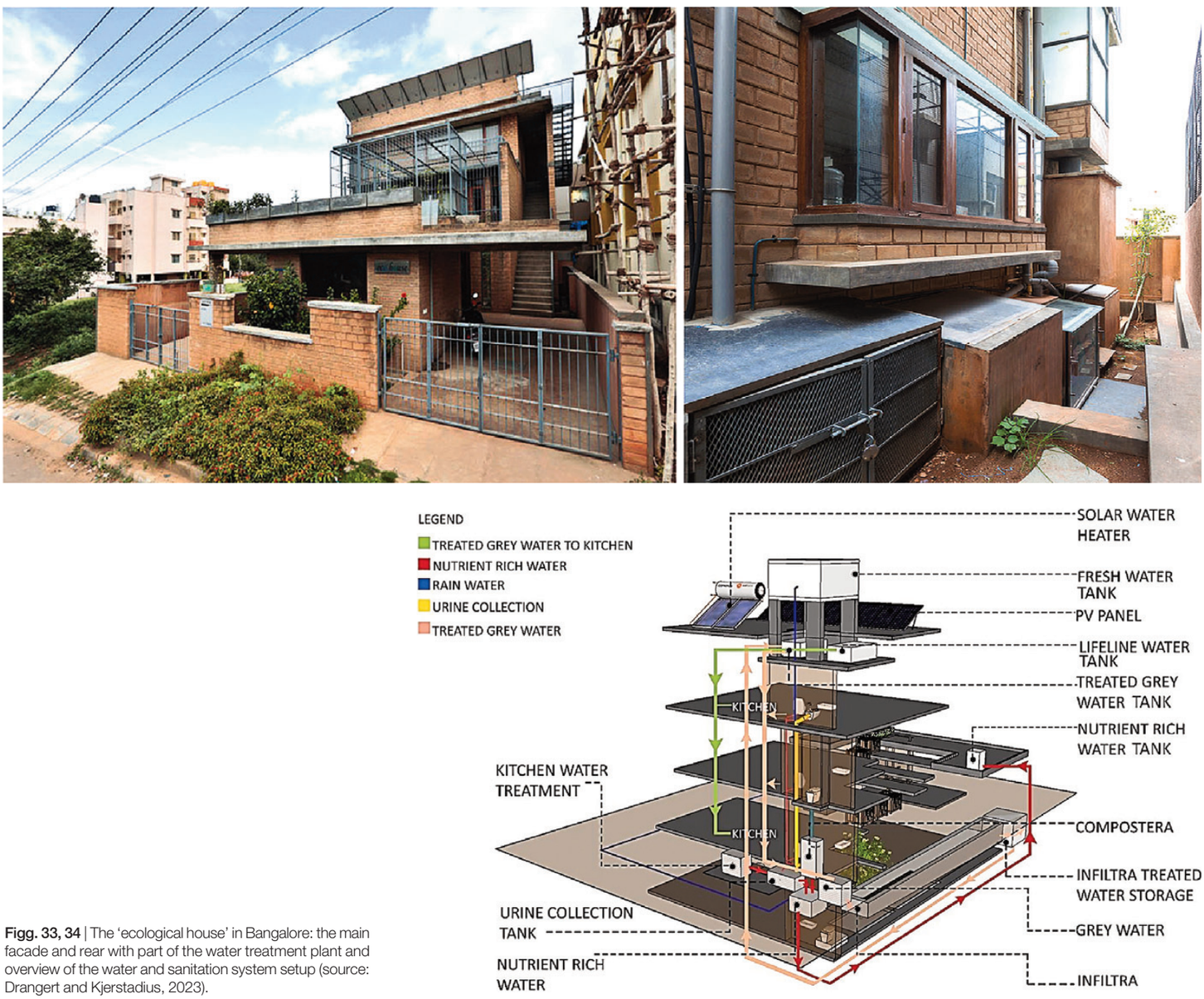
the air temperature by about 3 °C during the hot hours of the day and by more than 1 °C at night, extending the thermal benefit up to 600-800 metres from the edge. The intensity of the effect depends on the size, geometry, and depth of the water body, but also on the type of soil and vegetation surrounding it (Yu et alii, 2020); in addition, bands of hygrophilous vegetation on floating rafts can expand the evapotranspiration surface, creating natural ventilation corridors oriented towards the prevailing winds and increasing biodiversity.

The performance of water bodies can also be enhanced with 'smart' technological devices: level and quality sensors, managed with forecast-based logic, can be connected to blue-green roofs to modulate runoff and maximise storage capacity during severe weather events (Busker et alii, 2022). On the energy front, water bodies can also host floating photovoltaic modules, providing shade that can reduce evaporation by up to 90% and producing renewable electricity without land consumption (Rahaman et alii, 2025). Welcoming water bodies as a fourth level does not simply add a new piece to the urban mosaic, but subverts the very paradigm of climate design: with a '4D cooling system' – three-dimensional in space and programmable in time – the city ceases to be a passive surface[16] to be mitigated and becomes a huge heat exchanger. The result is not a sum of blue and green devices, but a metabolic network that modulates temperature, humidity and light: from this perspective, the challenge is no longer to 'add' but to 'design operational scenarios' – hydraulic, vegetational, digital and social – capable of creating dialogue between the four blue-green levels along the three spatial dimensions and the time variable of the urban climate, anticipating extreme events rather than chasing them.

The operational synergy among the four levels – water bodies, street trees, intermediate-height pergolas, and aeroponic crops on rooftops – creates a multidimensional ecological network (blue and green) of heat exchange that turns the heat island into a source of cooling for cities. The symbiosis between leaf surface and recycled water supply can be the cornerstone of a morphological regeneration of the built environment. Urban density, traditionally considered a heat risk multiplier (Tucci, Altamura and Pani, 2023; Gourfi et alii, 2022), is reinterpreted as an opportunity to concentrate high-impact interventions: thousands of square metres of roofs, facades, roads and car parks become the physical support for a multi-level cooling network.

At the same time, the carbon storage potential of biomass, the absorption of fine dust, the reduction of unregulated rainwater flows and the creation of habitats for pollinators contribute to the climate neutrality and biodiversity objectives required by the European Union's Nature Restoration Regulation (European Parliament and Council of the European Union, 2024). Economically, the model presented is partially self-financing: horticultural production on a roof such as that of the Paris Expo Porte de Versailles can generate a turnover of more than €1 million per year for an investment of around €200 per square metre, while the health and energy savings benefit the community in the form of lower public costs.

The co-location of food production, shaded recreational spaces and pedestrian-cycle corridors reduces the need for motorised transport and restores



Figg. 33, 34 | The 'ecological house' in Bangalore: the main facade and rear with part of the water treatment plant and overview of the water and sanitation system setup (source: Drangert and Kjerstadius, 2023).



Fig. 35 | Social housing in Herzogenburg (Austria): the arrow on the bottom left indicates a small technical room housing two straw filters for wastewater treatment (credit: G. Mittersteiner, 2024).

quality of life to residents, consolidating the '15-minute city' model, which coincides with that of the 'temperate city', where proximity and density are balanced by thermal comfort guaranteed by ecological processes. With this integrated infrastructure, the city ceases to be one of the main causes of climate change. The 'impermeable' city becomes an 'evaporative sponge' and the urban 'thermal battery' shifts from being a problem to being part of the solution: reservoirs, trees, pergolas and roofs with aeroponic crops and phytoremediation form a circular water / energy / food nexus that transforms urban areas into active and resilient hubs, true blue-green-food lungs capable of mitigating the regional climate, guaranteeing essential ecosystem services and improving the quality of life within a few minutes' walk.

The role of water bodies in climate regulation and their integration with vegetation | In order for the 'temperate city' to function as a cooling hub for a global network, it must be equipped with high-inertia exchange surfaces. From this perspective, water bodies – whether natural or artificial, linear or punctual – are not simply aesthetic elements of the urban landscape, but actual thermal accumulators that combine three key resources: water volume, evaporation surface and temporary storage capacity. Interconnected to a green fabric irrigated with purified wastewater, water bodies become the beating heart of the cooling system: even before being bodies of water, they are climate timing devices whose effectiveness lies in their ability to interact with the surrounding green infrastructure (Figg. 27, 28). With this in mind, careful urban planning should create artificial water bodies and enhance existing ones by structuring synergies with green infrastructure, on the one hand to increase the availability of decentralised water storage areas, and on the other to mitigate the urban heat island effect, the main causes of which are attributable to human activities and the concentration of heat-absorbing infrastructures (Mortezazadeh, Jandaghian and Wang, 2021; Hayes et alii, 2022). These latter elements lead to an increase in energy demand for indoor cooling and pose significant risks to public health (Jandaghian and Akbari, 2021).

To mitigate these challenges, several studies have been conducted to explore the mitigation potential of water bodies through natural mechanisms such as evaporative cooling and convection. In particular, Bowler et alii (2010), who conducted research in Wuhan, concluded that reservoirs can reduce daytime surface temperatures by up to 3 °C, extending the beneficial effects up to 800 m from their perimeter. Other studies, such as those by Gunawardena, Wells, and Kershaw (2016), found that the cooling effect of water bodies is most pronounced within 500 metres of their perimeter and gradually decreases beyond that distance, while Sun et alii (2012) in Beijing report that wetlands have significant cooling effects, reducing the air temperature by up to 4 °C within a radius of one kilometre.

The different results show that the cooling efficiency of water bodies is influenced by several factors, including their size, depth and shape, climatic conditions, wind direction and intensity, and the nature of the surrounding soils (Fig. 29). Larger water bodies generally provide greater cooling effects due to their large surface area, which facilitates greater heat absorption and higher evaporation. Du et alii (2016) found that lakes in Shanghai have a greater cooling impact than rivers, with average air temperature reductions of 3.3 °C for lakes and 2.3 °C for rivers. The study also highlighted that, in addition to size, the depth of water bodies also influences the air and surface temperatures of the surrounding area.

Jandaghian and Colombo (2024) cite multiple studies showing that deeper lakes in urban regions offer longer-lasting cooling than shallow ones because their higher thermal inertia allows them to store more heat and release it slowly, especially during the night. Furthermore, due to their depth, deeper water bodies experience less variation in temperature between day and night (Gill et alii, 2007): this characteristic helps to maintain a cooler microclimate in the surrounding area, as the gradual release of heat prevents sharp increases in night-time temperatures (Jacobs et alii, 2020), which is particularly beneficial in urban areas where night-time temperatures remain high (Zhao et alii, 2018).

The geometric configuration of water bodies also plays a crucial role: according to the study by Sun and Chen (2012), regular, circular or square-shaped elements tend to provide more uniform cooling in all directions than irregularly shaped bodies. Another study conducted by Sun et alii (2012) in Beijing showed that wetlands also have significant cooling effects, reporting that the air temperature within one kilometre of their perimeter could be reduced by up to 4 °C. Climatic conditions also affect the cooling effects of water bodies, including humidity, wind, and ambient temperature. In hot, dry climates, the cooling effect is generally more pronounced due to faster evaporation, whereas in humid climates it may be less pronounced because the high moisture content in the air inhibits evaporation. A study on Vancouver conducted by Kokkonen et alii (2018)

showed that urban water bodies provide significant cooling during hot, dry summer months, while the benefit decreases during the wetter winter season.

The mitigating effect is particularly noticeable during heat waves, resulting in a more comfortable local microclimate; the cooling effect in Mediterranean climates is often more noticeable during the day, as the contrast between the warm air and the cooler water surface helps to moderate daytime temperatures, while at night it is more pronounced in arid climates. Understanding the behaviour of water bodies in different climate zones is essential for optimising their design and location in urban areas in order to maximise their cooling potential.

Winds also play a key role in 'modulating' and 'conveying' their cooling effect. Research conducted by Stewart and Oke (2012) has shown that variations in wind direction and speed can significantly alter the extent and magnitude of cooling provided by adjacent water bodies: strong, steady winds can provide thermal relief to larger urban areas.

The nature of the surrounding soil also makes a significant contribution to the effectiveness of cooling. Areas with a higher percentage of green spaces (parks, trees, forests, green roofs, permeable surfaces, etc.) adjacent to water bodies benefit from the synergistic effects of cooling, creating cooler microclimates and improving urban thermal comfort: vegetation promotes evapotranspiration and generates shade, also improving overall urban resilience to heat waves (Smith, Fabian and Hutyra 2023).

Tan et alii (2021) conducted an in-depth study to compare the cooling effects of water bodies and green spaces in a tropical urban environment. The results indicated that water bodies can lower the temperature by up to 4 °C, while green spaces achieve a temperature reduction of around 2-3 °C. The study also noted that water bodies provide more stable cooling effects during the day and night, unlike green spaces, which mainly offer cooling during the day due to evapotranspiration (Simsek and Odul, 2018).

The integration of water bodies and vegetation can create cooler microclimates and improve urban thermal comfort more effectively (Fig. 30). In this regard, Norton et alii (2015) studied the combined cooling effects of green and blue infrastructure in Melbourne and found that areas with water bodies and dense vegetation can experience temperature reductions of up to 5 °C, a value that varies not only according to the characteristics of the water bodies described above, but also according to factors such as plant species, density and canopy cover.

Another important factor to consider in design is the impact of impervious surfaces surrounding urban water bodies (Bowler et alii, 2010; Zhang, Murray and Turner, 2017). The use of materials such as asphalt and concrete, as well as the presence of large buildings, promotes the absorption of significant amounts of heat during the day, which is then slowly released during the night. The stored heat increases the ambient temperature, reducing the natural cooling effects of nearby water bodies and decreasing the temperature gradient necessary for effective heat exchange.

During the night, high thermal inertia causes impermeable materials to change temperature slowly, maintaining high values for longer during the night and reducing the effectiveness of water bodies. The thermal inertia of these materials, on the one hand, leads to higher energy consumption for cooling neighbouring buildings and, on the other, creates the urban heat island effect, particularly during periods of intense solar radiation, altering the microclimate and making the air constantly warmer and drier, both conditions that can negate the cooling effects provided by water bodies, especially in densely built-up areas with limited green spaces (Zarcone, Nava and Tucci, 2024).

To counteract these negative effects, it is therefore necessary to increase the use of permeable soils and the planting of vegetation near water bodies. However, the design of such more sustainable and comfortable urban landscapes requires the strategic positioning of blue and green infrastructure to maximise benefits. Studies suggest that the cooling potential of these infrastructures can be optimised by placing them in areas where the urban heat island effect is most pronounced, such as densely populated neighbourhoods and areas with little vegetation (Wang, Zhan and Ouyang, 2019; Magliocco and Oneto, 2023), while also assessing wind direction and speed, topography and sun exposure, which can significantly influence their effectiveness.

Research has shown that integrating trees and water features at key points can reduce surrounding temperatures by 2-5 °C and that integrating them with green corridors can improve ventilation and transfer the benefits to a wider urban area (Depietri, Renaud and Kallis, 2012). Proper design can provide a wide range of environmental, social and economic benefits that are increasingly recognised as fundamental components of sustainable urban planning (Moscatelli and Raffa, 2023). From an environmental perspective, the integration of the two infrastructures can play a significant role in stormwater management by absorbing runoff, helping to reduce the risk of flooding and mitigating the impact of heavy rainfall.

Another synergy is their ability to improve water and air quality: vegetation sequesters carbon by releasing oxygen, while permeable soils and wetlands filter stormwater, reducing the treatment load on grey infrastructure. Other environmental benefits documented in the scientific literature (Probst et alii, 2022; Smith, Fabian and Hutyra 2023; Ziaeemehr et alii, 2023) concern biodiversity and ecosystem services: the creation of habitats for a variety of species can support the development of diverse flora and fauna, promoting essential services such as pollination and contributing to the health and resilience of urban ecosystems.

Additional environmental benefits, which also have an impact on economic sustainability, are linked to energy efficiency, as the cooling effect produced by the synergy of green spaces and water bodies reduces the energy demand for air conditioning in neighbouring buildings during hot periods, resulting in significant savings in greenhouse gas emissions and providing concrete support for mitigating climate change (Jandaghian and Colombo, 2024). Policies that encourage the integration of the two infrastructures in urban areas can further stimulate economic growth by regenerating degraded urban areas, increasing property values and developing local tourism.

From a social point of view, the integration of blue and green infrastructure contributes to improving the quality of life of the community and the psychophysical well-being of residents, offering spaces for meeting, physical exercise, relaxation and recreation, as demonstrated by sector studies on the relationship between natural environments, stress, mood and social interaction (Gómez-Baggethun and Barton, 2013), especially in densely populated urban areas where access to nature is often limited (Nowak, Crane and Stevens, 2006).

Although research on the integration of blue and green infrastructure has reported promising results on water metabolism and cooling in urban areas, there is still a lack of quantitative studies that accurately measure the synergistic effects and trade-offs. Furthermore, additional research is needed to assess the direct impact of cooling provided by water bodies on human health and well-being, especially for the most vulnerable populations during extreme heat events. It is also necessary to develop advanced modelling techniques, with a holistic and multidisciplinary approach, to simulate the long-term impacts of water bodies on the urban climate, thus providing useful information for proactive, time-based planning capable of addressing uncertainties.

At the same time, it will be useful to formulate and promote policies and incentives that encourage the inclusion of water bodies, corridors and areas with vegetation and soil permeability in urban regeneration projects and the development of new urbanisations, structuring simple but effective guidelines for the design, management and maintenance of such areas. Finally, educating and raising awareness among citizens about the environmental, economic and social benefits generated by the integration of the two infrastructures will be fundamental to their long-term success.

Cooling with wastewater, from residual waste to resource | If water bodies and green infrastructure function as urban 'condensers' capable of dissipating heat accumulated in public spaces, the missing link in this thermodynamic chain flows 'invisibly' through the drainage networks: every cubic metre of wastewater that leaves the city carries with it energy and nutrients which, if intercepted at source, can feed a distributed latent cooling system. This change of scale allows the focus of climate action to shift from infrastructure to the metabolism of buildings, transforming domestic effluent from waste into a fluid that serves 'temperate cities'.

The IPCC's AR6-WG I highlights that several regions are experiencing a statistically significant increase in the frequency and intensity of heatwaves; this trend is set to worsen by mid-century across all simulated emission scenarios (IPCC, 2023a). At the same time, recent monitoring by the Joint Research Centre (Rossi et alii, 2023) shows persistent soil moisture anomalies over more than a third of the European Union's territory for the three-year period 2020-2022, confirming the lengthening of periods of severe drought. In this context, cities need more water to cool down, just when availability is decreasing and urban water resources continue to follow a linear path – collection, use, centralised treatment and discharge into the sea – which annually disperses tens of cubic kilometres of effluent still rich in nutrients and loaded with micropollutants, with eutrophic effects on the coastal strip, as documented by the European Environment Agency (EEA, 2019).

European agriculture compensates for the dispersion of nutrients with fertilisers produced almost entirely using the Haber-Bosch process, a process that absorbs approximately 1-2% of global energy consumption and requires an average of 0.7-0.9 kg of methane for every kilogram of nitrogen fixed (Nancharaiah, Venkata Mohan and Lens, 2016). The al-

ternative is to change the scale and purification system: small (decentralised) phytopurification plants with gravel beds and plants, built for a maximum of 50 equivalent inhabitants according to UNI EN 125-66-3:2016 and Standard DWA-A 262 (DWA, 2017), consume approximately 0.15 kWh per cubic metre of treated wastewater and eliminate on average 90% of organic matter, approximately 75% of nitrogen and up to 90% of phosphorus, with a residue of approximately 1-3 mg per litre: the residual concentration of these nutrients makes the effluent suitable for irrigating green roofs, trees and flower beds without the need for further treatment.

Assuming the implementation of this phytoremediation system across the metropolitan city of Naples, which in 2025 will have approximately 2.96 million inhabitants[17], and considering an average domestic consumption of approximately 200 litres per capita per day, we would have approximately 592,000 cubic metres of recyclable wastewater available per day. By irrigating 354,667 trees – planted at 6-metre intervals along both sides of the road network, which is approximately 1,064 km[18] – with a conservative daily requirement of 100 litres per tree, we could use 35,467 cubic metres of wastewater per day (Tab. 1): evapotranspiration would transform the water into a latent flow of 24.12 GWh per day; the calculation is based on 0.68 kWh per litre of evaporated water, a value derived from the latent heat of 2.45 MJ/kg (Tab. 2).

The remaining 556,533 cubic metres of wastewater per day could irrigate 79.5 million square metres of gardens and raised beds on roofs (7 l/m²) or 111.3 million square metres of aeroponic roof cultivation (5 l/m²); this irrigation would translate into another 378.44 GWh of latent cooling per day and an annual horticultural production of close to 8 million tonnes, a value in line with the yield of 70 kg/sqm per year of the latest generation production systems.

Adding up the contributions of roadside and rooftop irrigation during the 120 hottest days of summer would result in a cooling service of 402.56 GWh, a quantity of thermal energy equivalent to the power supplied by over 3.354 million 5 kW air conditioners operating 24/7 for the same period (Tab. 3). Such cooling would reduce the demand for energy for cooling buildings, as evidenced by dynamic models according to which a 1.5 °C reduction in air temperature can reduce peak summer energy consumption by about 12% (Santamouris et alii, 2020) and, on the other hand, can promote increases in biodiversity of more than 25% in the vicinity of well-irrigated soils (Frene et alii, 2022; Christel et alii, 2023). Assuming that the treated wastewater reaches the maximum concentration allowed by UNI EN 12566-3:2016 for nitrogen (15 mg/litre) and phosphorus (2 mg/litre) and that the quantity of phytopurified water (600,300 cubic metres) is used entirely for the irrigation of trees and roofs with aeroponic crops, then we would be able to recover approximately 3,286.64 t/year of nitrogen and 438.22 t/year of phosphorus. Furthermore, considering emission factors of 4 kg CO_{2eq} per kilogram of nitrogen and 1.4 kg CO_{2eq} per kilogram of phosphorus, local recycling of wastewater would avoid the release of approximately 13,800 t CO_{2eq}, an estimate that includes both the energy used to produce the mineral fertilisers replaced and the emissions associated with their transport.

Wastewater recycling would thus make it possible to avoid using drinking water for irrigation during periods of drought and significantly reduce the volumes discharged into the sewerage system on days of heavy rainfall, with less frequent overflow and eutrophic pressure on the Campania coastline.

Israel is often cited as a global leader in wastewater reuse: today, over 90% of treated civil wastewater is used to irrigate fields, a proportion far higher than in any other country[19], thanks to large centralised treatment plants which, using different technologies, consume an average of 1 kWh per cubic metre treated (Walker, Prysor Williams and Styles, 2021). Beyond the treatment costs, which are about seven to sixteen times those of a phytoremediation plant, if the water were to be reused for urban evaporative cooling, new water infrastructure would have to be built on a metropolitan scale, at a significant cost. However, the case of Israel, which demonstrates a focus on recycling for irrigation purposes, is irrelevant for urban cooling, which requires a widespread network of micro-nodes in which each building becomes a 'climate module' capable of sealing its own water cycle, transforming excess thermal energy into latent flow and returning nutrients to vegetation.

A reflection on the transition from the macro scale of 600,000 cubic metres of wastewater in Naples to the building scale of 10 cubic metres in a typical apartment block shows that the principle also works in the absence of economies of scale: there is no need for kilometre-long supply networks or expensive lifting systems, but only a few low-power pumps and a project that includes phytoremediation on the roof of a building or in a neighbouring space.

At the building level, decentralisation makes it possible to drastically reduce grey energy infrastructure, network losses and drinking water consumption, while at the same time making it easier to dispose of rainwater, increasing redundancy in the event of a blackout and reducing environmental costs: 'evaporated heat' no longer weighs on the public bill because it is intercepted where it is generated, while locally available water relieves the water system from summer pressures that, with climate change, will become structural.

The most efficient and economical decentralised system is one that uses vertical-flow phytoremediation with aerobic pre-treatment (UNI EN 12566-3:2016). Each module, up to a maximum of 50 equivalent inhabitants (Fig. 31), consists primarily of a 'decomposition chamber', a straw filter (1), installed in the basement or on the ground floor and ventilated; since only aerobic processes take place, there is no nuisance caused by odours. From here, the oxygen-enriched wastewater is pumped to the roof (2) into the filter tank with plants (3); at the end of the tank there is a control well from which two pipes depart, one for irrigating the green roof (4a) and the other for storage in a cistern (10), into which rainwater and residual irrigation water can also be conveyed; through other pipes (T, U, V, W and X), the water from the cistern is fed into the local resilient water network.

The energy required is limited to two pumps, with a maximum consumption of 1 kWh per day for a five-storey building with 50 residents and a production of 10,000 litres of water per day. In hilly areas, gravity can completely replace the pumps (Fig. 32).

For a condominium with 50 equivalent inhabitants, for which the flat roof area is estimated at 450 square metres, the gravel bed area required for phytoremediation varies from 1 to 4 square metres per equivalent inhabitant[20], depending on the climate zone. For the purposes of the following calculation, the highest parameter is used, as this oversizing facilitates maintenance and prolongs the useful life of the filter. Therefore, the planted gravel bed is expected to cover up to 200 square metres.

The 10 thousand liters of wastewater per day that the fifty equivalent inhabitants send to the plant are intercepted by the pre-oxygenation tank; then the gravel and root filters clarify them with an energy consumption of just 0.06-0.15 kWh per cubic meter, which is seven to sixteen times less than a centralized plant. This difference in performance alone is the basis for an initial climate benefit: the ten cubic metres treated locally avoid consuming 8.5 kWh of electricity per day; multiplying this by the average emission factor of the Italian mix recorded in 2024[21] (approximately 0.27 kg CO_{2eq} per kWh), we obtain a saving of 2.3 kg CO_{2eq} per day, i.e., 275 kg CO_{2eq} in the 120 hottest days of the year and over 800 kg CO_{2eq} on an annual basis.

Part of this water, approximately 1.5 cubic metres per day, could be returned to the toilet cisterns through a dedicated pipe, saving approximately 1,500 cubic metres of drinking water per year. The remaining effluent – 8.5 cubic metres per day – can be used to irrigate communal gardens or nearby public green spaces, where it evaporates completely. This is where the system shows its strength, transforming wastewater into latent cooling. Since each litre evaporated corresponds to 0.68 kWh of heat removed from the air, the 8,500 litres remove 5,780 kWh per day, equivalent to the thermal effect of forty-eight 5 kW air conditioners running continuously for 120 days.

Considering the entire summer period, the latent heat removed is equivalent to approximately 694 MWh, producing 'zero-cost' cooling that does not burden the electricity grid and consequently lowers surface temperatures, with positive effects on comfort, biodiversity and the energy balance of the flats. Far from being a problem, nutrient flows become a fertiliser in solution. The 8.5 cubic metres of treated water per day contain, at the limits of the UNI EN 12566-3:2016 standard, just under 130 g of nitrogen and 17 g of phosphorus, which on an annual basis become 46 and 6 kg respectively, sufficient to support the growth of a tree curtain and lawn in a condominium without resorting to mineral fertilisers. If we translate these nutrients into avoided emissions, using the emission factors already mentioned for nitrogen and phosphorus, we avoid the release of 190 kg CO_{2eq} per year.

Added to this benefit is the energy saving: treating wastewater on site with phytoremediation requires only 0.06-0.15 kWh per cubic metre, compared to the kilowatt hour required in a centralised plant. For the 10 cubic metres per day of the condominium, this means avoiding 3,100 kWh of electricity per year, which, with the Italian electricity mix in 2024, is equivalent to approximately 840 kg CO_{2eq} not emitted into the atmosphere.

The 450 sqm roof of the apartment building can accommodate, in addition to the phytoremediation system, 200 sqm of high-density aeroponic crops. The water requirements of a high-altitude vegetable garden – 5 litres per square metre per day – are entirely met by the resource already available. Therefore, no new drinking water withdrawals are necessary. The estimated yield of 70 kg/sqm per year thus allows up to 14 tonnes per year (approximately 750 grams per person per day) of fresh vegetables to



Fig. 36 | Promenade du Paillon in Nice (France): features water elements in the square that help reduce heat islands during the hottest months (credit: S. Vstk, 2014).

be brought to the residents' tables without occupying a single centimetre of urban land or using mineral fertilisers. From a thermal point of view, the amount of water dedicated to aeroponic cultivation contributes an additional 680 kWh of latent cooling per day, but this is already included in the overall balance of 5.8 MWh; the additional benefit is mainly due to the fact that the exchange takes place directly above the dwellings, reducing the thermal load on the roof.

On the international scene, a case study of interest is the 'ecological house' built in Bangalore in 2015 (Figg. 33, 34). Although built in a fragile regulatory ecosystem, in a dense urban fabric and in a monsoon climate characterised by long periods of drought, the 'ecological house' allows the aforementioned multiscale logic to be put to the test, demonstrating that the principles of water and energy self-sufficiency and latent cooling can be successfully translated even in extreme conditions.

The building, inhabited by a family, is designed to reduce drinking water consumption, avoid discharging wastewater into the sewer system and eliminate the need to dispose of organic waste outside the plot. Four water sources – rainwater, well water, mains water and recycled water – converge in a storage and treatment network powered by photovoltaics, reducing domestic drinking water consumption to 90 litres per person per day compared to the national average of 150 litres.

The building is equipped with four separate drainage columns (urine, faeces, grey water from the kitchen and grey water from the sink and shower in the bathroom) to optimise wastewater treatment, recover nutrients, reduce the volume of water to be purified and obtain reusable water directly on site. These flows converge in a small treatment plant located at the rear of the building, where there is a technical corridor against the wall along which the drain pipes also run. The solid fractions are sent for dehydration and composting, and then mixed with food waste to become fertiliser for the roof gardens and terraces.

Grey water passes through a layer of organic material (grass, leaves, compost, straw, pine needles, etc.) and a double-zone filter bed (first anaerobic and then aerobic), at the end of which the wastewater, now clarified and hygienically safe, is collected in a cistern and used for non-potable purposes, including toilet flushing, irrigation of green areas and roof gardens, and external washing. To solve the problem of any unpleasant odours, the designers focused on watertight sealing and passive ventilation: sewage is collected in an airtight cabinet and urine in a closed tank, while inspection takes place through Plexiglas doors, with the result that the treatment area is 'clean and odour-free'. If we analyse the case study carefully, the main innovative element is not technological but managerial: the house functions thanks to a convergence of choices – consumption of biodegradable products, waste separation, active maintenance of treatment units – which transfers to residents responsibilities normally delegated to the water operator.

The 'ecological house' demonstrates that, with motivated users, every domestic flow can be made circular, but it also highlights socio-technical fragilities. Under the same roof, there are four networks for four types of waste, which, on the one hand, allow for the optimisation of recycling processes, but on the other hand, introduce a complexity of systems that is ill-suited to mass construction. However, credit must be given for testing solutions often confined to laboratories in real living conditions: for example, compost derived from the mixing of faeces and wet organic waste produces a fertiliser that has already passed agronomic tests (Drangert and Kjerstadius, 2023).

The case of Bangalore demonstrates that the transition from centralised water infrastructure to distributed, nature-based networks is technically feasible and already in operation. The strength of the prototype lies not in individual technical innovations – all widely known in the literature – but in the systemic integration of processes that close water, energy and nutrient cycles on site. However, this same integration is highly dependent on user behaviour and 'daily domestic rituals' that can amplify or reduce the performance of the system. This raises two key questions for replicability: what degree of au-

4R-SDGs Matrix

R-Category	Sub-Category	Indicator ID	Indicator Name	Unit	1 NO POVERTY	2 ZERO HUNGER	3 GOOD HEALTH AND WELL-BEING	4 QUALITY EDUCATION	5 GENDER EQUALITY	6 CLEAN WATER AND SANITATION
REDUCE	Biophysical Flows	R-B1	Per-capita water consumption	litres / capita / day						
		R-B2	Water network leakage	% of volume supplied						
		R-B3	Peak electricity for cooling	kW / building						
		R-B4	Impermeable surface area	sqm lot / total sqm						
		R-B5	Summer evapotranspiration deficit	mm / season						
	Socio-economic Impacts	R-S1	Household water + energy expenditure	€ / family / year						
		R-S2	Temperate public areas	no. / 10,000						
		R-S3	Heat-related food loss for retail	kg / month						
		R-S4	Water literacy index	% population (survey)						
		R-S5	Access to public fountains	no. / 1,000 inhabitants						
	Governance Devices	R-G1	Active demand-side management programs	no.						
		R-G2	Approved progressive water tariffs	yes / no + % bracket						
		R-G3	IoT coverage for leak detection	% network monitored						
		R-G4	Incentives for low-flow domestic devices	€ / year						
		R-G5	Resolutions on drinking water consumption limits	litres / day regulated						
REUSE	Biophysical Flows	U-B1	Volume of grey / rainwater reused	m³ / year						
		U-B2	% non-potable demand covered	%						
		U-B3	Average use cycles per litre	no.						
		U-B4	Energy saved from pumping	kWh / m³						
		U-B5	Reduction of nutrient load at discharge	kg N-P / year						
	Socio-economic Impacts	U-S1	Annual savings on condominium bills	€ / unit						
		U-S2	Discount on purification tariff obtained	€ / m³						
		U-S3	Volunteer hours in irrigated gardens	h / year						
		U-S4	Social acceptance of reuse	% in favour						
		U-S5	Jobs in a dual-pipe maintenance	no.						
	Governance Devices	U-G1	Building permits with dual network issued	no. / year						
		U-G2	Active public displays on reused volumes	no. / km²						
		U-G3	Local "fit-for-purpose" standards adopted	yes / no						
		U-G4	Tax incentives for reuse systems	€ / year						
		U-G5	Training sessions on greywater management	no. of participants						
RECOVER	Biophysical Flows	C-B1	Thermal energy recovered from wastewater	kWh / year						
		C-B2	Biogas produced	m³ / year						
		C-B3	Nutrients recovered (N, P, K)	Kg / year						
		C-B4	Microplastics removed	% inflow						
		C-B5	Net plant efficiency (Eout/Ein)	%						
	Socio-economic Impacts	C-S1	Market value of by-products	€ / year						
		C-S2	Certified carbon credits	t CO_{2eq} / year						
		C-S3	New jobs in the recovery chain	no.						
		C-S4	Number of educational visits to the plant	no. / year						
		C-S5	Patents filed on resource recovery	no.						
	Governance Devices	C-G1	Contracts for purchasing heat/fertilisers	no. signed						
		C-G2	Public subsidies for recovery technologies	€ / year						
		C-G3	Regulations on sludge treatment for reuse as	yes / no						
		C-G4	R&D quotas in the Administration's budget	% budget						
		C-G5	European / national funds intercepted	€ and no. of projects						
REGENERATE	Biophysical Flows	G-B1	De-impermeabilized soil	m²						
		G-B2	Average daytime UHI reduction	°C						
		G-B3	Infiltrated / evapotranspired volume	m³ / year						
		G-B4	Urban biodiversity index	Shannon						
		G-B5	Blue-green roof coverage	m² / capita						
	Socio-economic Impacts	G-S1	Access to green spaces with water	% population < 300 m						
		G-S2	WHO-5 variation (mental well-being)	Δ score						
		G-S3	Protected real estate value (with social housing)	€ / m²						
		G-S4	Cultural events in regenerated spaces	no. / year						
		G-S5	Participation in water citizen-science	no. of volunteers						
	Governance Devices	G-G1	Ordinances on retention / thermal emission indices	yes / no						
		G-G2	Blue-green maintenance budget	€ / capita / year						
		G-G3	Public-private agreements for green corridors	no.						
		G-G4	Eco-hydrological monitoring programs	yes / no						
		G-G5	Social housing quotas in regenerated areas	% units						
				TOTAL						

Tab. 4a | The multi-driver matrix connects the 4Rs of water metabolism with SDGs 1 to 6, structured into three interpretive dimensions: biophysical flows, socio-economic impacts, and governance mechanisms (credit: C. Sposito, 2025).

4R-SDGs Matrix

R-Category	Sub-Category	Indicator ID	Indicator Name	Unit	7	8	9	10	11	12
REDUCE	Biophysical Flows	R-B1	Per-capita water consumption	litres / capita / day						
		R-B2	Water network leakage	% of volume supplied						
		R-B3	Peak electricity for cooling	kW / building						
		R-B4	Impermeable surface area	sqm lot / total sqm						
		R-B5	Summer evapotranspiration deficit	mm / season						
	Socio-economic Impacts	R-S1	Household water + energy expenditure	€ / family / year						
		R-S2	Temperate public areas	no. / 10,000 inhabitants						
		R-S3	Heat-related food loss for retail	kg / month						
		R-S4	Water literacy index	% population (survey)						
		R-S5	Access to public fountains	no. / 1,000 inhabitants						
	Governance Devices	R-G1	Active demand-side management programs	no.						
		R-G2	Approved progressive water tariffs	yes / no + % bracket						
		R-G3	IoT coverage for leak detection	% network monitored						
		R-G4	Incentives for low-flow domestic devices	€ / year						
		R-G5	Resolutions on drinking water consumption limits	litres / day regulated						
REUSE	Biophysical Flows	U-B1	Volume of grey / rainwater reused	m³ / year						
		U-B2	% non-potable demand covered	%						
		U-B3	Average use cycles per litre	no.						
		U-B4	Energy saved from pumping	kWh / m³						
		U-B5	Reduction of nutrient load at discharge	kg N-P / year						
	Socio-economic Impacts	U-S1	Annual savings on condominium bills	€ / unit						
		U-S2	Discount on purification tariff obtained	€ / m³						
		U-S3	Volunteer hours in irrigated gardens	h / year						
		U-S4	Social acceptance of reuse	% in favour						
		U-S5	Jobs in a dual-pipe maintenance	no.						
	Governance Devices	U-G1	Building permits with dual network issued	no. / year						
		U-G2	Active public displays on reused volumes	no. / km²						
		U-G3	Local "fit-for-purpose" standards adopted	yes / no						
		U-G4	Tax incentives for reuse systems	€ / year						
		U-G5	Training sessions on greywater management	no. of participants						
RECOVER	Biophysical Flows	C-B1	Thermal energy recovered from wastewater	kWh / year						
		C-B2	Biogas produced	m³ / year						
		C-B3	Nutrients recovered (N, P, K)	Kg / year						
		C-B4	Microplastics removed	% inflow						
		C-B5	Net plant efficiency (Eout/Ein)	%						
	Socio-economic Impacts	C-S1	Market value of by-products	€ / year						
		C-S2	Certified carbon credits	t CO_{2eq} / year						
		C-S3	New jobs in the recovery chain	no.						
		C-S4	Number of educational visits to the plant	no. / year						
		C-S5	Patents filed on resource recovery	no.						
	Governance Devices	C-G1	Contracts for purchasing heat/fertilisers	no. signed						
		C-G2	Public subsidies for recovery technologies	€ / year						
		C-G3	Regulations on sludge treatment for reuse as fertiliser	yes / no						
		C-G4	R&D quotas in the Administration's budget	% budget						
		C-G5	European / national funds intercepted	€ and no. of projects						
REGENERATE	Biophysical Flows	G-B1	De-impermeabilized soil	m²						
		G-B2	Average daytime UHI reduction	°C						
		G-B3	Infiltrated / evapotranspired volume	m³ / year						
		G-B4	Urban biodiversity index	Shannon						
		G-B5	Blue-green roof coverage	m² / capita						
	Socio-economic Impacts	G-S1	Access to green spaces with water	% population < 300 m						
		G-S2	WHO-5 variation (mental well-being)	Δ score						
		G-S3	Protected real estate value (with social housing)	€ / m²						
		G-S4	Cultural events in regenerated spaces	no. / year						
		G-S5	Participation in water citizen-science	no. of volunteers						
	Governance Devices	G-G1	Ordinances on retention / thermal emission indices	yes / no						
		G-G2	Blue-green maintenance budget	€ / capita / year						
		G-G3	Public-private agreements for green corridors	no.						
		G-G4	Eco-hydrological monitoring programs	yes / no						
		G-G5	Social housing quotas in regenerated areas	% units						
				TOTAL						

Tab. 4b | The multi-driver matrix connects the 4Rs of water metabolism with SDGs 7 to 12, structured into three interpretive dimensions: biophysical flows, socio-economic impacts, and governance mechanisms (credit: C. Sposito, 2025).

4R-SDGs Matrix

R-Category	Sub-Category	Indicator ID	Indicator Name	Unit	13 CLIMATE ACTION	14 LIFE BELOW WATER	15 LIFE ON LAND	16 PEACE, JUSTICE AND STRONG INSTITUTIONS	17 PARTNERSHIPS FOR THE GOALS	TOTAL
REDUCE	Biophysical Flows	R-B1	Per-capita water consumption	litres / capita / day						
		R-B2	Water network leakage	% of volume supplied						
		R-B3	Peak electricity for cooling	kW / building						
		R-B4	Impermeable surface area	sqm lot / total sqm						
		R-B5	Summer evapotranspiration deficit	mm / season						
	Socio-economic Impacts	R-S1	Household water + energy expenditure	€ / family / year						
		R-S2	Temperate public areas	no. / 10,000 inhabitants						
		R-S3	Heat-related food loss for retail	kg / month						
		R-S4	Water literacy index	% population (survey)						
		R-S5	Access to public fountains	no. / 1,000 inhabitants						
	Governance Devices	R-G1	Active demand-side management programs	no.						
		R-G2	Approved progressive water tariffs	yes / no + % bracket						
		R-G3	IoT coverage for leak detection	% network monitored						
		R-G4	Incentives for low-flow domestic devices	€ / year						
		R-G5	Resolutions on drinking water consumption limits	litres / day regulated						
REUSE	Biophysical Flows	U-B1	Volume of grey / rainwater reused	m³ / year						
		U-B2	% non-potable demand covered	%						
		U-B3	Average use cycles per litre	no.						
		U-B4	Energy saved from pumping	kWh / m³						
		U-B5	Reduction of nutrient load at discharge	kg N-P / year						
	Socio-economic Impacts	U-S1	Annual savings on condominium bills	€ / unit						
		U-S2	Discount on purification tariff obtained	€ / m³						
		U-S3	Volunteer hours in irrigated gardens	h / year						
		U-S4	Social acceptance of reuse	% in favour						
		U-S5	Jobs in a dual-pipe maintenance	no.						
	Governance Devices	U-G1	Building permits with dual network issued	no. / year						
		U-G2	Active public displays on reused volumes	no. / km²						
		U-G3	Local "fit-for-purpose" standards adopted	yes / no						
		U-G4	Tax incentives for reuse systems	€ / year						
		U-G5	Training sessions on greywater management	no. of participants						
RECOVER	Biophysical Flows	C-B1	Thermal energy recovered from wastewater	kWh / year						
		C-B2	Biogas produced	m³ / year						
		C-B3	Nutrients recovered (N, P, K)	Kg / year						
		C-B4	Microplastics removed	% inflow						
		C-B5	Net plant efficiency (Eout/Ein)	%						
	Socio-economic Impacts	C-S1	Market value of by-products	€ / year						
		C-S2	Certified carbon credits	t CO_{2eq} / year						
		C-S3	New jobs in the recovery chain	no.						
		C-S4	Number of educational visits to the plant	no. / year						
		C-S5	Patents filed on resource recovery	no.						
	Governance Devices	C-G1	Contracts for purchasing heat/fertilisers	no. signed						
		C-G2	Public subsidies for recovery technologies	€ / year						
		C-G3	Regulations on sludge treatment for reuse as fertiliser	yes / no						
		C-G4	R&D quotas in the Administration's budget	% budget						
		C-G5	European / national funds intercepted	€ and no. of projects						
REGENERATE	Biophysical Flows	G-B1	De-impermeabilized soil	m²						
		G-B2	Average daytime UHI reduction	°C						
		G-B3	Infiltrated / evapotranspired volume	m³ / year						
		G-B4	Urban biodiversity index	Shannon						
		G-B5	Blue-green roof coverage	m² / capita						
	Socio-economic Impacts	G-S1	Access to green spaces with water	% population < 300 m						
		G-S2	WHO-5 variation (mental well-being)	Δ score						
		G-S3	Protected real estate value (with social housing)	€ / m²						
		G-S4	Cultural events in regenerated spaces	no. / year						
		G-S5	Participation in water citizen-science	no. of volunteers						
	Governance Devices	G-G1	Ordinances on retention / thermal emission indices	yes / no						
		G-G2	Blue-green maintenance budget	€ / capita / year						
		G-G3	Public-private agreements for green corridors	no.						
		G-G4	Eco-hydrological monitoring programs	yes / no						
		G-G5	Social housing quotas in regenerated areas	% units						
				TOTAL						

Tab. 4c | The multi-driver matrix connects the 4Rs of water metabolism with SDGs 13 to 17, structured into three interpretive dimensions: biophysical flows, socio-economic impacts, and governance mechanisms (credit: C. Sposito, 2025).

tomation is necessary to relieve users of management burdens without sacrificing the resilience of the system, and what form of governance – at different scales – can guarantee maintenance, health and equitable distribution of benefits over time.

Moving from the experimental stage to mass deployment will require a double leap: simplifying the engineering of the systems – for example, by integrating phytoremediation, rainwater harvesting and storage batteries into prefabricated modules – and combining economic incentives with specific water literacy campaigns that transform citizens-users into co-managers who are aware of the resource. Without this synergy between technology and culture, Bangalore's promising 'experiment' risks remaining a virtuous exception to centralised systems designed to quickly remove water, rather than retain and enhance it in the very place where the need arises.

Synergies and trade-offs between the 17 SDGs: environmental, social, cultural and economic implications | The path outlined so far – from a linear to a circular cycle, from the operational approaches of the 4Rs to the triad of resilience / sustainability / anti-fragility – gives us a new vision of the city that is no longer limited to 'managing' water, but metabolises it to temper itself and produce well-being for all its living beings. This paradigm shift requires us to reflect on how the new water-climate infrastructure intertwines with the 2030 Agenda as a whole.

The Sustainable Development Goals (SDGs) are not simply a catalogue of single-issue objectives, but constitute a coherent matrix that measures the capacity of eco-socio-technical systems to distribute benefits without shifting costs, not only economic ones, to other territories or future generations. Water, precisely because of its nature as a connective fluid, becomes the most effective lens for highlighting synergies and trade-offs between seemingly distant goals and targets, revealing that the transition to temperate cities is not driven by simple technological advancement but by a long-term cultural and economic reconfiguration.

SDG 6 is the core of this matrix: ensuring water availability and sustainable management means, in urban terms, replacing centralised, single-function networks with decentralised, metabolic ones capable of generating latent cooling. The domino effect of synergies with other goals is quite intuitive. The water that irrigates roofs with aeroponic crops (SDG 2) mitigates the urban heat island effect (SDG 13) and reduces mortality from heat stress (SDG 3); at the same time, it removes nutrients from wastewater, reducing the demand for synthetic fertilisers and consequently emissions from the chemical sector (SDG 9). The closed water-energy cycle also lowers peak loads on the electricity grid, facilitating the adoption of renewables (SDG 7) and freeing up financial resources that can be reallocated to development or social programmes such as those for the housing emergency of the most vulnerable groups (SDGs 1 and 10).

Furthermore, when water reuse feeds community gardens in certain geographical areas, there is also a positive impact on SDG 5: the time traditionally spent by women fetching or transporting water is significantly reduced, freeing up hours that can be reinvested in education or employment and also contributing to SDG 10 (Baratta, Finucci and Magarò, 2025; UNESCO, 2023). Starting from the nexus between water reuse and reducing inequalities, it is possible to show that a phytoremediation plant applies similar principles in social housing: due to low energy and management costs, the infrastructure provides direct savings for tenants and managers, making the long-term economic benefit clear.

The example of social housing for approximately 100 residents in Herzogenburg (Austria) illustrates this well: in Figure 35, the arrow at the bottom left points to a small technical room containing two straw filters for wastewater treatment, which is then reused to irrigate nearby gardens. This helps to reduce drinking water consumption and lowers operating costs. The filter material, which is replaced and composted every 6-12 months, completes the material cycle and enhances local biodiversity. Since rental fees remain linked to social housing, the project shows that such circular infrastructure is financially feasible and, by incorporating irrigation reuse and ecosystem services, contributes jointly to SDGs 6, 10, and 11. It mirrors the inclusive benefits seen in community gardens, applying the same approach to social housing. While there are different possible synergies among the 17 SDGs, there are also numerous trade-offs to consider; suffice it to say that every booster pump requires copper and every osmotic membrane consumes energy to produce: SDG 12 (responsible consumption and production) reminds us that the material footprint of innovation is not neutral and that the carbon footprint embedded in the production of pipes and tanks can diminish some of the claimed climate benefits.

Water metabolism also offers significant economic benefits: the initial investment for phytoremediation modules is higher than simply connecting to a public water network, but it pays for itself in less than ten years thanks to lower energy bills and fewer network peaks (SDG 7). The most overlooked benefit – yet important for SDG 8 – is the creation of a new labour market for the maintenance of widespread systems: agronomists, architects, engineers, plumbers, IT and electronics technicians, and IoT experts will need to acquire new specialisations, regenerating skills and professionalism in decline, aligning themselves with the principles of the doughnut economy: prospering without exceeding planetary boundaries (Raworth, 2023).

The cultural repercussions are less quantifiable but equally concrete. In Mediterranean cultures, where fountains and wash houses were located in public social spaces, bringing water back to the surface through irrigation channels or water bodies near parks or gardens reshapes the language of civic space, facilitating relationships. Drinking water, often used for garden irrigation and sanitation – especially during droughts and heatwaves – can also be repurposed to operate climate cooling systems in public areas. This includes techniques such as low-flow misting, recirculating fountains, timed wet surfaces, and rain gardens, all helping communities cope with extreme heat (Fig. 36).

Latent cooling from energy performance thus becomes a sensory experience that re-establishes continuity between the human body and the microclimate, orienting SDG 11 towards a dimension of 'augmented habitability' that goes beyond mere physical infrastructure. This gives rise to a new 'water citizenship' in which anyone who contributes, through domestic phytoremediation or system monitoring programmes, develops a sense of belonging that reduces the psychological distance between private action and public benefit, fertile ground for SDG 16 on strengthening inclusive institutions.

However, water metabolism itself can become a vector of inequality if it is not accompanied by adequate redistributive policies. Numerous cases of eco-gentrification show that urban regeneration, especially when accompanied by an improvement in quality of life and climatic conditions, increases property values and risks driving out less affluent residents (Triguero-Mas et alii, 2022; Anguelovski et alii, 2022). To counter this phenomenon, SDGs 10 and 11 aim to activate governance models capable of transferring the same benefits to areas of migration, for example by allocating a portion of urbanisation or concession charges to their urban regeneration: in this sense, water is configured as a common good to be redistributed in order to honour the principle of 'leaving no one behind' on which Agenda 2030 is based.

The intergenerational dimension of SDGs 4 and 13 emerges in educational practices. Including the urban water cycle in school curricula means moving from alarmist pedagogy to action-oriented pedagogy: urban digital twins, projected in augmented reality in educational laboratories, allow students to simulate how a litre of rainwater becomes cooling, fertiliser and food within their neighbourhood. This operational literacy builds cultural antibodies against a return to linear solutions, transforming every young person into a potential 'metabolic cycle tutor' for their community. Pilot results from Singapore, which has integrated the history of NEWater into science textbooks, indicate an increase in the acceptability of potable reuse from 48% to 78% among students, a social capital that no progressive tariff could generate on its own. In terms of the goals related to life on land and under water (SDGs 14 and 15), urban water metabolism has an ambivalent relationship. Nutrient recovery reduces marine eutrophication and pressure on coastal ecosystems, but microplastics released from filtration systems, such as PFAS, which often escape most treatments, can accumulate in water bodies, causing harmful effects on ecosystems. Here, the compromise becomes more pressing: maximising recycling without funding research into low-toxicity filter materials risks shifting the environmental burden to future generations. In this regard, the European roadmap on SDG 14 calls for strengthened monitoring protocols and agreements with the chemical industry to produce 'cradle-to-cradle' membranes, anticipating scenarios of extended producer responsibility (European Commission, 2023).

A further level of complexity arises with SDG 17, dedicated to partnerships for the goals. While the circular water cycle is not the responsibility of a single department, transforming cities into cooling nodes of the planetary network requires a leap in scale: transcalar agreements that transcend administrative and border boundaries and connect multiple urban areas along shared climate corridors. The network logic of cooling only works if the water / energy / food exchange chains between temperate cities are made operational by new intermediaries (inter-municipal consortia, metropolitan green bonds, open-source microclimate data networks) and by contractual constraints that reverse the paradigm 'from public good to climate service for humanity'.

The aforementioned experience of Copenhagen's Cloudburst Master Plan shows that scalability from building to neighbourhood and city only occurs

when the partnership is formalised in service contracts that give each actor a tangible benefit, such as reduced insurance premiums for businesses, structured data sharing, availability of flat roof space for social agricultural cooperatives (Follesa et alii, 2024), or tariff concessions for prosumer citizens.

In terms of SDG 17, agreements are needed between cities of different nationalities, linking, for example, the night-time surplus of purified water in Rotterdam (Netherlands) with the daytime deficit in Antwerp (Belgium), or integrating the urban sensor network of Barcelona (Spain) with the forecasting models of Marseille (France) to build cross-border 'corridors' between cooling nodes. SDG 17 thus becomes the hinge that transforms local water circularity into a planetary-scale thermodynamic infrastructure capable of modulating regional thermal gradients and ultimately reducing the planet's vulnerability to extreme weather events.

A 4R-SDGs matrix for urban water metabolism design | Tensions between synergies and compromises are therefore inevitable and must be accepted as the real driving force behind the project, provided that a tool is available to bring them to light before irreversible solutions are implemented. To this end, we propose a multi-driver matrix that systematises the 4Rs of water metabolism with the 17 SDGs (Tab. 4), breaking it down into three complementary lines of interpretation: biophysical flows, socio-economic impacts, and governance mechanisms.

The matrix requires that, first of all, the desired key performance indicators be quantified for each R, for example litres of water saved (Reduce), percentage of demand covered by 'fit-for-purpose' reuse (Reuse), kWh or kg of nutrients recovered per cubic metre of wastewater (Recover), hectares of soil de-impermeabilised or degrees reduced through evapotranspiration (Regenerate). The indicators will be positioned along the ordinates of the matrix; the type and number of indicators are variables that depend on the project and the context to which they refer. Each indicator is associated with a carbon intensity coefficient and a social vulnerability factor, so as to simultaneously reflect climate impacts and social repercussions, overcoming the traditional separation between environmental analysis and equity assessment, as suggested by the 'nexus plus justice' model (Boas, Biermann and Kanie, 2016).

Once performance has been normalised, it is projected onto the 17 SDGs, located along the x-axis, assigning scores from '+3' (high synergy) to '0' (neutral) to '-3' (high compromise). For example, irrigating green roofs with treated black water produces high synergies with SDGs 3, 6, 11 and 13, but may conflict with SDG 14 if the residual discharge carries surfactants, nutrients and micropollutants to the estuary; the matrix thus highlights the need for advanced treatment prior to discharge. The result is a 17-ray radar chart that highlights the asymmetries of the project: where the curve falls below zero, the designer is required to recalibrate the materials, technologies or scale of the intervention.

A final step is the conversion of the radar chart into a synthetic index (4R-SDGs Index) calculated as the weighted average of the synergy-compromise scores multiplied by the relative importance of the individual SDGs established at the local level. In a specific context, public health and equal access to water can be worth twice as much in neighbourhoods with low adaptive capacity, while the same infrastructure can be highly beneficial, for example, in a historic centre where it reduces the heat island effect (high weighting for SDGs 3 and 11) or may be inefficient along waterfronts, where the greater weighting assigned to the protection of marine and coastal ecosystems (SDG 14) and water resilience (SDG 9) highlights that irrigating public green spaces with grey water may even introduce unwanted residual loads.

The main advantage of the matrix is its implementable nature, but also its dialogical nature: it allows designers and administrations to explicitly state local priorities, measure trade-offs and treat water as a cross-cutting vector of equity, decarbonisation and resilience. The matrix translates into an operational dashboard that allows alternative scenarios (materials, technologies, scales) to be simulated, identifying where synergies outweigh compromises and justifying design choices to stakeholders using a shared language.

The same structure offers the scientific community a comparative platform capable of overcoming disciplinary fragmentation: the comparison between two projects is no longer limited to the cubic metres treated, but considers the extent to which each advances or hinders the overall objectives of Agenda 2030. In this way, the matrix constitutes a replicable protocol that bridges the gap between hydraulic, energy and socio-urban studies, opening up new avenues of research between cities, climate and different institutional contexts. At the same time, the 4R framework ceases to be a linear sequence and becomes a critical and adaptive device that enhances synergies, reduces compromises and makes decisions about the thermal and water future of urban areas transparent. To evolve it from a theoretical exercise into an effective decision-making tool, the multi-driver matrix must first be translated into a digital environment and be capable of interacting with the urban twins that some cities are already experimenting with to manage energy, traffic and air quality (Longo et alii, 2024). By connecting the matrix to networks of sensors measuring flow, water quality, surface temperature and socio-demographic indicators, it will be possible to transform each matrix cell into a node that is updated in near real time. The data-fusion algorithm will calculate the indicators (litres saved, kilowatt hours recovered, degrees of mitigation, cubic metres infiltrated, etc.) and automatically recalibrate the carbon intensity coefficient and social vulnerability factor, making the platform an evolutionary dashboard capable of anticipating the impacts of alternative design scenarios and verifying the performance of individual elements throughout the entire life cycle of the infrastructure.

At the same time, the weighting of SDGs could become adaptive through processes involving various stakeholders: workshops and service conferences with managers, neighbourhood and trade associations, businesses and operators, digital start-ups and health institutions will provide an opportunity to agree on the modulation of weights based on local priorities. In this way, the matrix will take on the function of a water literacy tool, forcing actors to openly negotiate the value of ecosystem services and distributed risks, overcoming the traditional opacity with which decisions are made on important issues affecting the community.

In order for the synergies identified to translate into fundable projects, each indicator must be linked to a local, regional or state financial resource or one that can be obtained through the provision of ecosystem services, always bearing in mind that network losses, thermal kilowatt hours recovered from wastewater and kilograms of nutrients are still monetisable. The matrix thus also becomes a '4R-SDGs economic-financial assessment tool' that can convert environmental and social benefits into cash flows, facilitating the use of 'white and green certificates', dynamic tariffs or climate performance contracts based on the Energy Citizenship Contract model developed by the H2020 project – GRETA (Boeri et alii, 2024). In this way, the ethical dimension of the matrix, based on the redistribution of benefits and costs, is intertwined with financial sustainability, a precondition for moving beyond the pilot phase and scaling up interventions.

The multi-driver matrix, in its current conceptual formulation, is not without intrinsic limitations, which may, however, constitute lines of research to make its operational reliability more robust. Two directions appear particularly promising.

The first concerns the refinement of the weights and coefficients that underpin the matrix calculations. As long as the carbon intensity of an indicator or the social vulnerability factor remains estimated on average values from the literature, the final result will continue to be affected by uncertainties that can amplify or attenuate the trade-offs between SDGs. Localised data samples – obtained through in situ monitoring and socio-economic campaigns – are therefore needed to construct 'territorial calibration' functions capable of reflecting the climatic, hydrological, social and ecosystemic heterogeneity of urban contexts. With this in mind, future research could investigate how the matrix reacts when the coefficients are learned by machine learning algorithms trained on time series of microclimatic sensors, cadastral data, deprivation indices and mobility tracks, among others.

The second direction concerns the longitudinal verification of impacts. The matrix captures a static pre-intervention scenario and can compare it with a hypothetical post-intervention scenario; however, a feedback function would need to be developed in its digital version to update the indicators during the operation of the infrastructure, record significant performance variations and reveal unexpected effects that may only emerge in the medium term. A future line of research could therefore consist of developing modules that take into account the entire life cycle of the elements (living and non-living) of the water system, climate change scenarios and social and real estate dynamics, transforming the matrix into a tool for continuous monitoring and adaptive maintenance.

Finally, the issue of transferability remains open. The matrix is designed for urban contexts in Mediterranean Europe, but it will have to prove its ability to engage with the specificities of monsoon or sub-Saharan regions, where the seasonality of rainfall, informal settlements and the scarcity of reliable historical data series pose additional challenges. The establishment of a network of international Living Labs – in which cities with different climates test the matrix on green roofs, blue-green corridors and phytoremediation systems – would be a decisive test bed for both calibrating the indicators and assessing the extent to which the 'weights' assigned locally to the SDGs are able to capture the gradients of social vulnerability on a global scale. These lines of research will determine whether the matrix matures



Figg. 37, 38 | Cities as potential 'cooling nodes' within a global network (credits: C. Sposito, 2025).

from a conceptual framework into an analytical tool to support urban policies and whether it can be used to guide the water-climate transition, not as a sum of technicalities, but as an adaptive process in which data science, systemic design and responsible city governance work synergistically to achieve the objectives of the 2030 Agenda.

Beyond engineering: emerging frontiers for urban and environmental design in temperate cities | The circular water economy is proposed as a solution to multiple urban crises, but its success will depend less and less on the refinement of technical devices – now widely available – and more on the ability to address three structural issues, often overlooked in international debate.

The first issue concerns the transparency of management and pricing. Recovering heat from wastewater or extracting nutrients for use as fertilisers requires comprehensive monitoring of flows and the management of large amounts of data. Although water infrastructure is publicly owned, digital technologies (sensors, algorithms, platforms) are usually managed by private service companies: without the guarantee of constant control of data management by the public sector, there is a risk that the data could be manipulated to generate undue profits, replicating the dynamics of the Hydro-social Contract described by Swyngedouw (2004).

Innovation cannot, therefore, be limited to the installation of devices or systems, but it is necessary to bind those who 'govern' the digital infrastructure to a code of ethics, to clarify how transparency of information protects users and whether tariffs are proportionate to the real costs of management.

The second issue concerns the myth that 'technology can eliminate environmental impact'. The promise of closing cycles and eliminating waste can create the illusion of infinite resource regeneration, obscuring the thermodynamic limits and impacts of 'clean' technologies themselves: hydrogen production, such as desalination, when powered by renewable energy sources, requires large areas for plants, while high-tech materials have a high environmental footprint, from the extraction of raw materials to production activities. In this regard, Wiedenhofer, Haas and Haberl (2023) warn that 'total circularity' is physically impossible; therefore, design ethics must remain vigilant, recognising the existence of unavoidable waste and non-negotiable ecological boundaries.

Finally, the third issue is the temporality of the transformation. Strategies that work over decades may generate initial emissions or high investments and tariff peaks that conflict with the social urgency of the moment. The literature on transitions calls for an assessment not only of the final state, but also of the distribution of costs and benefits over time (Heffron and McCauley, 2018): this translates into the need to introduce 'intertemporal equity' criteria into LCA models and cost/benefit analyses, going beyond established financial discounting. In this regard, it is worth noting a number of studies that have shown that investing in proactive strategies for extreme weather events produces benefits ten times greater than the costs of returning to normality after an emergency: shifting investments and tax and financial incentives towards prevention is therefore not only ethically necessary but also economically advantageous (Frantzeskaki et alii, 2019).

In this context, the original contribution that the disciplines of architecture can offer is not yet another blue-green roof prototype, but rather to highlight the socio-ecological tensions that such devices bring with them. Designing circularity is not equivalent to optimising a 'technical system', but to building a continuous materialisation of public values: transparent governance, equitable distribution of risks, recognition of biophysical limits and respect for social temporalities.

If these dimensions remain marginal, kilometres of smart pipes or the most sophisticated urban twins will only produce yet another replica of 20th-century water infrastructure, whereas giving them a central role will enable the city to truly transition from a 'dissipative node' to an 'engine of regeneration'. Implementation is no longer a question of 'if' the technology is ready, but of 'who' decides, 'for whom' and 'to what extent' we are willing to change the way we live with water.

Looking beyond the accounting of cubic metres and tonnes, the trinomial decentralisation / phytoremediation / aeroponic cultivation suggests that urban climate mitigation should act on the continuum of building/block/neighbourhood: it is not enough to scatter isolated devices, but it is necessary to connect the flows so that the wastewater treated on a roof becomes moisture available to the tree-lined street below and the drainage of the latter recharges the neighbourhood's water body. This creates a relational logic that coincides with that of the '15-minute city', in which functional proximity – housing, transport, work, services, green spaces, food production and water management within walking or cycling distance – is taken as a founding principle; the local hydro-climatic metabolism thus becomes an integral part of everyday accessibility, rather than a remote and invisible infrastructure.

The neighbourhood is configured as a 'homeothermic organism' thanks to constant local feedback: evapotranspiration lowers the air tempera-

ture, reducing the demand for air conditioning and therefore CO_2 emissions, which would have further increased the Earth's temperature. It is a virtuous cycle that transforms the heat island into a vapour pump and, if well structured, can push the wet bulb temperature below the thresholds that are dangerous to human health, which are increasingly being exceeded in Mediterranean countries.

At the same time, the greater availability of moist soils and canopies creates micro-habitats that feed urban food chains, strengthening ecosystems and counteracting the loss of biodiversity caused by the built environment. The result is a self-sufficient 'sponge' garden neighbourhood which, adhering to the 15-minute paradigm, reduces the need for motorised travel, with further benefits in terms of air quality and decongestion of the road network.

In this perspective, 'waste recycling' is no longer a separate chapter of planning, but a pillar of the urban strategy of multiscale mitigation and adaptation: the phytoremediation of buildings, the blue-green networks of blocks and neighbourhood water bodies constitute a single metabolic infrastructure that absorbs heat, closes nutrient cycles and preserves the aquifer.

To transform this enormous potential into a real application, a regulatory framework is needed, based on the recognition of the numerous systemic advantages, which provides, for example, exemption from sewage charges for closed-loop buildings, energy saving certificates for rooftop phytoremediation systems and a phosphorus and nitrogen credit market that rewards the reduction of synthetic fertilisers. In this way, private initiative will find a sufficiently certain economic return to get the supply chain off the ground, and local public administrations will be able to align themselves with the European 'Fit for 55' (European Commission, 2021a) and 'Zero Pollution' (European Commission, 2021b), offering an operational pathway to transform wastewater into vectors of decarbonisation and ecological regeneration.

If we wanted to go further and imagine a regulatory requirement to install micro-phytoremediation plants and aeroponic crops on the roofs of every new building, regardless of its intended use and type, on reflection it is likely that the requirement would not be perceived as a regulatory burden, but as the new environmental and hygiene standard for a city exposed to increasingly frequent water and heat stress. However, for this 'normality' to take hold, it is essential to accompany it with water and climate literacy programmes (Valenti et alii, 2024), capable of helping citizens understand that a roof that purifies and cultivates is not just a 'plant engineering machine', but a tool for collective well-being that regenerates resources instead of consuming them.

Such a paradigm shift requires, on the one hand, the re-establishment of urban planning tools to go beyond mere dimensional requirements and introduce performance criteria that combine hydrology, energy and ecosystem services and, on the other hand, specific Resilience Plans that take into account water retention capacity and the reduction of temperature peaks throughout the entire life cycle of the intervention. It is on this hybrid ground – where technical regulations, urban planning law and civic participation overlap – that the disciplines of architecture are called upon to reinvent their role, moving from the design of passive envelopes to the design of ecosystems capable of shaping the climate and generating energy and health as true urban commons. In addition to mitigating climate and water risks, regulatory adaptation offers the opportunity to integrate new ecological performance metrics – indices of flora and fauna richness, habitat continuity, carbon sequestration capacity and air quality – transforming the city into a 'common resource' in which water, energy, food and biodiversity are regenerated within a single circular urban metabolism. In this way, micro-phytoremediation and high-altitude agriculture are no longer simple green additions, but key elements of an integrated strategy that reconfigures the very substance of urban, environmental, architectural and technological design.

Research into the circular water economy is rapidly moving beyond the scope of hydraulic engineering to permeate the fields of urban design, experimental architecture and advanced environmental design. In the decade ahead, the challenge will no longer be just to operate dual networks or high-efficiency heat pumps, but to reimagine urban space as a metabolic interface capable of generating knowledge, energy, nourishment and aesthetic value through the very water we now treat as waste.

Theoretical and applied research is called upon to develop radically innovative paradigms at different project scales, overcoming disciplinary barriers and pursuing hybrid interpretations of living matter, generative algorithms and distributed governance. It will be able to loosen or tighten the three nodes mentioned above depending on the scale considered, and ordering the themes according to a progression of scales makes it clear that no single innovation is decisive: only the synergy between different disciplines – continuously reinterpreted in the light of participation and water literacy – can transform the desired 'new normal' into a viable path of climate and social regeneration for the temperate cities of the 21st century.

The turning point for water circularity to become standard practice is recognising that the decisive scale is neither the urban scale, which is too broad to guide everyday behaviour, nor that of the individual building, which is too small to govern ecological processes. The real metabolic laboratory is the neighbourhood, understood as a cluster of proximity in which blue-green infrastructure, public services, short food supply chains and social networks interact. It is precisely this 'intermediate' dimension that makes it possible to close physical cycles within a timeframe that is perceptible to residents and, at the same time, to aggregate sufficient water, thermal and financial volumes to make investments scalable.

At the neighbourhood level, the disciplines of architecture generally and technological and environmental design in particular can align and advance research across three interconnected areas – technical experimentation, social co-design, and adaptive governance – transforming the urban fabric into a genuine laboratory of water and climate metabolism.

The first guideline concerns the creation of hydro-climatic Living Labs in which blue-green roofs, reservoirs, green corridors and micro-phytopurifiers are monitored with distributed sensors that provide real-time data on flow rates, quality, thermal flows and comfort parameters. Pilot projects integrating climate sensors and public displays – the Climate-Café Malmö and the Sentilo network in Barcelona – show that making wet bulb temperature, air quality and recycled water volumes visible in real time encourages more intensive and conscious use of open space[22] (Boogaard et alii, 2020).

On this basis, a research agenda should test how sensor density and location influence the predictive modelling of the digital neighbourhood twin, verifying whether the available computing power and data transmission speed are actually capable of controlling booster valves and thermal batteries within five-minute cycles, a threshold beyond which mitigation loses its effectiveness during heat waves in Mediterranean countries (Giustolisi et alii, 2023).

An area that remains largely unexplored concerns also cross-modelling of life cycles: assuming that blue-green roofs, phytopurifiers and dual networks have different life cycles, the research could develop evolutionary programming algorithms which, within the digital twin, suggest coordinated retrofit windows to minimise material waste and reduce the carbon footprint in the operational phase. The goal, over a ten-year period, is to move from the neighbourhood as a sum of lots to a homeostatic district where building planning, water management and climate finance interact in the same service-life dashboard, offering designers and administrators the metabolic equivalent of urban 'health status'.

The second guideline explores the socio-cultural dimension of local metabolism, given that a circular economy only exists if residents recognise its value and support the costs of its daily management. Experimental studies in Singapore show that when the benefits of water recycling are shown to users through immersive devices (virtual or augmented reality), willingness to support micro-climate-indexed pricing increases by about a quarter (Iftekhar et alii, 2019). In this case, future research could investigate which literacy and awareness-raising tools – augmented reality, tactile representations of flows, neighbourhood gaming – can most effectively link domestic actions (separating grey water) to urban outcomes (cooling), building metrics of 'emotional water engagement' that feed into the social vulnerability indicators of the 4R-SDGs matrix. The third guideline cannot overlook economic and regulatory governance. If the benefits of widespread reuse remain unaccounted externalities, the adoption of circular practices will struggle; it is therefore necessary to experiment with dynamic tariffs that convert the thermal kilowatt hours subtracted from the heat island into tariff credits that can be spent on neighbourhood services. Research could therefore verify whether blockchain models, with 'smart contracts' that distribute credits in real time between users, operators and public administrations, are capable of increasing perceived transparency and reducing disputes over the quality and availability of recycled water.

Developing these lines of research can equip the neighbourhood with a 'toolbox' that combines high-tech experimentation, widespread literacy and innovation (conceptual, technological and regulatory), transforming the intermediate scale not into a simple testing ground, but into the true engine of a hydro-climatic transition that aims to be both socially just and ecologically sound.

Academic and industrial research in the coming years will be called upon to develop and validate lines of investigation within a coherent framework that aims, first and foremost, to decouple urban growth from the consumption of primary resources. It should be reiterated that this will not be a matter

of adding up solutions, but of composing genuine cultural, social, economic and environmental ecotones in which living materials, generative geometries and financial credits interact without compromise. The project will have to integrate new metrics into parametric processes, and architecture will be required to model facades that breathe moisture and condense dew, while environmental design will have to extend impact assessment to integrated value chains that include water / energy / food and ecosystem services.

In this new ecosystem, regenerated, thermally charged and symbolically celebrated water becomes the common thread that binds together the urban metabolism and its projection into the future, demonstrating that only effective decoupling can transform the city into the cooling node of a planetary network (Figg. 37, 38).

Acknowledgements

The paper is the result of joint reflection by both Authors. However, the introductory paragraphs, 'Temperate cities as potential cooling nodes in a global network' and 'Cooling with wastewater, from residual waste to resource' are attributed equally to C. Sposito and G. Mittersteiner, while the paragraphs 'From a linear to a circular water cycle', 'Resilience, sustainability and anti-fragility of urban water supply', 'Proactive planning between time and uncertainty', 'Best practices for circular cities', 'The role of water bodies in climate regulation and their integration with vegetation', 'Synergies and trade-offs between the 17 SDGs: environmental, social, cultural and economic implications', 'A 4R-SDGs matrix for urban water metabolism design' and 'Beyond engineering: emerging frontiers for urban and environmental design in temperate cities' are attributed to C. Sposito.

Notes

1) The Earth's fossil fuel reserves are limited. Based on current consumption rates, oil and natural gas are projected to last about 50 years, while coal could last 70-100 years. Specifically: a) for oil, estimates range from 47 to 56 years depending on various sources, assuming current usage levels; b) for natural gas, the outlook is also around 50 years; and c) for coal, proven reserves are larger, and although extraction faces environmental and political challenges, coal could last between 70 and 100 years under existing demand. For more information, see the webpage: infinity-renewables.com/when-will-fossil-fuels-run-out/#:~:text=When%20will%20Fossil%20Fuels%20expire,by%20a%20decade%20or%20more [Accessed 11 November 2025].

2) Cities are the hotspots of global warming, even in temperate climate zones, due to the urban heat island effect. In 1982, the temperature difference between urban and rural areas was still around 5 °C, but today, 40 years later, the UHI effect in Germany (according to the UBA) has increased to up to 10 °C. For more information, see the webpage: nationalgeographic.de/umwelt/2022/07/hitzeinseleffekt-warum-es-in-unseren-staedte-so-heiss-ist-und-was-dagegen-hilft/ [Accessed 11 November 2025].

3) In the European Union, the number of common birds in the agricultural landscape has decreased by a third since 1990, and the biomass of flying insects in protected areas in Germany (North Rhine-Westphalia, Rhineland-Palatinate, and Brandenburg) has fallen by 76% between 1989 and 2016. We are therefore approaching the start of the sixth major mass extinction in Earth's history. For more information, see the webpage: forschung-und-lehre.de/zeitfragen/der-verlust-der-biodiversitaet-und-was-wir-tun-koennen-3698 [Accessed 11 November 2025].

4) Since 2000, water-related risks have become more frequent and flood disasters have risen by 134% compared to the previous twenty years. Most casualties and economic damages from flooding happen in Asia, where there is a need to improve end-to-end warning systems for river floods. Drought fatalities mainly occur in Africa, highlighting the necessity for more effective warning systems for drought in that region. For more information, see the webpage: wmo.int/news/media-centre/wake-looming-water-crisis-report-warns [Accessed 11 November 2025].

5) In 2018, at least one month per year, 3.6 billion people lacked adequate water access. This number is projected to increase to over five billion by 2050. However, current management, monitoring, forecasting, and early warning systems are fragmented and insufficient, and investments in these areas remain inadequate. For more information, see the webpage: wmo.int/media/news/extraordinary-world-meteorological-congress-opens [Accessed 11 November 2025].

6) Recovery of non-renewable resources from effluents is often underestimated. Phosphorus production is projected to peak around 2040. While Europe has already started recovering phosphorus from sewage sludge, the process is energy-intensive, and 40% of the resource will still be lost. For more information, see the webpages: sciencetheearth.com/uploads/2/4/6/5/24658156/inconvenient.pdf and web.mit.edu/12.000/www/m2016/finalwebsite/problems/phosphorus.html [Accessed 11 November 2025].

7) For more information, see the webpage: wien.gv.at/statistik/lufttemperatur [Accessed 11 November 2025].

8) For more information, see the webpage: wien.gv.at/statistik/eis-hitze-tage [Accessed 11 November 2025].

9) For more information, see the webpage: wien.gv.at/pdf/ma15/bericht-sommer-2024.pdf [Accessed 11 November 2025].

10) For more information, see the webpage: joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/persistent-droughts-critical-water-shortages-and-crops-threatened-2024-07-31_en [Accessed 11 November 2025].

11) For more information, see the webpage: who.int/europe/news/item/01-08-2024-statement--heat-claims-more-than-175-000-lives-annually-in-the-who-european-region--with-numbers-set-to-soar [Accessed 11 November 2025].

12) For more information, see the webpage: forestresearch.gov.uk/research/forestry-and-water-resources/ [Accessed 11 November 2025].

13) For more information, see the webpage: aerofarms.com/farm-no-soil-95-less-water/ [Accessed 11 November 2025].

14) For more information, see the webpage: theguardian.com/cities/2019/aug/13/worlds-largest-urban-farm-to-open-on-a-paris-rooftop [Accessed 11 November 2025].

15) For more information, see the webpage: agtecher.com/product/tevel-flying-harvest-robots/ [Accessed 11 November 2025].

16) For more information, see the webpage: pattern-language.wiki/1.2._Blue_Green_Network [Accessed 11 November 2025].

17) For more information, see the webpage: citypopulation.de/en/italy/admin/campania/063__napoli [Accessed 11 November 2025].

18) This is the official length of the roads reported in the Civil Protection General Emergency Plan; the data can be verified on the webpage: comune.napoli.it/flex/files/c/f/6/D.041c5dae9d41adb468ff/PARTE1_PGE_RC_PCE_Protezione_Civile_Comune_Napoli_luglio2012.pdf [Accessed 11 November 2025].

19) For more information, see the webpage: mswmag.com/bytes/2024/05/israel-leads-the-way-recycling-nearly-90-of-its-wastewater?utm [Accessed 11 November 2025].

20) For more information, see the webpage: sswm.info/factsheet/vertical-flow-cw?utm [Accessed 11 November 2025].

21) For more information, see the webpage: nowtricity.com/country/italy/ [Accessed 11 November 2025].

22) For more information, see the webpage: theguardian.com/science/political-science/2018/apr/18/smart-cities-need-thick-data-not-big-data [Accessed 11 November 2025].

References

Agarwal, S., Araral, E., Fan, M., Qin, Y. and Zheng, H. (2022), "Water Conservation through Plumbing and Nudging", in *Nature Human Behaviour*, vol. 6, pp. 858-867. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41562-022-01320-y [Accessed 11 November 2025].

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1988), *Crop Evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation & Drainage paper 56*. [Online] Available at: cse.iitb.ac.in/~pocra/References/FAO_Paper56_Irrigation_Drainage.pdf [Accessed 11 November 2025].

Angelakis, A. N., Valipour, M., Ahmed, A. T., Tzanakakis, V., Paranychianakis, N. V., Krasilnikoff, J., Drusiani, R., Mays, L., El Gohary, F., Koutsoyiannis, D., Khan, S. and Del Giacco, L. J. (2021), "Water Conflicts – From Ancient to Modern Times and in the Future", in *Sustainability*, vol. 13, issue 8, article 4237, pp. 1-31. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su13084237 [Accessed 11 November 2025].

Anguelovski, I., Connolly, J. J. T., Cole, H., Garcia-Lamarca, M., Triguero-Mas, M., Baró, F., Martin, N., Conesa, D., Shokry, G., Pérez del Pulgar, C., Argüelles Ramos, L., Matheney, A., Gallez, E., Oscilowicz, E., López Máñez, J., Sarzo, B., Beltrán, M. A. and Martinez Minaya, J. (2022), "Green gentrification in European and North American cities", in *Nature Communications*, vol. 13, article 3816, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41467-022-31572-1 [Accessed 11 November 2025].

Asghari, F., Piadeh, F., Egyir, D., Yousefi, H., Rizzuto, J. P., Campos, L. C. and Behzadian, K. (2023), "Resilience Assessment in Urban Water Infrastructure – A Critical Review of Approaches, Strategies and Applications", in *Sustainability*, vol. 15, issue 14, article 11151, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su151411151 [Accessed 11 November 2025].

Babovic, F. (2018), "Antifragility and the development of urban water infrastructure", in *International Journal of Water Resources Development*, vol. 34, issue 4, pp. 499-509. [Online] Available at: doi.org/10.1080/07900627.2017.1369866 [Accessed 11 November 2025].

Bakker, K. (2012), "Water security – Research challenges and opportunities", in *Science*, vol. 337, issue 6097, pp. 914-915. [Online] Available at: doi.org/10.1126/science.1226337 [Accessed 11 November 2025].

Ballester, J., Quijal-Zamorano, M., Turrubiates, R. F. M., Pegenaute, F., Herrmann, F. R., Robine, J. M., Basagaña, X., Tonne, C., Antó, J. M. and Achebak, H. (2023), "Heat-related mortality in Europe during summer 2022", in *Nature Medicine*, vol. 29, pp. 1857-1866. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41591-023-02419-z [Accessed 11 November 2025].

Baratta, A. F. L., Finucci, F. and Magarò, A. (2025), "Povertà e infrastrutture idriche – Un caso studio nell'Africa Subsahariana | Poverty and water infrastructure – A case study in Sub-Saharan Africa", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 284-295. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17192025 [Accessed 11 November 2025].

Beceiro, P., Brito, R. S. and Galvão, A. (2020), "The Contribution of NBS to Urban Resilience in Stormwater Manage-

ment and Control – A Framework with Stakeholder Validation", in *Sustainability*, vol. 12, issue 6, article 2537, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12062537 [Accessed 11 November 2025].

Bertilsson, L., Wiklund, K., de Moura Tebaldi, I., Rezende, O. M., Veról, A. P. and Miguez, M. G. (2019), "Urban Flood Resilience – A Multi-Criteria Index to Integrate Flood Resilience into Urban Planning", in *Journal of Hydrology,* vol. 573, pp. 970-982. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.052 [Accessed 11 November 2025]

Blečić, I. and Cecchini, A. (2020), "Antifragile planning", in *Planning Theory*, vol. 19, issue 2, pp. 172-192. [Online] Available at: doi.org/10.1177/1473095219873365 [Accessed 11 November 2025].

Blečić, I. and Cecchini, A. (2017), "On the antifragility of cities and of their buildings", in *City, Territory and Architecture*, vol. 4, article 3, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s40410-016-0059-4 [Accessed 11 November 2025].

Boas, I., Biermann, F. and Kanie, N. (2016), "Cross-sectoral strategies in global sustainability governance – Towards a nexus approach", in *International Environmental Agreements | Politics, Law and Economics*, vol. 16, issue 3, pp. 449-464. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10784-016-9321-1 [Accessed 11 November 2025].

Boeri, A., Longo, D., Boulanger, S. O. M. and Massari, M. (2024), "Contratto di Cittadinanza Energetica e transizione delle città europee | Energy Citizenship Contract and european cities transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 170-179. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15132024 [Accessed 11 November 2025].

Bologna, R. and Hasanaj, G. (2023), "Modelli evoluti per la costruzione di un catalogo NbS per la resilienza e la biodiversità | Advanced models for the construction of an NbS catalogue for resilience and biodiversity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 179-190. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13152023 [Accessed 11 November 2025].

Boogaard, F. C., Venvik, G., Pedroso de Lima, R. L., Cassanti, A. C., Roest, A. H. and Zuurman, A. (2020), "ClimateCafé – An Interdisciplinary Educational Tool for Sustainable Climate Adaptation and Lessons Learned", in *Sustainability*, vol. 12, issue 9, article 3694, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12093694 [Accessed 11 November 2025].

Boulding, K. E. (1966), "The Economics of the Coming Spaceship Earth", in Jarrett, H. (ed.), *Environmental Quality in a Growing Economy*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, pp. 3-14. [Online] Available at: arachnid.biosci.utexas.edu/courses/thoc/readings/boulding_spaceshipearth.pdf [Accessed 11 November 2025].

Bouziotas, D., Stofberg, S., Frijns, J., Nikolopoulos, D. and Makropoulos, C. (2023), "Assessing the resilience of circularity in water management – A modelling framework to redesign and stress-test regional systems under uncertainty", in *Urban Water Journal*, vol. 20, issue 5, pp. 532-549. [Online] Available at: doi.org/10.1080/1573062X.2023.2190030 [Accessed 11 November 2025].

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M. and Pullin, A. S. (2010), "Urban Greening to Cool Towns and Cities – A Systematic Review of the Empirical Evidence", in *Landscape and Urban Planning*, vol. 97, issue 3, pp. 147-155. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006 [Accessed 11 November 2025].

Busker, T., de Moel, H., Haer, T., Schmeits, M., van den Hurk, B., Myers, K., Cirkel, D. G. and Aerts, J. (2022), "Blue-green roofs with forecast-based operation to reduce the impact of weather extremes", in *Journal of Environmental Management*, vol. 301, article 113750, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113750 [Accessed 11 November 2025].

Butler, D., Farmani, R., Fu, G., Ward, S., Diao, K. and Astaraie-Imani, M. (2014), "A New Approach to Urban Water Management – Safe and Sure", in *Procedia Engineering*, vol. 89, pp. 347-354. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.198 [Accessed 11 November 2025].

Capodaglio, A. G. (2024), "Urban Water Supply Sustainability and Resilience under Climate Variability – Innovative Paradigms, Approaches and Technologies", in *ACS ES&T Water*, vol. 4, issue 12, pp. 5185-5206. [Online] Available at: doi.org/10.1021/acsestwater.4c00203 [Accessed 11 November 2025].

Chapin, F. S., Matson, P. A. and Vitousek, P. M. (2011), *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*, Springer, New York. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-1-4419-9504-9 [Accessed 11 November 2025].

Chen, S., Brokhausen, F., Wiesner, P., Hegyi, D., Citir, M., Huth, M., Park, S., Rabe, J., Thamsen, L., Tscheikner-Gratl, F., Castelletti, A., Thamsen, P. U. and Cominola, A. (2024), "Coupled simulation of urban water networks and interconnected critical urban infrastructure systems – A systematic review and multi-sector research agenda", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 104, article 105283, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2024.105283 [Accessed 11 November 2025].

Christel, A., Dequiedt, S., Chemidlin-Prevost-Bouré, N., Mercier, F., Tripied, J., Comment, G., Djemiel, C., Bargeot, L., Matagne, E., Fougeron, A., Mina Passi, J.-B., Ranjard and Maron, P.-A. (2023), "Urban land uses shape soil microbial abundance and diversity", in *Science of The Total Environment*, vol. 883, article 163455, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163455 [Accessed 11 November 2025].

Circle Economy (2024), *The Circularity Gap Report 2024 – The circular economy is gaining popularity, but falling short on action*. [Online] Available at: circularity-gap.world/2024 [Accessed 11 November 2025].

City of Copenhagen (2014), *Cloudburst Management Pays Off – Economics of cloudburst and stormwater management in Copenhagen*. [Online] Available at: climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/publications/economics-of-cloudburst-and-stormwater-management-in-copenhagen/11258638/@@download/file/11258638.pdf [Accessed 11 November 2025].

Coccia, L., Cipolletti, S. and Corvaro, G. (2024), "Green Room – Un dispositivo architettonico e urbano per l'efficientamento energetico e il comfort ambientale | Green Room – An architectural and urban device for energy efficiency and environmental comfort", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 238-251. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15192024 [Accessed 11 November 2025].

Corradi, M., Stevens, T., Macaione, I., Raffa, A. and Andaloro, B. (2024), "Rigenerazione climatica green degli streetscapes – L'esperienza di De Urbanisten ad Anversa | Green climate-adaptive streetscapes regeneration – The De Urbanisten Experience in Antwerp", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 60-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1652024 [Accessed 11 November 2025].

Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P. and van den Belt, M. (1997), "The value of the world's ecosystem services and natural capital", in *Nature*, vol. 387, pp. 253-260. [Online] Available at: doi.org/10.1038/387253a0 [Accessed 11 November 2025].

Depietri, Y., Renaud, F. G. and Kallis, G. (2012), "Heat waves and floods in urban areas – A policy-oriented review of ecosystem services", in *Sustainability Science*, vol. 7, pp. 95-107. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11625-011-0142-4 [Accessed 11 November 2025].

Diao, K., Sweetapple, C., Farmani, R., Fu, G., Ward, S. and Butler, D. (2016), "Global Resilience Analysis of Water Distribution Systems", in *Water Research*, vol. 106, pp. 383-393. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.watres.2016.10.011 [Accessed 11 November 2025].

Dieperink, C., Koop, S. H. A., Witjes, M., Van Leeuwen, K. and Driessen, P. P. J. (2023), "City-to-city learning to enhance urban water management – The contribution of the City Blueprint Approach", in *Cities*, vol. 135, article 104216, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cities.2023.104216 [Accessed 11 November 2025].

Doughnut Economics Action Lab (2020), *The Amsterdam City Doughnut – A tool for transformative action*. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cities.2023.104216 [Accessed 11 November 2025].

Drangert, J.-O. and Kjerstadius, H. (2023), "Recycling – The future urban sink for wastewater and organic waste", in *City and Environment Interactions*, vol. 19, article 100104, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100104 [Accessed 11 November 2025].

Du, H., Song, X., Jiang, H., Kan, Z., Wang, Z. and Cai, Y. (2016), "Research on the cooling island effects of water body – A case study of Shanghai, China", in *Ecological Indicator*, vol. 67, pp. 31-38. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.040 [Accessed 11 November 2025].

Dumitru, A. and Wendling, L. (2021), *Evaluating the Impact of Nature-based Solutions – A Handbook for Practitioners*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2777/244577 [Accessed 11 November 2025].

DWA (2017), *Standard DWA-A 262 – Principles for Dimensioning, Construction and Operation of Wastewater Treatment Plants with Planted and Unplanted Filters for Treatment of Domestic and Municipal Wastewater*. [Online] Available at: shop.dwa.de/Standard-DWA-A-262-Principles-for-Dimensioning-Construction-and-Operation-of-Wastewater-Treatment-Plants-with-Planted-and-Unplanted-Filters-for-Treatment-of-Domestic-and-Municipal-Wastewater-November-2017/A-262E-PDF-17 [Accessed 11 November 2025].

EEA – European Environment Agency (2019), *Nutrient enrichment and eutrophication in Europe's seas – Moving towards a healthy marine environmen*t, EEA Report, n. 14/2019. [Online] Available at: eea.europa.eu/en/analysis/publications/nutrient-enrichment-and-eutrophication-in [Accessed 11 November 2025].

Elmqvist, T., Bai, X., Frantzeskaki, N., Griffith, C., Maddox, D., McPhearson, T., Parnell, S., Romero-Lankao, P., Simon, D. and Watkins, M. (eds) (2018), *Urban Planet – Knowledge Towards Sustainable Cities*, Cambridge University Press, Cambridge. [Online] Available at: doi.org/10.1017/9781316647554 [Accessed 11 November 2025].

European Commission (2023), T*ransition pathway for the chemical industry*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2873/873037 [Accessed 11 November 2025].

European Commission (2021a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Fit for 55 – Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality*, document 52021DC0550, COM/2021/550 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0550 [Accessed 11 November 2025].

European Commission (2021b), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Pathway to a Healthy Planet for All EU Action Plan – Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil*, document 52021DC0400, COM/2021/400 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0400 [Accessed 11 November 2025].

European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe*, document 52020DC0098, COM/2020/98 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0098 [Accessed 11 November 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2024), *Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on Nature Restoration and amending Regulation (EU) 2022/869*, document 32024R1991, PE/74/2023/REV/1. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/reg/2024/1991/oj [Accessed 11 November 2025].

Falkowski, P. G. (2012), "Ocean Science – The power of plankton", in *Nature*, vol. 483, pp. S17-S20. [Online] Available at: doi.org/10.1038/483S17a [Accessed 11 November 2025].

Fischer, K. (2022), "Hitzeinseleffekt – Warum es in unseren Städte so heiß ist und was dagegen hilft", in *nationalgeographic.de*, 13/07/2022. [Online] Available at: nationalgeographic.de/umwelt/2022/07/hitzeinseleffekt-warum-es-in-unseren-staedte-so-heiss-ist-und-was-dagegen-hilft [Acces-

sed 11 November 2025].

Folke, C. (2016), "Resilience (Republished)", in *Ecology and Society*, vol. 21, issue 4, article 44, pp. 1-30. [Online] Available at: doi.org/10.5751/ES-09088-210444 [Accessed 11 November 2025].

Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T. and Rockström, J. (2010), "Resilience thinking – Integrating resilience, adaptability and transformability", in *Ecology and Society*, vol. 15, issue 4, article 20. [Online] Available at: doi.org/10.5751/ES-03610-150420 [Accessed 11 November 2025].

Folke, C., Polasky, S., Rockström, J., Galaz, V., Westley, F., Lamont, M., Scheffer, M., Österblom, H., Carpenter, S. R., Chapin III, F. S., Seto, K. C., Weber, E. U., Crona, B. I., Daily, G. C., Dasgupta, P., Gaffney, O., Gordon, L. J., Hoff, H., Levin, S. A., Lubchenco, J., Steffen, W. and Walker, B. H. (2021), "Our future in the Anthropocene biosphere", in *Ambio | A Journal of Environment and Society*, vol. 50, pp. 834-869. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s13280-021-01544-8 [Accessed 11 November 2025].

Follesa, S., Corti, M., Struzziero, D. and Piluso, A. (2024), "Design del sistema alimentare per comunità resilienti – Agricoltura urbana e spazi sostenibili | Food system design for resilient communities – Urban agriculture and sustainable spaces", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 306-315. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15252024 [Accessed 11 November 2025].

Frantzeskaki, N., McPhearson, T., Collier, M. J., Kendal, D., Bulkeley, H., Dumitru, A., Walsh, C., Noble, K., van Wyk, E., Ordóñez, C., Oke, C. and Pintér, L. (2019), "Nature-based solutions for urban climate change adaptation – Linking science, policy and practice communities for evidence-based decision-making", in *BioScience*, vol. 69, issue 6, pp. 455-466. [Online] Available at: doi.org/10.1093/biosci/biz042 [Accessed 11 November 2025].

Frene, J. P., Faggioli, V., Covelli, J., Reyna, D., Gabbarini, L. A., Sobrero, P., Ferrari, A., Gutierrez, M. and Wall, L. G. (2022), "Agriculture by Irrigation Modifies Microbial Communities and Soil Functions Associated With Enhancing C Uptake of a Steppe Semi-Arid Soil in Northern Patagonia", in *Frontiers in Soil Science*, vol. 2, article 835849, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fsoil.2022.835849 [Accessed 11 November 2025].

Garcia, D., Muñoz Meléndez, G., Arteaga, A., Ojeda-Revah, L. and Mladenov, N. (2022), "Greening Urban Areas with Decentralized Wastewater Treatment and Reuse – A Case Study of Ecoparque in Tijuana, Mexico", in *Water*, vol. 14, issue 4, article 596, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/w14040596 [Accessed 11 November 2025].

Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R. and Pauleit, S. (2007), "Adapting Cities for Climate Change – The Role of the Green Infrastructure", in *Built Environment,* vol. 33, issue 1, pp. 115-133. [Online] Available at: doi.org/10.2148/benv.33.1.115 [Accessed 11 November 2025].

Giustolisi, O., Ciliberti, F. G., Berardi, L. and Laucelli, D. B. (2023), "Leakage management influence on water age of water distribution networks", in *Water Resources Research*, vol. 59, issue 1, article e2021WR031919, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1029/2021WR031919 [Accessed 11 November 2025].

Gómez Martín, E., Giordano, R., Pagano, A., van der Keur, P. and Máñez Costa, M. (2020), "Using a systems thinking approach to assess the contribution of nature-based solutions to sustainable development goals", in *Science of the Total Environment*, vol. 738, article 139693, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139693 [Accessed 11 November 2025].

Gómez-Baggethun, E. and Barton, D. N. (2013), "Classifying and valuing ecosystem services for urban planning", in *Ecological Economics*, vol. 86, pp. 235-245. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019 [Accessed 11 November 2025].

Gong, X., Liu, S., Ye, W. and Liu, L. (2025), "Decoupling of industrial water consumption and economic expansion in the Yangtze River Economic Belt – A comparative analysis across three Five-Year plans", in *Scientific Reports*, vol. 15, article 21186, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41598-025-06042-5 [Accessed 11 November 2025].

Goodwin, S. (2024), "Cybersecurity for water utilities isn't a game of (bad) luck – It's a game of skill", in *Smart Water Magazine*, newspaper online, 04/07/2024. [Online] Available at: smartwatermagazine.com/blogs/sebastian-goodwin/cybersecurity-water-utilities-isnt-a-game-bad-luck-its-a-game-skill [Accessed 11 November 2025].

Gourfi, A., Taïbi, A. N., Salhi, S., Hannani, M. E. and Boujrouf, S. (2022), "The surface urban heat island and key mitigation factors in arid climate cities, case of Marrakesh, Morocco", in *Remote Sensing*, vol. 14, issue 16, article 3935, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/rs14163935 [Accessed 11 November 2025].

Gunawardena, K. R., Wells, M. J. and Kershaw, T. (2016), "Utilising Green and Bluespace to Mitigate Urban Heat Island Intensity", in *Science of The Total Environment*, vol. 584-585, pp. 1040-1055. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158 [Accessed 11 November 2025].

Hartig, T., Mitchell, R., de Vries, S. and Frumkin, H. (2014), "Nature and Health", in *Annual Review of Public Health*, vol. 35, pp. 207-228. [Online] Available at: doi.org/10.1146/annure v-publhealth-032013-182443 [Accessed 11 November 2025].

Hayes, A. T., Jandaghian, Z., Lacasse, M. A., Gaur, A., Lu, H., Laouadi, A. and Wang, L. (2022), "Nature-Based Solutions (NBSs) to Mitigate Urban Heat Island (UHI) Effects in Canadian Cities", in *Buildings*, vol. 12, issue 7, article 925, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings12070925 [Accessed 11 November 2025].

He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J. and Bryan, B. A. (2021), "Future Global Urban Water Scarcity and Potential Solutions", in *Nature Communications*, vol. 12, article 4667, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3 [Accessed 11 November 2025].

Heffron, R. J. and McCauley, D. (2018), "What is the just transition?", in *Geoforum*, vol. 88, pp. 74-77. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.11.016 [Accessed 11 November 2025].

Horton, H. (2025), "How can England possibly be running out of water?", in *The Guardian*, newspaper online, 17/08/2025. [Online] Available at: theguardian.com/news/ng-interactive/2025/aug/17/how-can-england-possibly-be-running-out-of-water [Accessed 11 November 2025].

Iftekhar, S., Buurman, J., Lee, T. K., He, Q. and Chen, E. (2019), "Non-market value of Singapore's ABC Waters Program", in *Water Research*, vol. 157, pp. 310-320. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.004 [Accessed 11 November 2025].

ILO – International Labour Office (2019), *Working on a warmer planet – The impact of heat stress on labour productivity and decent work*. [Online] Available at: ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@dgreports/@dcomm/@publ/documents/publication/wcms_711919.pdf [Accessed 11 November 2025].

Ingaramo, R., Negrello, M., Khachatourian Saradehi, L. and Khachatourian Saradhi, A. (2023), "Il progetto transcalare delle nature-based solutions per l'Agenda 2030 – Innovazioni e interconnessioni | Transcalar project of nature-based solutions for the 2030 Agenda – Innovations and interconnections", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 97-108. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1382023 [Accessed 11 November 2025].

IPCC (2023a), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis – Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge. [Online] Available at: doi.org/10.1017/9781009157896 [Accessed 11 November 2025].

IPCC (2023b), *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability – Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge. [Online] Available at: doi.org/10.1017/9781009325844.002 [Accessed 11 November 2025].

IPCC, Lee, H. and Romero, J. (2023), *AR6 Synthesis Report – Climate Change 2023 – Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva, Switzerland. [Online] Available at: doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9 789291691647 [Accessed 11 November 2025].

Jacobs, C., Klok, L., Bruse, M., Cortesão, J., Lenzholzer, S. and Kluck, J. (2020), "Are urban water bodies really cooling?", in *Urban Climate*, vol. 32, article 100607, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100607 [Accessed 11 November 2025].

Jandaghian, Z. and Akbari, H. (2021), "Heat Mitigation Strategy to Reduce Heat-related Mortality in Two Canadian Cities in Toronto and Montreal, Canada", in *Energy and Buildings*, vol. 237, article 110697, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110697 [Accessed 11 November 2025].

Jandaghian, Z. and Colombo, A. (2024), "The Role of Water Bodies in Climate Regulation – Insights from Recent Studies on Urban Heat Island Mitigation", in *Buildings*, vol. 14, issue 9, article 2945, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14092945 [Accessed 11 November 2025].

Jareemit, D. and Srivanit, M. (2022), "A Comparative Study of Cooling Performance and Thermal Comfort under Street Market Shades and Tree Canopies in Tropical Savanna Climate", in *Sustainability*, vol. 14, issue 8, article 4653, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su14084653 [Accessed 11 November 2025].

JRC – Joint Research Centre (2020), A*tlas of the Human Planet 2020 – Open geoinformation for research, policy, and action*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2760/16432 [Accessed 11 November 2025].

Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J. and Bonn, A. (eds) (2017), *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas – Linkages Between Science*, Policy and Practice, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5 [Accessed 11 November 2025].

Kaluarachichi, T. U. N., Tjoelker, M. G. and Pfautsch, S. (2020), "Temperature Reduction in Urban Surface Materials through Tree Shading Depends on Surface Type Not Tree Species", in *Forests*, vol. 11, issue 11, article 1141, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.3390/f11111141 [Accessed 11 November 2025].

Kaya, H. D., Chan, P. W. C., Schraven, D. F. J. and Leijten, M. (2025), "Infrastructure in transitions – A systematic review of how infrastructure influences and is influenced by sustainability transitions", in *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 57, article 101034, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eist.2025.101034 [Accessed 11 November 2025].

Kokkonen, T. V., Grimmond, C. S. B. Christen, A., Oke, T. R. and Järvi, L. (2018), "Changes to the Water Balance Over a Century of Urban Development in Two Neighborhoods – Vancouver, Canada", in *Water Resources Research*, vol. 54, issue 9, pp. 6625-6642. [Online] Available at: doi.org/10.1029/2017WR022445 [Accessed 11 November 2025].

Koop, S. H. A., Van Dorssen, A. J. and Brouwer, S. (2019), "Enhancing Domestic Water Conservation Behaviour – A Review of Empirical Studies on Influential Tactics", in *Journal of Environmental Management*, vol. 247, pp. 867-876. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.126 [Accessed 11 November 2025].

Kulkarni, A. (2025), "The Cheonggyecheon Restoration Project – A case study of cultural and natural asset revival", in *amarkulkarni.in*, 01/06/2025. [Online] Available at: amarkulkarni.in/post/the-cheonggyecheon-restoration-project-a-case-study-of-cultural-and-natural-asset-revival [Accessed 11 November 2025].

Kwon, S., Kang, Y., Nam, S. H. and Kim, Y. D. (2025), "Water quality monitoring using hybrid physical-soft sensors for river digital twins – A comprehensive review", in *Water Science & Technology*, vol. 0, n. 0, issue 1, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.2166/wst.2025.145 [Accessed 11 November 2025].

Larazova, V., Asano, T., Bahri, A. and Anderson, J. (2013), *Milestones in Water Reuse – The Best Success Stories*, IWA Publishing, London. [Online] Available at: doi.org/10.2166/9781780400716 [Accessed 11 November 2025].

Lee, K. and Jepson, W. (2020), "Drivers and Barriers to Urban Water Reuse – A Systematic Review", in *Water Security*, vol. 11, article 100073, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100073 [Accessed 11 November 2025].

Lefebvre, O. (2018), "Beyond NEWater – An insight into Singapore's water reuse prospects", in *Current Opinion in Environmental Science & Health*, vol. 2, pp. 26-31. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.001 [Accessed 11 November 2025].

Longo, D., Turillazzi, B., Roversi, R., Lilla, S., Nucci, C. A., Piccinini, A. and Costa, A. (2024), "Gemello digitale urbano e modellazione energetica – Esperienze e analisi di casi d'uso | Urban digital twin and energy modeling – Experiences and case study analyses", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 160-169. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15122024 [Accessed 11 November 2025].

Luan, I. O. B. (2010), "Singapore Water Management Policies and Practices", in *International Journal of Water Resources Development*, vol. 26, issue 1, pp. 65-80. [Online] Available at: doi.org/10.1080/07900620903392190 [Accessed 11 November 2025].

Luthy, R. G., Wolfand, J. M. and Bradshaw, J. L. (2020), "Urban Water Revolution – Sustainable Water Futures for California Cities", in *Journal of Environmental Engineering*, vol. 146, issue 7, article 04020065, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001715 [Accessed 11 November 2025].

Magliocco, A. and Oneto, G. (2023), "Configurazioni spaziali nell'analisi ambientale urbana – Il contributo dell'isola di calore | Spatial configurations in urban environmental analysis – The role of the heat island effect", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 216-223. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14182023 [Accessed 11 November 2025].

Mahlknecht, J., González-Bravo, R. and Loge, F. J. (2020), "Water-energy-food security – A Nexus perspective of the current situation in Latin America and the Caribbean", in *Energy*, vol. 194, article 116824, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101341 [Accessed 11 November 2025].

Marques, R. C., Pinto, F. S. and Miranda, J. (2023), "Inclusivity, resilience, and circular economy of water services – Embracing a sustainable water future", in Utilities Policy, vol. 85, article 101685, pp. 1-5. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jup.2023.101685 [Accessed 11 November 2025].

Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. and Behrens III, W. W. (1972), *The Limits to Growth – A Report for The Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, Universe Books, New York.

Meilinger, V. and Monstadt, J. (2025), "One water in Los Angeles? Contesting the circular city through infrastructural practices", in *Urban Geography*, vol. 46, issue 6, pp. 1432-1455. [Online] Available at: doi.org/10.1080/02723638.2025.2456376 [Accessed 11 November 2025].

Mill, J. S. (1848), *Principles of Political Economy with Some of Their Applications to Social Philosophy*, Longmans, Green Reader, and Dyer, London.

Mooren, C. E., Munaretto, S., La Jeunesse, I., Sievers, E., Hegger, D. L. T., Driessen, P. P. J., Huesker, F., Cirelli, C., Canovas, I. N., Mounir, K. and Madrigal, J. G. (2025), "Water-energy-food–ecosystem nexus – How to frame and how to govern", in *Sustainability Science*, vol. 20, issue 6, pp. 2313-2334. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11625-025-01691-x [Accessed 11 November 2025].

Morpurgo, E. (2024), "Biomateriali e zone umide – Filiere per l'edilizia e il tessile dalla valorizzazione di ecosistemi locali | Biomaterials and wetlands – Supply chains for construction and textiles through the enhancement of local ecosystems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 314-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16262024 [Accessed 11 November 2025].

Mortezazadeh, M., Jandaghian, Z. and Wang, L. (2021), "Integrating CityFFD and WRF for modeling urban microclimate under heatwaves", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 66, article 102670, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2020.102670 [Accessed 11 November 2025].

Moscatelli, M. and Raffa, A. (2023), "Infrastrutture verdi in contesti urbani aridi – Ecologie in transizione oltre il Green Riyadh | Green infrastructure in arid urban contexts – Transitioning ecologies beyond Green Riyadh", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 75-86. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1362023 [Accessed 11 November 2025].

Moser, S. C. and Ekstrom, J. A. (2010), "A framework to diagnose barriers to climate change adaptation", in *PNAS | Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, issue 51, pp. 22026-22031. [Online] Available at: doi.org/10.1073/pnas.1007887107 [Accessed 11 November 2025].

Nancharaiah, Y. V., Venkata Mohan, S. and Lens, P. N. L. (2016), "Recent advances in nutrient removal and recovery in biological and bioelectrochemical systems", in *Bioresource Technology*, vol. 215, pp. 173-185. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.129 [Accessed 11 November 2025].

Ness, D. (2024), "La decarbonizzazione degli edifici sarà sufficiente? – Limitare e ridistribuire l'aumento di superficie costruita | Will decarbonising buildings be enough? – Constrain and redistribute growth in floor area", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 84-97. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1562024 [Accessed 11 November 2025].

Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., Williams, N. S. G. (2015), "Planning for Cooler Cities – A Framework to Prioritize Green Infrastructure to Mitigate High Temperatures in Urban Landscapes", in *Landscape and Urban Planning*, vol. 134, pp. 127-138. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018 [Accessed 11 November 2025].

Nowak, D. J., Crane, D. E. and Stevens, J. C. (2006), "Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States", in *Urban Forestry and Urban Greening*, vol. 4, issue 3-4, pp. 115-123. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007 [Accessed 11 November 2025].

Oberascher, M., Rauch, W. and Sitzenfrei, R. (2022), "Towards a smart water city – A comprehensive review of applications, data requirements, and communication technologies for integrated management", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 76, article 103442, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2021.103442 [Accessed 11 November 2025].

Pacific Institute (2024), *Catalyzing Global Action for Water Resilience – 2023 Impact Report*. [Online] Available at: pacinst.org/wp-content/uploads/2024/08/PI-ImpactReport2023_F.pdf [Accessed 11 November 2025].

Pahl-Wostl, C. (2007), "Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change", in *Water Resources Management*, vol. 21, issue 1, pp. 49-62. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11269-006-9040-4 [Accessed 11 November 2025].

Panduro, T. E., Nainggolan, D. and Zandersen, M. (2024), "Cost-effectiveness analysis of urban nature-based solutions – A stepwise ranking approach", in *Nature-Based Solutions*, vol. 6, article 100186, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100186 [Accessed 11 November 2025].

Peng, Y. and Reilly, K. (2021), *Using Nature to Reshape Cities and Live with Water – An Overview of the Chinese Sponge City Programme and its Implementation in Wuhan*, Grow Green. [Online] Available at: growgreenproject.eu/wp-content/uploads/2021/01/Sponge-City-Programme-in-Wuhan-China.pdf [Accessed 11 November 2025].

Pörtner, H. O., Scholes, R. J., Agard, J., Archer, E., Arneth, A., Bai, X., Barnes, D., Burrows, M., Chan, L., Cheung, W. L., Diamond, S., Donatti, C., Duarte, C., Eisenhauer, N., Foden, W., Gasalla, M. A., Handa, C., Hickler, T., Hoegh-Guldberg, O., Ichii, K., Jacob, U., Insarov, G., Kiessling, W., Leadley, P., Leemans, R., Levin, L., Lim, M., Maharaj, S., Managi, S., Marquet, P. A., McElwee, P., Midgley, G., Oberdorff, T., Obura, D., Osman, E., Pandit, R., Pascual, U., Pires, A. P. F., Popp, A., Reyes-García, V., Sankaran, M., Settele, J., Shin, Y. J., Sintayehu, D. W., Smith, P., Steiner, N., Strassburg, B., Sukumar, R., Trisos, C., Val, A. L., Wu, J., Aldrian, E., Parmesan, C., Pichs-Madruga, R., Roberts, D. C., Rogers, A. D., Díaz, S., Fischer, M., Hashimoto, S., Lavorel, S., Wu, N. and Ngo, H. T. (2021), *Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change*, IPBES secretariat, Bonn. [Online] Available at: doi.org/10.5281/zenodo.4659158 [Accessed 11 November 2025].

Probst, N., Bach, P. M., Cook, L. M., Maurer, M. and Leitao, J. P. (2022), "Blue Green Systems for urban heat mitigation – Mechanisms, effectiveness and research directions", in *Blue-Green Systems*, vol. 4, issue 2, pp. 348-376. [Online] Available at: doi.org/10.2166/bgs.2022.028 [Accessed 11 November 2025].

Rahaman, A., dos Santos, F. R., Haefner Centenaro, S., Fekih, A., Wiecheteck, G. and Chambers, T. L. (2025), "Sustainability assessment of floating photovoltaic (FPV) system – A multidimensional comprehensive analysis across the water-energy nexus", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 506, article 145468, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145468 [Accessed 11 November 2025].

Rahman, M. A., Franceschi, E., Pattnaik, N., Moser-Reischl, A., Hartmann, C., Paeth, H., Pretzsch, H., Rötzer, T. and Pauleit, S. (2022), "Spatial and temporal changes of outdoor thermal stress – Influence of urban land cover types", in *Scientific Reports*, vol. 12, article 671, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41598-021-04669-8 [Accessed 11 November 2025].

Raworth, K. (2023), *Doughnut Economics – Seven Ways to Think like a 21st-Century Economist*, Chelsea Green Publishing, White River Junction, Vermont.

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, S., Sörlin, S., Snyder, P. S., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. and Foley, J. A. (2009), "A safe operating space for humanity", in *Nature*, vol. 461, pp. 472-475. [Online] Available at: doi.org/10.1038/461472a [Accessed 11 November 2025].

Rossi, L., Wens, M., De Moel, H., Cotti, D., Sabino Siemons, A.-S., Toreti, A., Maetens, W., Masante, D., Van Loon, A., Hagenlocher, M., Rudari, R., Meroni, M., Isabellon, M., Avanzi, F., Naumann, G. and Barbosa, P. (2023), *European Drought Risk Atlas*, JRC135215, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2760/608737 [Accessed 11 November 2025].

Salih, S., Abdelmaboud, A., Husain, O., Motwakel, A., Elshafie, H., Sharif, M. and Hamdan, M. (2025), "IoT in urban development – Insight into smart city applications, case studies, challenges and future prospects", in *PeerJ Computer Science*, vol. 11, article e2816, pp. 1-46. [Online] Available at: doi.org/10.7717/peerj-cs.2816 [Accessed 11 November 2025].

Santamouris, M., Paolini, R., Haddad, S., Synnefa, A., Garshasbi, S., Hatvani-Kovacs, G., Gobakis, K., Yenneti, K., Vasilakopoulou, K., Feng, J., Gao, K., Papangelis, G., Dandou, A., Methymaki, G., Portalakis, P. and Tombrou, M. (2020), "Heat mitigation technologies can improve sustainability in cities – An holistic experimental and numerical impact assessment of urban overheating and related heat mitigation strategies on energy consumption, indoor comfort, vulnerability and heat-related mortality and morbidity in cities", in *Energy and Buildings*, vol. 217, article 110002, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110002 [Accessed 11 November 2025].

Simsek, C. K. and Odul, H. (2018), "Investigation of the effects of wetlands on micro-climate", in *Applied Geography*, vol. 97, pp. 48-60. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.05.018 [Accessed 11 November 2025].

Smith, I. A., Fabian, M. P. and Hutyra, L. R. (2023), "Urban green space and albedo impacts on surface temperature across seven United States cities", in *Science of The Total Environmental*, vol. 857, issue 3, article 159663, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159663 [Accessed 11 November 2025].

Spyrou, C., Koukoula, M., Saviolakis, P.-M., Zerefos, C., Loupis, M., Masouras, C., Pappa, A. and Katsafados, P. (2024), "Green Roofs as a Nature-Based Solution to Mitigate Urban Heating During a Heatwave Event in the City of Athens, Greece", in *Sustainability*, vol. 16, issue 22, article 9729, pp. 1-24.

[Online] Available at: doi.org/10.3390/su16229729 [Accessed 11 November 2025].

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B. and Sörlin, S. (2015), "Planetary boundaries – Guiding human development on a changing planet", in *Science*, vol. 347, issue 6223, article 736, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1126/science.1259855 [Accessed 11 November 2025].

Stewart, I. D. and Oke, T. R. (2012), "Local climate zones for urban temperature studies", in *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, issue 12, pp. 1879-1900. [Online] Available at: doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1 [Accessed 11 November 2025].

Sun, R., Chen, A., Chen, L. and Lü, Y. (2012), "Cooling Effects of Wetlands in an Urban Region – The Case of Beijing", in *Ecological Indicators*, vol. 20, pp. 57-64. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.02.006 [Accessed 11 November 2025].

Sun, R. and Chen, L. (2012), "How can urban water bodies be designed for climate adaptation?", in *Landscape and Urban Planning*, vol. 105, issues 1-2, pp. 27-33. Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.11.018 [Accessed 11 November 2025].

Swyngedouw, E. (2004), *Social Power and the Urbanization of Water – Flows of Power*, Oxford University Press, Oxford. [Online] Available at: doi.org/10.1093/oso/9780198233916.001.0001 [Accessed 11 November 2025].

Taleb, N. N. and Douady, R. (2013), "Mathematical definition, mapping, and detection of (anti)fragility", in *Quantitative Finance*, vol. 13, issue 11, pp. 1677-1689. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14697688.2013.800219 [Accessed 11 November 2025].

Tan, X., Sun, X., Huang, C., Yuan, Y. and Hou, D. (2021), "Comparison of cooling effect between green space and water body", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 67, article 102711, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2021.102711 [Accessed 11 November 2025].

Tonanzi, B., Gallipoli, A., Gianico, A., Montecchio, D., Pagliaccia, P., Rossetti, S. and Braguglia, C. M. (2021), "Elucidating the key factors in semicontinuous anaerobic digestion of urban biowaste – The crucial role of sludge addition in process stability, microbial community enrichment and methane production", in *Renewable Energy*, vol. 179, pp. 272-284. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.049 [Accessed 11 November 2025].

Tortajada, C. (2006), "Water Management in Singapore", in *International Journal of Water Resources Development*, vol. 22, issue 2, pp. 227-240. [Online] Available at: doi.org/10.1080/07900620600691944 [Accessed 11 November 2025].

Triguero-Mas, M., Anguelovski, I., Connolly, J. J. T., Martin, N., Matheney, A., Cole, H. V. S., Pérez-Del-Pulgar, C., García-Lamarca, M., Shokry, G., Argüelles, L., Conesa, D., Gallez, E., Sarzo, B., Beltrán, M. A., López Máñez, J., Martínez-Minaya, J., Oscilowicz, E., Arcaya, M. C. and Baró, F. (2022), "Exploring green gentrification in 28 global North cities – The role of urban parks and other types of greenspaces", in *Environmental Research Letters*, vol. 17, issue 10, article 104035, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1748-9326/ac9325 [Accessed 11 November 2025].

Tucci, F., Altamura, P. and Pani, M. M. (2023), "Modulare le dinamiche urbane in chiave climatica – Spazi intermedi e neutralità climatica | Modulating urban dynamics from a climate perspective – In-between spaces and climate neutrality", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 204-215. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14172023 [Accessed 11 November 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: docs.un.org/en/A/RES/70/1 [Accessed 11 November 2025].

UNESCO (2023), *Partnerships and Cooperation for Water – The United Nations World Water Development Report 2023*, UNESCO Publishing, Paris. [Online] Available at: unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023 [Accessed 11 November 2025].

UNI EN 12566-3:2016, *Small Wastewater Treatment Systems for up to 50 PT – Part 3 – Packaged and/or Site Assembled Domestic Wastewater Treatment Plants*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-12566-3-2016 [Accessed 11 November 2025].

United Nations (1987), *Our Common Future – Report of the World Commission on Environment and Development*. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf [Accessed 11 November 2025].

US Water Alliance and Stantec (2023), *A Promising Water Pricing Model for Equity and Financial Resilience*. [Online] Available at: uswateralliance.org/wp-content/uploads/2023/09/A-Promising-Water-Pricing-Model-for-Equity-and-Financial-Resilience_0.pdf [Accessed 11 November 2025].

Vahedi, R., Ledari, M. B. and Fani, M. (2025), "Advancing circular economy in the water-energy-food nexus", in *Journal of Environmental Management*, vol. 376, article 124324, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124324 [Accessed 11 November 2025].

Valente, R., Mozingo, L. A., Bosco, R. and Giacobbe, S. (2024), "Gestione integrata delle risorse naturali in contesti urbani sostenibili | Integrated natural resource management in sustainable urban context", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 180-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15142024 [Accessed 11 November 2025].

Valenti, A., Scalisi, F., Sposito, C., Dellamotta, L. and Masserdotti, A. (2024), "Energia, tecnologia emotiva e valore culturale dei dati – Creare consapevolezza nell'utente con lo storytelling | Energy, emotional technology and cultural value of data – Creating user awareness through storytelling", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 70-83. [Online] Available at: doi. org/10.19229/2464-9309/1552024 [Accessed 11 November 2025].

Vercruysse, K., Dawson, D. A. and Wright, N. (2019), "Interoperability – A Conceptual Framework to Bridge the Gap between Multifunctional and Multisystem Urban Flood Management", in *Journal of Flood Risk Management*, vol. 12, article e12535, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1111/jfr3.12535 [Accessed 11 November 2025].

Vinayagam, V., Sikarwar, D., Das, S. and Pugazhendhi, A. (2024), "Envisioning the innovative approaches to achieve circular economy in the water and wastewater sector", in *Environmental Research*, vol. 241, article 117663, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.envres.2023.117663 [Accessed 11 November 2025].

Walker, N. L., Prysor Williams, A. and Styles, D. (2021), "Pitfalls in international benchmarking of energy intensity across wastewater treatment utilities", in *Journal of Environmental Management*, vol. 300, article 113613, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113613 [Accessed 11 November 2025].

Wang, Y., Zhan, Q. and Ouyang, W. (2019), "How to quantify the relationship between spatial distribution of urban waterbodies and land surface temperature?", in *Science of The Total Environment*, vol. 671, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.377 [Accessed 11 November 2025].

Ward, P. J., de Ruiter, M. C., Mard, J., Schroter, K., Van Loon, A., Veldkamp, T., von Uexkull, N., Wanders, N., Aghakouchak, A., Arnbjerg-Nielsen, K., Capewell, L., Llasat, M. C., Day, R., Dewals, B., Di Baldassarre, G., Huning, L. S., Kreibich, H., Mazzoleni, M., Savelli, E., Teutschbein, C., van den Berg, H., van der Heijden, A., Vincken, J. M. R., Waterloo, M. J., Wens, M. (2020), "The need to integrate flood and drought disaster risk reduction strategies", in *Water Security*, vol. 11, article 100070, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100070 [Accessed 11 November 2025].

Warner, J. F. and Meissner, R. (2021), "Cape Town's Day Zero water crisis – A manufactured media event?", in *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 64, article 102481, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102481 [Accessed 11 November 2025].

Wiedenhofer, D., Haas, W. and Haberl, H. (2023), "Towards a Sustainable Circular Economy on a Full Planet – The Role of Thermodynamic Principles", in *papers.ssrn.com*, 10/08/2023. [Online] Available at: dx.doi.org/10.2139/ssrn.4538296 [Accessed 11 November 2025].

Wilson, B. (2023), *Urban Jungle – Wilding the City*, Jonathan Cape, London.

Yoshida, H., Gable, J. J. and Park, J. K. (2012), "Evaluation of organic waste diversion alternatives for greenhouse gas reduction", in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 60, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.011 [Accessed 11 November 2025].

Yu, Z., Yang, G., Zuo, S., Jørgensen, G., Koga, M. and Vejre, H. (2020), "Critical review on the cooling effect of urban blue-green space – A threshold-size perspective", in *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 49, article 126630, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126630 [Accessed 11 November 2025].

Zarcone, R., Nava, F. and Tucci, F. (2024), "Mitigazione del clima e comfort umano – Uno strumento per la modellazione e simulazione di supporto alle decisioni | Climate mitigation and human comfort – A decision-support modeling and simulation tool", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 228-237. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15182024 [Accessed 11 November 2025].

Zhang, Y., Murray, A. T. and Turner II, B. L. (2017), "Optimizing green space locations to reduce daytime and nighttime urban heat island effects in Phoenix, Arizona", in *Landscape and Urban Planning*, vol. 165, pp. 162-171. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.04.009 [Accessed 11 November 2025].

Zhao, L., Lee, X., Smith, R. B. and Oleson, K. (2018), "Strong contributions of local background climate to urban heat islands", in *Nature*, vol. 511, pp. 216-219. [Online] Available at: doi.org/10.1038/nature13462 [Accessed 11 November 2025].

Ziaeemehr, B., Jandaghian, Z., Ge, H., Lacasse, M. and Moore, T. (2023), "Increasing Solar Reflectivity of Building Envelope Materials to Mitigate Urban Heat Islands – State-of-the-Art Review", in *Buildings*, vol. 13, issue 11, article 2868, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings13112868 [Accessed 11 November 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 72-83
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1822025

Article Info

Received	10 September 2025
Revised	26 October 2025
Accepted	27 October 2025
Published	30 December 2025

OLTRE LA FUNZIONE
L'acqua come principio di equità, cura e identità urbana e paesaggistica

BEYOND FUNCTION
Water as a principle of equity, care, and urban and landscape identity

Antonella Falzetti

Abstract

Il tema dell'acqua è una sfida e una scommessa, ma inevitabilmente il suo governo deve misurarsi con un progetto di futuro e con le lezioni della storia. Misurarsi con una prospettiva a venire, nel solco dell'emergenza, significa cogliere l'articolata natura di un problema epocale e riconoscere le differenti prospettive tecnologiche e culturali che non solo portano alle soluzioni, ma insieme le giustificano. Il contributo indaga pertanto il valore etico dell'acqua come principio ideativo nel progetto contemporaneo, evidenziando la condizione di estraneità delle infrastrutture idriche nel contesto urbano e paesaggistico. I risultati dimostrano un terreno diffuso di sperimentazione, confermato dai casi studio contemporanei presentati, orientato verso un superamento della separazione tra infrastruttura e paesaggio urbano, ridefinendo il ruolo del progetto come atto di cura e di responsabilità verso le risorse e i luoghi abitati.

The issue of water is a challenge and a gamble, but inevitably, its governance must measure itself against a project for the future and the lessons of history. Approaching the future from within an emergency-driven perspective means grasping the articulated nature of an epochal problem and recognising the different technological and cultural perspectives that not only lead to solutions but also justify them. The contribution therefore investigates the ethical value of water as a design principle in contemporary design, highlighting the state of detachment of water infrastructures in the urban and landscape context. The results demonstrate a widespread field of experimentation, confirmed by the contemporary case studies presented, oriented towards overcoming the separation between infrastructure and urban landscape, redefining the role of design as an act of care and responsibility towards resources and inhabited places.

Keywords

architetture dell'acqua, progetto urbano, infrastruttura responsiva, ecosistema urbano, equità idrica

water architecture, urban design, responsive infrastructure, urban ecosystem, water equity



Antonella Falzetti, Architect and PhD, is a Full Professor at the Department of Civil Engineering and Computer Science Engineering, 'Tor Vergata' University of Rome (Italy). She conducts research mainly on the relationship between design and modifications to the urban landscape, addressing issues ranging from the scale of the diffuse landscape to that of urban regeneration. She has also been conducting applied research for several years on adaptive and sustainable micro-architectures, with a vision of innovative solutions that integrate language, technology, human-centred design, and digital technologies. E-mail: falzetti@ing.uniroma2.it

Per Gaston Bachelard l'acqua è la sostanza poetica per eccellenza, capace di contenere in sé una polarità irriducibile: essa porta in sé la potenza della vita e la profondità del sogno, riflette la nostra calma e la nostra inquietudine (Bachelard, 1942), ma al tempo stesso si manifesta come forza dirompente e catastrofica. Pensando al tema dell'acqua, come risorsa globale e bene essenziale, bisogna tenere presente la profonda differenza tra le due caratteristiche opposte: la prima è la componente vitale che modella, genera paesaggi e plasma società, dando vita a spazi naturali e artificiali; la seconda è la sua espressione brutale, in quanto forza concentrata che irrompe improvvisa, modifica e destabilizza, lasciando dietro di sé paesaggi feriti (Fig. 1). L'immagine pacificatrice si trasforma in tangibile incertezza e diviene portatrice di un valore emergenziale che richiede alle comunità di reinventare il proprio rapporto con essa.

In questa duplicità di significati la relazione tra uomo, ambiente abitato e acqua ha portato a concentrare l'attenzione sulle conseguenze di eventi climatici estremi e avversi alle città e al territorio. La cultura e la prassi dell'emergenza si riflettono sulle modalità attraverso le quali è affrontato il tema; quasi esclusivamente in termini di previsione e valutazione del danno, nonché di strategie di contenimento delle sue manifestazioni più problematiche, focalizzando l'attenzione sulla consistenza del pericolo emergenziale e dell'incertezza idrica.

L'essenza del problema affiora nella costante predominanza delle infrastrutture idrauliche, sempre più scollegate dalle esigenze delle comunità, estranee ai territori, parcellizzate nella genealogia dei bisogni o confinate nella fatalità dell'emergenza, progettate e gestite come entità separate dal sistema urbano e insediativo, nel quale la loro appartenenza a una logica tecnica fortemente settoriale si è tradotta prevalentemente in opere di canalizzazione, barriere fisiche e di sicurezza idrica urbana (Alamanos et alii, 2025). Tale orientamento, pur efficace nel breve termine, non ha promosso tuttavia una sintesi dialettica in grado di valorizzare l'acqua quale elemento identitario, estetico, ecologico e funzionale per lo spazio vissuto dall'uomo.

È in questo emergere della natura ambigua dell'acqua che si collocano i moderni sistemi, circoscritti e misurabili, delle numerose opere idrauliche, soluzioni che, in larga misura, contrastano radicalmente con la possibilità di instaurare un'efficace sinergia tra ciò che è necessario, la sicurezza, e ciò che è un diritto per l'uomo, il benessere fisico e l'accesso all'acqua (Hoekstra, Buurman and van Ginkel, 2018; Figg. 2, 3).

Con queste premesse il contributo si propone di esplorare il tema dell'acqua considerandola un valore etico e un principio generativo del progetto di architettura e del paesaggio. Nella narrazione si intendono esplicitare due aspetti: il primo riguarda il rapporto tra la dimensione tecnica e quella simbolica dell'acqua, esplorando come il progetto può restituire visibilità e significato a sistemi idrici marginalizzati o invisibili; il secondo, riguarda l'efficacia e i limiti delle soluzioni che la comunità scientifica mette in atto rispetto agli effetti climatici urbani, attraverso una visione progettuale capace di connettere saperi e discipline.

Nello sviluppo delle argomentazioni si privilegia un procedimento cognitivo che rimanda alle ragioni disciplinari dell'architettura e si tratteggiano alcuni requisiti di una cultura tecnico-progettuale avanzata alla quale non si chiede soltanto un approccio problem-solving parcellizzato nelle logiche specialistiche e di settore, poiché la soluzione dei problemi deve essere associata a una capacità di visione del mondo nella nostra particolare congiuntura storica.

Pur senza rinunciare agli strumenti della critica e della interpretazione, l'indagine si avvale di metodologie conoscitive consolidate come la filologia, che individua l'opera esemplare e la propone come testo (casi studio della storia), l'antologia, che recupera la selezione e il montaggio come tecnica della conoscenza (casi studio contemporanei), e il commento la cui natura letteraria, descrittiva e critica, consente di attraversare l'oggetto in tutta la sua eterogeneità. L'originalità del contributo si manifesta nell'interpretazione dell'acqua come elemento culturale e percettivo dello spazio urbano, nella definizione di alcuni criteri per la ricerca di modelli sostenibili di gestione e di progetto dello spazio contemporaneo e nell'indirizzare l'indagine verso una maggior congiunzione tra il valore di utilità e quello della bellezza, facendo emergere intuizioni e sviluppi utili alla costruzione di strategie integrate e orientate alla concertazione intersettoriale e alla trasformazione dei contesti urbani in chiave sostenibile.

Lo scenario attuale | Si sono raggiunti molti traguardi nel campo della ricerca applicata al contrasto degli eventi climatici, nell'obiettivo di una visione olistica e integrata, all'interno della quale l'attenzione converge su studi e strategie di gestione delle acque urbane attraverso criteri sistematici e multiobiettivi (Carter, Ianiri and Mariano, 2024); si tratta di approcci che superano la dialettica tradizionale incentrata prevalentemente sulla dimensione del rischio e sul risanamento puntuale, passando dalla logica del disastro a quella della trasformazione resiliente e adattiva (Tasnia and Growe, 2025), attenta alla dimensione delle condizioni urbane e all'uso di soluzioni più concrete e accessibili come le infrastrutture blu-verdi (Moscatelli and Raffa, 2023) o la gestione delle alluvioni (Iliadis, Glenis and Kilsby, 2024).

Un altro aspetto da evidenziare, nella logica di un'apertura disciplinare, è il crescente interesse per le ricadute sociali delle alluvioni o delle inondazioni sulla popolazione; dove la comunicazione e la percezione del rischio di alluvione da parte dei cittadini sono ritenute un elemento cruciale per le conoscenze tecniche generate a livello globale (Cea and Costabile, 2022), il coinvolgimento delle comunità, in quanto generatrici di dati, contribuisce alle strategie volte a ridurne la vulnerabilità, all'interno di una prospettiva di pianificazione strategica per la sostenibilità urbana e verso un orizzonte in cui l'acqua può diventare componente identitaria e non solo minaccia per le città (Daniel and Fernandes, 2024).

Ma quando l'acqua non viene integrata nel 'progetto' in una visione d'insieme e alle opere idrauliche non si riconosce il ruolo di parti attive di un solo organismo urbano e territoriale, essa perde la sua capacità di orientare i comportamenti umani e di suggerire azioni collettive in forza della bellezza o dell'attrattività delle architetture che da lei prendono spunto.

La mancata interazione tra infrastrutture idriche e progettazione dello spazio aperto ne indebolisce così il principio di equità e di cura, aprendo una frattura tra la sua dimensione simbolica e quella funzionale (Meisch, 2019): se non si considera anche l'aspetto etico-comportamentale, l'opera idraulica si riduce a mera funzione tecnica. Al contrario una visione integrata riconosce un'idea di città e di spazio aperto come ecosistema complesso, dove la componente ambientale non è separata da quella sociale, spaziale e gestionale.

Tuttavia la contemporaneità, soprattutto nell'occidente, ha in gran parte smarrito i valori simbolici e la percezione umanistica che un tempo accompagnavano la presenza dell'acqua, riducendola, come già evidenziato, a mera funzione tecnica, dimenticandosi che l'umanizzazione della tecnica passa anche attraverso una condivisione etica, che è potenza di soggetti, parallela e concomitante a decisioni politiche, gestionali e normative. Presupposto fondamentale per sollecitare un approccio empirico alla ricerca per cui il passaggio dal principio della 'cura' e del riconoscimento dell'acqua quale portatrice di più valori si vada a configurare in un criterio operativo di progetto e politica (Baratta, Finucci and Magarò, 2025).

Il convergente disallineamento nella scalabilità e nell'interconnessione operativa tra gli obiettivi dell'Agenda 2030 (ASviS, 2025) viene affrontato nel contributo come atto di riconoscimento della necessità di negoziare compromessi tra trasformazione urbana e tutela dell'ambiente, tra innovazione tecnica e giustizia sociale, tra valore estetico e responsabilità ecologica: l'acqua è intesa come strumento di benessere e salute collettiva (SDG 3), come risorsa da rigenerare e gestire in modo efficiente (SDG 6), e come elemento strutturante della città sostenibile (SDG 11; ASviS, 2023), capace di connettere infrastrutture verdi e blu, paesaggio e comunità.

Sulla scia dell'incalzante esortazione verso la gestione integrata dei fenomeni climatici della mutevole fenomenologia dell'acqua, il confronto progettuale con i corsi d'acqua, con i bacini di raccolta e con gli spazi acquatici urbani, ritorna fecondo nella valenza teoretica della storia, in quanto guidato da una visione che travalica il semplice dato naturale, caricandosi di significati culturali, rituali e collettivi: è un Patrimonio di senso da recuperare nella progettazione e nelle pratiche urbane odierne; in tale ottica la storia, divenuta oggetto di indagine razionale, può essere testimone del tempo, annuncio del presente e indizio dell'avvenire.

Sono numerosi i modelli storici, provenienti da contesti geografici differenti che, traslati nella condizione più complessa della contemporaneità, possono essere indicati come esempi virtuosi. Essi vengono proposti nella narrazione come casi studio per la loro intima concezione circolare e integrata dell'acqua, espressione di una dimensione trasversale e adattiva che anticipa gli obiettivi auspicati nell'Agenda 2030.

L'acqua tra risorsa e minaccia: esperienze virtuose dalla storia | Un corso d'acqua manifesta, nella sua diversificata fenomenologia, una predisposizione ambientale, ma anche l'imprevedibilità; il fiume contrassegna con la sua presenza «[…], tutta la sua complessità e asimmetria di forma spaziale e di tempo […] lunghi spazi e tratti lenti e pacati e poi improvvisi accensioni e scatenamenti, turbolenze e irruenze» (Valle, 2011, p. 222). Nelle sue alterità, in cui si scoprono nuove forme, si riconferma la sua variabile realtà indipendente che si oppone radicalmente all'epistemologia del moderno fondata sull'esemplarità della scienza positiva: misurare, catturare, irregimentare, incanalare e tenere sotto controllo.

Il rapporto tra le naturali forme dell'acqua, l'architettura e il paesaggio ha già scritto nel passato

le sue ragguardevoli storie che restano, per un verso, segnate da memorabili progressioni iconografiche. Molteplici e differenti culture hanno amministrato l'urgenza di un bisogno in termini di opera di architettura: è quanto ci hanno insegnato, e ancora ci insegnano, culture distanti e diverse, sulla traccia di un'integrazione compiuta di fini e mezzi nei quali la matrice primitiva e l'arte del governo sono custodite nel registro di saperi remoti e interconnessi, condensati nella costituzione di un assetto fisico, culturale e simbolico necessario alla coesione e al mantenimento di una società.

La traduzione di una risorsa materiale in un meccanismo ideativo significa innescare una dialettica positiva tra ciò che serve (utile, necessario, opera) e ciò che rappresenta (prosperità, pace, monumento); dove dimensione tecnica e dimensione simbolica coincidono, le infrastrutture idriche assumono il valore di monumenti civili e territoriali e divengono i segni fondativi dello spazio urbano e geografico; la storia lo dimostra.

È questo ad esempio il lascito ancora attuale di quegli ingegneri e architetti che tra la fine del Settecento e la prima metà dell'Ottocento hanno misurato e disegnato il territorio francese, immaginando prima e realizzando poi una macchina territoriale perfetta, dove le acque, soggiogate e trasformate in canali navigabili, si traducono in monumenti nel paesaggio e ci avvertono dell'attualità di una cultura tecnico-progettuale che riteniamo avanzata in quanto capace di visione. L'acqua è strumento e principio ideativo, protagonista di un modo di sentire lo spazio aperto che è tipico della modernità.

I canali navigabili sono una vera e propria infrastruttura, una macchina idraulica, un'architettura alla scala territoriale oltre la città, che si manifesta nella sequenza dei congegni specializzati, nel meraviglioso magistero che la scienza degli ingegneri custodisce: «Si tratta certamente di ponti, canali, 'ouvrages d'art', ma è soprattutto lo spazio che occupa di fatto il posto principale […]: lo spazio e l'immaginazione territoriale» (Fortier, 1983, p. 44).

La sensazione è che tutto è possibile, che si possono creare reti interamente artificiali e che si può legittimare una concezione dell'opera d'arte che supera il semplice obiettivo tecnico per farne strumento di organizzazione prima e di abbellimento poi del territorio. Il luogo può essere segnato dall'opera d'arte stessa, nella sua concezione architettonica o paesaggistica, integrata all'oggetto tecnico che diventa così monumento in sé: un monumento-luogo esprime l'insieme dell'opera lineare che costituisce il tracciato del canale e le sue ramificazioni idrauliche (Pinon, 1986; Fig. 4). In quella terra di confine dove il limite tra natura e artificio, tra risorsa e minaccia, viene stabilito per approssimazioni discrete, le modalità attraverso le quali le differenti culture e società si rapportano con l'acqua dipendono dai dispositivi interpretativi e progettuali, che mantengono un forte legame con il territorio e con la cultura che li ha progettati (Fig. 5).

È il caso, ad esempio, delle numerose opere legate alla tradizione dell'acqua in India. Dal VII al XIX secolo la costante penuria dell'acqua ha trovato risposte importanti, e per molte ragioni esemplari, alle necessità dell'approvvigionamento e dell'accessibilità. I criteri che hanno consentito di amministrare e gestire per così lungo periodo la preziosa risorsa vanno riferiti alle forme di governo locali, ma si spiegano meglio se inquadrate nel sistema religioso e filosofico dell'Asia meridionale. La distanza tra forme di conoscenza e di civiltà dissimili sollecita a capire per differenze: ad esempio il sistema architettonico di Jaipur, nello Stato del Rajasthan in India, può essere descritto attraverso una complessa orchestrazione di opere che dialogano positivamente con il proprio spazio (Blanc, 2020), nel senso che ne hanno cura e lo proteggono nel momento in cui ne valorizzano e ne rivelano le potenziali risorse (Figg. 6, 7). Il rapporto tra progetto, costruzione e opera si risolve nell'accezione di questo 'aver cura', in ordine al significato di 'colere', che nella lingua latina significa coltivare, curare, abitare, ma anche ornare, abbellire.

Anche i pozzi a gradini (stepwells, baori) costituiscono un esempio fulgido di questa circolarità tra progetto e uso dello spazio-luogo. Tali opere di raccolta e conservazione dell'acqua ci interessano come modello e testo da decifrare in quanto architetture totali, nelle quali la funzione idraulica, la forma architettonica, l'esperienza sensibile e la dimensione comunitaria si fondono in un unico gesto culturale. Sono monumenti discreti che, intercettando l'acqua, si inabissano nel paesaggio e nella loro monumentalità introversa organizzano un sistema di trincee profonde, di strutture a pozzo, passaggi inclinati, gradinate metafisiche, gallerie e camere e luoghi di rifugio freschi e quieti. Sono opere idrauliche che rincorrono le intermittenze delle acque legate alla stagione dei monsoni, ma sono anche e soprattutto capaci di concepire accoglienza e benessere e approvvigionamento, mentre diventano il nucleo generatore di architetture urbane di inedita qualità (Lautman, 2017; Fig. 8).

Nel passato le azioni dei Governi e della Chiesa hanno sostenuto un rapporto con l'acqua quale riflesso di un progetto politico, culturale e ambientale che si manifestava in soluzioni rappresentative legate a ragioni tecniche. L'acqua era resa visibile attraverso fontane e scenografie monumentali, diventando il mezzo attraverso cui il potere si traduceva in cura, bellezza e spettacolarità, rispecchiando una visione olistica in grado di trasformare la funzionalità in valore culturale e la ricerca del benessere in luoghi identitari e paesaggi urbani costruiti per l'uomo.

Un ciclo virtuoso e integrato è alla base della storia della sistemazione della Fontana dell'Acqua Acetosa, un connubio tra cura, architettura, paesaggio: un'acqua dalle presunte proprietà curative, una scenografia architettonica che la mette in rappresentazione e una visione dello spazio pubblico sono gli aspetti salienti intorno ai quali si incardina la riformulazione in chiave scenografica promossa da Alessandro VII Chigi (1655-1667) della sorgente dell'Acqua Acetosa fuori Porta del Popolo a Roma (D'A-

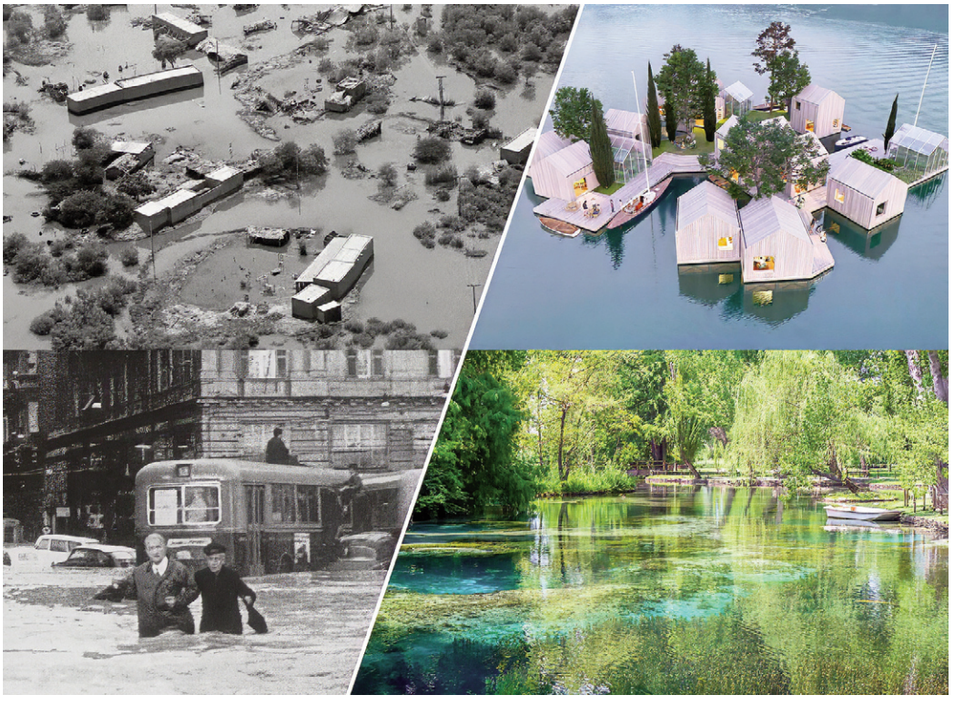


Fig. 1 | Contemporary Water Conditions (credit: the Author, 2025).

Next page

Fig. 2 | First Los Angeles Aqueduct Cascades, Sylmar, Los Angeles (2008), designed by Bureau of Los Angeles Aqueduct (credit: Los Angeles, 2008).

Fig. 3 | The River Avill: exit of flood relief channel on Dunster beach, Somerset (credit: Nilfanion, 2010).

melio, 2009). Non basta assicurare e ampliare l'offerta di consumo dell'acqua curativa alla fonte; l'architettura deve avere la consistenza di una meta visiva, restare saldamente ancorata all'impianto urbano ed essere percepibile nel paesaggio. Il progetto di Andrea Sacchi e Marcantonio De Rossi subisce riformulazioni e varianti, per concludersi in una calibrata monumentalità che comporta il ridisegno dell'area circostante; i lavori comprendono un viale piantumato con gelsi e olmi, per difesa dal sole e protezione del pubblico (Fig. 9).

La sistemazione dell'area intorno alla fontana esprime, per noi contemporanei, una sensibilità urbana dove il miglioramento delle condizioni di fruibilità e accessibilità si innestano nella volontà più generale di ridisegno della città: il viale alberato che allestisce un teatro verde e allo stesso tempo induce a una fruizione legata al benessere fisico e alla cura, i nuovi tracciati viari e il ninfeo dall'aspetto monumentale che distilla una misurata sacralità sono parte di un tutto e vivono nella ricomposizione urbana dell'area circostante, nel valore ambientale del progetto.

Ciò significa da un lato non rinunciare alla dilatazione del valore artistico dell'opera per metterlo in serrato confronto col valore etico dell'operare sulla città, sul territorio e sul paesaggio, dall'altro creare virtuose forme di sinergia tra le variabili potenzialità di un bene comune. La sapienza delle tecniche tradizionali si distingue così per la forte interazione tra la capacità di inventare luoghi, la qualità delle architetture e l'abitabilità degli spazi, mentre la circolarità dei rimandi colma il vuoto artificiale che si apre tra il progetto e la messa in valore delle potenzialità dell'ambiente.

L'acqua come infrastruttura contemporanea: dal rischio idraulico a paesaggio urbano | La presenza costitutiva dell'acqua ci impone di progettare spazi che non siano soltanto contenimento, ma relazione, non solo difesa, ma cura. Le esperienze colte dalla storia, pur nella specificità delle condizioni e delle microstorie locali, ricordano che l'innesto delle politiche per uno sviluppo critico ed ecosistemico, richiesto dalla sostenibilità, non può essere sorretto dalla sola coerenza nominale degli obiettivi. Tale innesto deve concretizzarsi e tradursi in un agire controllato nella logica di 'super visore' capace di assicurare la continuità e la sopravvivenza delle opere tecnico-ambientali.

Ci muoviamo in uno scenario in cui la strategia alla base di diversi progetti realizzati, sia alla scala urbana che a quella del paesaggio, è diretta ad aumentare la resilienza climatica dei luoghi abitati, sfruttando misure adattive che orientino l'organizzazione degli spazi e connettano esigenze ecologiche, strutture insediative e pratiche sociali. In questi ambiti di applicazione si è sviluppato un dibattito crescente sulla necessità di integrare progettazione e resilienza per contrastare il dominio delle infrastrutture grigie e avvicinare la dimensione architettonica e paesaggistica dell'acqua al dialogo con le necessarie misure di adattamento alla vulnerabilità climatica (Ricart et alii, 2022; Valente et alii, 2024).

Questi ragionamenti hanno generato una tendenza a innovare processi trasformativi, presupponendo il paesaggio urbano idrico o acquatico come condizione più favorevole all'uomo, rispetto alle sole infrastrutture verdi, per integrare la dimensione terapeutica dei paesaggi con i valori di accessibilità, versatilità, habitat e biodiversità (Zhang et alii, 2021). È in questa ricerca di congiunzione tra la dimensione socio-tecnica e quella ambientale o ecosistemica che si genera il legame evolutivo e funzionale per l'elemento acqua, nel quale si devono intrecciare dimensioni fisiche e simboliche che rinviano al diritto, alla bellezza e alla memoria. Un tale legame diventa realmente incisivo quando la declinazione figurativa e il valore simbolico assumono il ruolo fondativo nella costruzione dei paesaggi contemporanei sostenibili (De Francesco, 2022).

Allora sul piano della trascrizione progettuale si aprono diverse argomentazioni, tra cui il recupero del significato di accessibilità e di approvvigionamento: collegare le due questioni significa far reagire insieme i due aspetti dell'etica e dell'estetica nell'operare in architettura, laddove ragioni di giustizia e di equità, diventano occasione per inventare i luoghi e lavorare sullo spazio aperto attraverso un percorso congiunto in termini di qualità d'opera e di valori identitari delle comunità (Fig. 10).

Dall'acqua occultata si è cercato di passare a un'acqua narrante, stimolati dal desiderio di reintegrarsi con la natura e di restituire senso ai luoghi, come nel caso del Waterplan per Anversa, progettato da De Urbanisten, dove la complessità del tema dell'ibridazione tra gestione idrica e spazio pubblico lascia spazio all'integrazione dell'acqua come elemento vivente (Corradi et alii, 2024). O ancora nel Copenhagen Cloudburst Plan, in cui emerge una visione integrata e sistemica di iniziative future volte a ridurre l'impatto delle piogge torrenziali, il cui programma strategico prevede in 20 anni di attuare 300 progetti su aree selezionate e vulnerabili dove nuovi investimenti si collegano a progetti di sviluppo urbano in corso. In questa iniziativa il rapporto tra acqua piovana, aree verdi e spazio pubblico e privato viene integrato in una concezione di drenaggio sostenibile per la città che disegna e trasforma, assumendo l'acqua non solo come minaccia da prevenire ma come generatrice di paesaggi urbani.

Lo sviluppo delle strategie integrate australiane della Water Sensitive Urban Design (WSUD) stimola, da oltre 40 anni, un terreno di confronto con il progetto dell'acqua in ambito urbano e paesaggistico. Le diverse declinazioni delle WSUD, diffuse nel mondo, mantengono una matrice comune: il ciclo dell'acqua è l'oggetto primario a cui si aggiungono soluzioni derivanti da diversi innesti disciplinari. Tra queste il progetto ecologico, ovvero quello che conduce a riconoscere al fenomeno naturale una sua intelligenza propria, contribuisce a contenere le forze naturali con rispetto e cooperazione, diventando perciò visibile nel gioco delle corrispondenze di una realtà fisica che non è più antagonista (Di Carlo, Giancotti and Reale, 2020; Fig. 11).





È ciò che troviamo nella strategia delle Sponge Cities, in quel principio di sintesi urbana e naturalità dove l'acqua gode di un'attenzione privilegiata: il lavoro del Professor Kongjian Yu e del suo studio Turenscape testimonia che è possibile leggere l'acqua come matrice dinamica, capace di attivare processi positivi, evolutivi e strutturali che coinvolgono la configurazione dello spazio, l'organizzazione delle funzioni e l'interazione etica tra le componenti naturali e antropiche (Kongjian, 2024; Fig. 12).

Lo Huaiyang Fuxi Cultural Park è una testimonianza della contemporaneità degli obiettivi finora enunciati: lo spazio multifunzionale pensato per la comunità e perfettamente integrato nella latente imprevedibilità di una possibile emergenza racchiude un sistema che intreccia sostenibilità ecologica, memoria culturale e partecipazione sociale, fondendo dimensione ambientale e valenze simboliche in un'unica struttura narrativa. Lo testimoniano le isole modellate come crateri contenenti diverse funzioni che simboleggiano gli Otto Trigrammi Cinesi, o ancora i percorsi sospesi sull'acqua integrati in uno scenario naturale e rispettoso della biodiversità, un'esperienza in cui il progetto dell'acqua è simbolo, è spazio creativo, ma allo stesso tempo è resiliente e adattivo.

In una recente intervista a Kongjian Yu emerge che non tutti gli interventi realizzati sono risultati efficaci (Kaldor, 2024). La transizione verso le infrastrutture delle 'città spugna' è iniziata realmente solo negli ultimi 5-10 anni; tuttavia questo arco temporale non è ancora sufficiente a garantire una gestione adeguata dei fenomeni meteorologici estremi. Molti altri progetti di Sponge City non hanno avuto la stessa fortuna critica, forse perché sono caduti in un cruciale paradosso, non avendo risolto la difficile relazione tra dimensione estetica, funzionamento e mantenimento in vita dell'opera.

Conclusioni | In questa dissertazione si è cercato di costituire un quadro critico, sicuramente non esaustivo, sui vari rapporti di forma e di interazione sistemica con l'acqua. Misurarsi con una prospettiva a venire, nel solco dell'emergenza, significa cogliere l'articolata natura di un problema epocale, ponderare l'inevitabilità e riconoscere le differenti prospettive culturali e tecnologiche che giustificano le soluzioni e non trascurare la complessità delle aree di intervento, degli obiettivi e degli strumenti dove è d'obbligo l'innesto, nei vari domini dell'operare (politico, economico, sociale, ambientale, ecc.), di molteplici culture e discipline e dove è richiesto ancora l'esercizio di un immaginario consapevole, di una progettualità capace di innovare e insieme di ricapitolare il già dato.

Ciò significa anche familiarizzare con un'idea di sviluppo che include tentativi, esperimenti e conflitti, ma anche affrontare questioni e risolvere contraddizioni che si innestano nell'inquietudine generale delle soluzioni cercate, attraversata da obiettivi parziali che spingono verso modelli unificanti di integrazione: integrare il parziale e il locale significa assimilare l'eterogeneità delle differenze in una prospettiva comune nella quale far dialogare le identità nazionali, le culture locali e i lasciti di tradizioni virtuose.

Dopo decenni di strategie WSUD, 'città spugna', waterscapes, città sensibili, soluzioni basate sulla natura e modelli di previsione, controllo e gestione delle acque piovane, si devono ancora affrontare numerose sfide nell'applicabilità e nella scalabilità dei risultati, la maggior parte delle quali soffre della mancanza di un approccio sistematico a livello urbano. I progetti efficaci richiedono investimenti significativi nell'implementazione in più sedi per essere risolutivi, piuttosto che progetti frammentari laddove la riqualificazione lo consenta.

La prospettiva è universale e pertanto le sfide interessano tutti i Paesi, includendo aspetti economici, sociali, ambientali e tecnologici. L'universalità dei fini, applicabili a tutte le nazioni indipendentemente dal loro livello di sviluppo, fa cadere blocchi narrativi e categorie concettuali contrapposte e spesso inamovibili, mentre la misura collettiva del progetto, unita alla mediazione sociale, apre la strada a nuove modalità di innesto tra compenetrazione ecologica e insediativa, facendo del progetto un dispositivo dialogico capace di operare all'interno dell'ambiente naturale e urbano (Fig. 13).

Su questo sfondo la riflessione sollecita, all'interno del dibattito scientifico sul rapporto acqua salute e gestione integrata delle risorse idriche, l'implementazione di comportamenti più mirati e circoscritti, capaci di produrre un avanzamento rispetto al tema dell'acqua pubblica e dello spazio aperto naturale e antropico progettato come sistema complesso ancora fragile nella risposta ai fenomeni climatici imprevisti.

Nel poliedrico sfondo di questa complessità di attori diverse questioni rimangono ancora irrisolte; tra queste il superamento di alcune rigidità dell'attuale cultura contemporanea che tende ad attribuire al progetto il ruolo di 'riparatore' ecologico e culturale, più che di anticipatore di scenari, mentre è proprio nella capacità di unire controllo e invenzione che il progetto può generare figure inedite, dove al dato fisico si sovrappone l'immaginazione di un ambiente in continua trasformazione.

Un altro limite oggettivo si evidenzia nell'eccessiva convergenza delle strategie di risanamento e di trasformazione dell'esistente, spesso intese come risposta agli errori ereditati dal moderno. Tale tendenza, pur variando nelle diverse geografie, riduce l'orizzonte del progetto, allontanandolo da visioni più radicali, capaci di ripensare ex novo il rapporto tra spazio urbano, natura e acqua, entro un orizzonte di responsabilità condivisa e di cura dei paesaggi futuri.

Nella diversità delle soluzioni contemporanee analizzate si rivela una contraddizione forzata del progetto che spesso ne limita la reale capacità di incidere in modo definitivo sulla città e sul paesaggio. La distanza tra la rapidità dell'emergenza e i tempi lunghi della trasformazione sostenibile genera infatti uno scarto operativo e concettuale difficile da colmare, ma necessario da riconoscere come parte del processo progettuale; tale criticità deriva

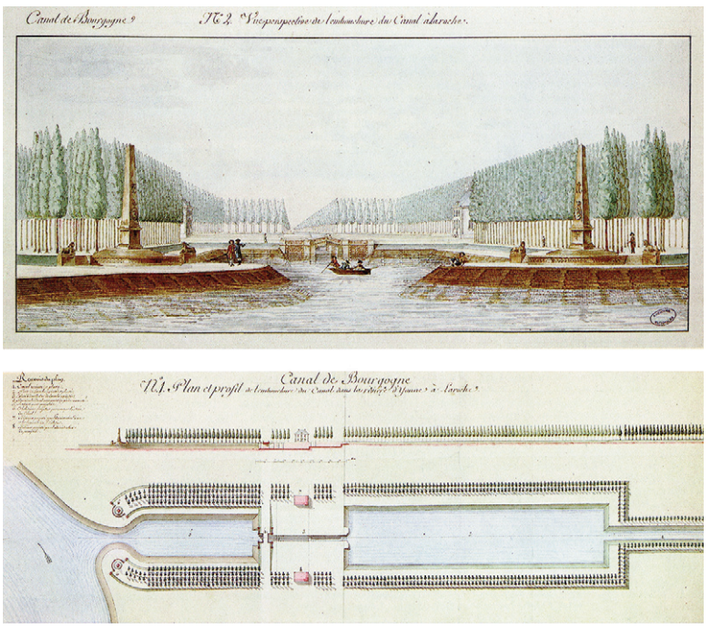




Fig. 4 | Outer Harbour of Laroche, Burgundy Canal in Yonne (1811), designed by Jacques Foucherot (credit: National Archives, Paris).

Fig. 5 | Basin water-distribution 'comb' in Ksar Thala, Algeria (credit: M. Achenza, 2010).



Fig. 6 | Amber Fort in Rajasthan, India (credit: G. Gottardo, 2022).

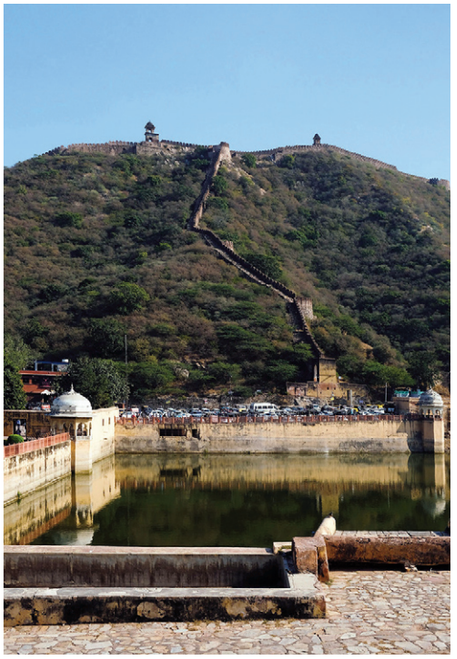


Fig. 7 | Amer artificial lake, water intake system in Rajasthan, India (credit: G. Gottardo, 2022).

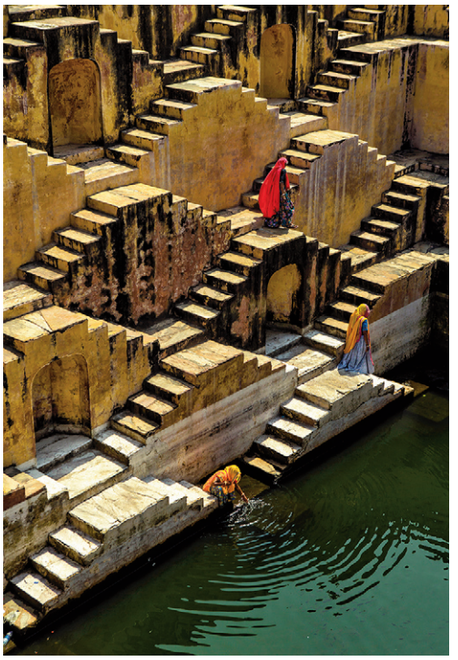


Fig. 8 | Panna Miyah ka Kund stepwell: women in Jaipur (credit: I. Ebrahim, 2016).

dalla mancata corrispondenza temporale e operativa tra emergenza e trasformazione sostenibile, le quali, pur nella loro dichiarata legittimità, richiedono spazio e tempo non collimanti.

Questa condizione porta il progetto, quale ambito privilegiato di mediazione tra istanze contingenti e visioni di lungo periodo, al centro di un dissidio, in quanto esso è ancora troppo rapido e tecnico per l'emergenza, ma troppo lento e riflessivo per la domanda di soluzioni integrate e sostenibili. Inoltre la continuità funzionale nel tempo degli interventi è subordinata a parametri esterni al valore estetico dell'opera e alla sua utilità per la comunità urbana; la mancata manutenzione insieme alla scarsa attenzione alla cura dei nuovi sistemi affidati alla fruibilità quotidiana si traducono in una diminuzione della partecipazione delle comunità locali.

A fronte di questo quadro critico rimane la necessità di consolidare un sapere propositivo che, pur già riconosciuto in altre strategie applicate, richiede una più ampia e concreta traduzione operativa. In questa prospettiva il funzionamento efficace dipende dalla capacità di rigenerare gli ambienti urbani e di destinare nella progettazione integrata più spazio all'acqua.

L'acqua, al di là della sua manifestazione tecnica e del suo riconoscimento etico, può diventare una vera e propria infrastruttura di comunità a sostegno della salute e dello sviluppo economico e sociale (Morpurgo, 2024). Non si tratta solo di reinserirla nello spazio urbano come risorsa ambientale o simbolica, ma di riconoscerla come dispositivo generativo di relazioni sociali e di forme di cooperazione e nuove pratiche di cittadinanza. Quando l'acqua ritrova una propria ragione fondativa, non si limita ad accompagnare le trasformazioni sostenibili, ma apre scenari di co-produzione, in cui istituzioni, saperi tecnici e comunità locali concorrono a costruire un futuro condiviso.

La visione multifocale proposta nella dissertazione lascia aperto il dibattito sulle ricadute trasversali di altri obiettivi dell'Agenda 2030: più precisamente nell'ambito con l'SDG 13, per la capacità di mitigare gli effetti del cambiamento climatico e ridurre le isole di calore urbane; con l'SDG 15, per la tutela degli ecosistemi e della biodiversità urbana; con l'SDG 9, per la promozione di innovazioni materiali e infrastrutturali; e con l'SDG 17, per l'apertura a processi di co-produzione e collaborazione tra istituzioni, saperi e comunità. In questo senso l'apporto scientifico non consiste soltanto nell'indicare scenari futuri, ma nel mettere in evidenza la validità di processi già in atto, nei quali l'acqua agisce come principio ordinatore e critico delle trasformazioni urbane e territoriali.

Riconoscere il valore simbolico e operativo dell'acqua significa attribuire al progetto un ruolo anticipatore nella definizione di paesaggi resilienti e di futuri sostenibili: un futuro da costruire sulla pacificazione dei conflitti, sul controllo delle risorse in equilibrio con l'ambiente e sulla potenza visionaria del progetto (Fig. 14), costituisce forse, ancora, una forma possibile di utopia.

For Gaston Bachelard, water is the poetic substance par excellence, capable of containing within itself an irreducible polarity: it carries within itself the power of life and the depth of the dream, it reflects our calm and our restlessness (Bachelard, 1942), but at the same time it manifests itself as a disruptive and catastrophic force. Thinking about the theme of water, as a global resource and an essential good, we must bear in mind the profound difference between the two opposing characteristics: the first is the vital component that shapes, generates landscapes and moulds societies, giving life to natural and artificial spaces; the second is its brutal expression, as a concentrated force that suddenly bursts in, modifying and destabilising, leaving behind wounded landscapes (Fig. 1). The pacifying image is transformed into tangible uncertainty and becomes the bearer of an emergent value that requires communities to reinvent their relationship with it.

In this duplicity of meanings, the relationship between man, the inhabited environment and water has led to a focus on the consequences of extreme and adverse climatic events on cities and the territory. The culture and practice of emergency management are reflected in how the issue is addressed, with a focus on forecasting and assessing damage, as well as strategies to contain its most problematic manifestations, emphasising the consistency of emergency risk and water uncertainty.

At the core is the persistent dominance of hydraulic infrastructures, designed and managed as separate entities from the urban and settlement system, increasingly disconnected from the needs of communities, estranged from the territory, fragmented along a chain of needs or confined to emergency logic, in which their belonging to a strongly sectorial technical logic has been translated mainly into channelling works, physical barriers, and urban water security (Alamanos, et alii, 2025). This orientation, while effective in the short term, has not, however, promoted a dialectical synthesis capable of enhancing water as an identity, aesthetic, ecological, and functional element for the space experienced by humans.

As this ambiguity surfaces, we argue that the modern, circumscribed and measurable systems of numerous hydraulic works are situated, solutions that, to a large extent, radically contrast with the possibility of establishing an effective synergy between what is necessary, safety, and what is a human right, physical wellbeing and access to water (Hoekstra, Buurman and van Ginkel, 2018; Figg. 2, 3).

Against this backdrop, this essay examines the theme of water, treating it as an ethical value and a generative principle of architectural and landscape design. The narration intends to make two aspects explicit: the first concerns the relationship between

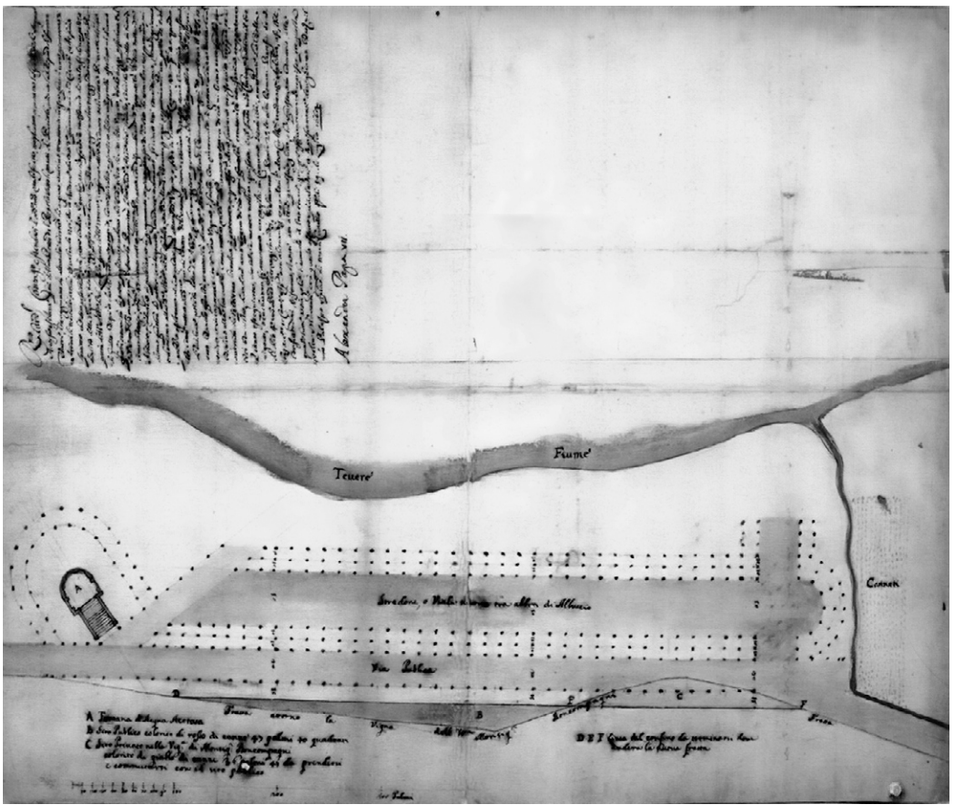


Fig. 9 | Scheme for the area around the Acqua Acetosa Fountain (1662), designed by A. Sacchi and D. Legendre (credit: ASR, by permission of the Ministry of Culture).

the technical and symbolic dimensions of water, exploring how the project can restore visibility and meaning to marginalised or invisible water systems; the second, concerns the efficacy and limits of the solutions implemented by the scientific community with respect to urban climatic effects, through a design vision capable of connecting knowledge and disciplines. Methodologically, a three-step approach is adopted, referring to the disciplinary reasons of architecture and outlining specific requirements of an advanced technical-planning culture that is not only asked for a problem-solving approach compartmentalised in specialised and sector logics, since problem-solving must be associated with an ability to see the world in our particular historical conjuncture. While not renouncing the tools of criticism and interpretation, the investigation makes use of established cognitive methodologies such as philology, which identifies the exemplary work and proposes it as a text (case studies of history), such as anthology, which recovers selection and editing as a knowledge technique (contemporary case studies), and such as commentary whose literary, descriptive and critical nature allows it to traverse the object in all its heterogeneity.

The originality of the contribution manifests itself in the interpretation of water as a cultural and perceptive element of urban space, in the definition of specific criteria for the search for sustainable models of management and design of contemporary space, and in directing the investigation towards a greater conjunction between the value of utility and that of beauty, bringing out insights and developments valuable for the construction of integrated strategies oriented towards intersectoral concertation and the transformation of urban contexts in a sustainable key.

The current scenario | Many milestones have been reached in the field of research applied to countering climate events, with the aim of a holistic and integrated vision, within which attention converges on studies and strategies for urban water management through systematic and multi-objective criteria (Carter, Ianiri and Mariano, 2024); these are approaches that go beyond the traditional dialectic focused mainly on the dimension of risk and site-specific remediation, moving from the logic of disaster to that of resilient and adaptive transformation (Tasnia and Growe, 2025), attentive to the dimension of urban conditions and the use of more concrete and accessible solutions such as blue-green infrastructure (Moscatelli and Raffa, 2023) or flood management (Iliadis, Glenis and Kilsby, 2024).

Another aspect to highlight in the logic of disciplinary openness is the growing interest in the social impacts of floods and inundations on populations. Where the communication and perception of flood risk by citizens are considered a crucial element for the technical knowledge generated at a global level (Cea and Costabile, 2022), the involvement of communities, as generators of data, contributes to strategies aimed at reducing their vulnerability, within a strategic planning perspective for urban sustainability and towards a horizon in which water can become an identity component and not only a threat to cities (Daniel and Fernandes, 2024).

However, when water is not integrated into the project as part of an overall vision and hydraulic works are not recognised as active parts of a single urban and territorial organism, it loses its ability to guide human behaviour and to suggest collective actions by virtue of the beauty or attractiveness of the architecture it inspires.

The lack of interaction between water infrastructure and open-space design thus weakens the principle of fairness and care, opening a rift between its symbolic and functional dimensions (Meisch, 2019). If the ethical and behavioural aspects are not considered, the infrastructure is reduced to a mere technical function. On the contrary, an integrated vision recognises the city and open space as a complex ecosystem, where the environmental component is not separated from the social, spatial, and management components.

However, contemporaneity, especially in the West, has largely lost the symbolic values and humanistic perception that once accompanied the presence of water, reducing it, as already pointed out, to a mere technical function, forgetting that the humanisation of technology also passes through an ethical sharing, which is the power of subjects, parallel and concomitant to political, management and regulatory decisions. It is a fundamental prerequisite for an empirical approach to research, in which the transition from the principle of 'care' and the recognition of water as the bearer of multiple values is configured as an operational criterion for design and policy (Baratta, Finucci and Magarò, 2025).

The convergent mismatch in the scalability and operational interconnectedness between the goals of the 2030 Agenda (ASviS, 2025) is addressed in the contribution, which recognises the need to negotiate trade-offs between urban transformation and environmental protection, between technical innovation and social justice, and between aesthetic value and ecological responsibility. As water is understood as an instrument of collective wellbeing and health (SDG 3), as a resource to be regenerated and managed efficiently (SDG 6), and as a structuring element of the sustainable city (SDG 11; ASviS, 2023), capable of connecting green and blue infrastructure, landscape and community.

In the wake of the pressing exhortation towards the integrated management of the changing climatic

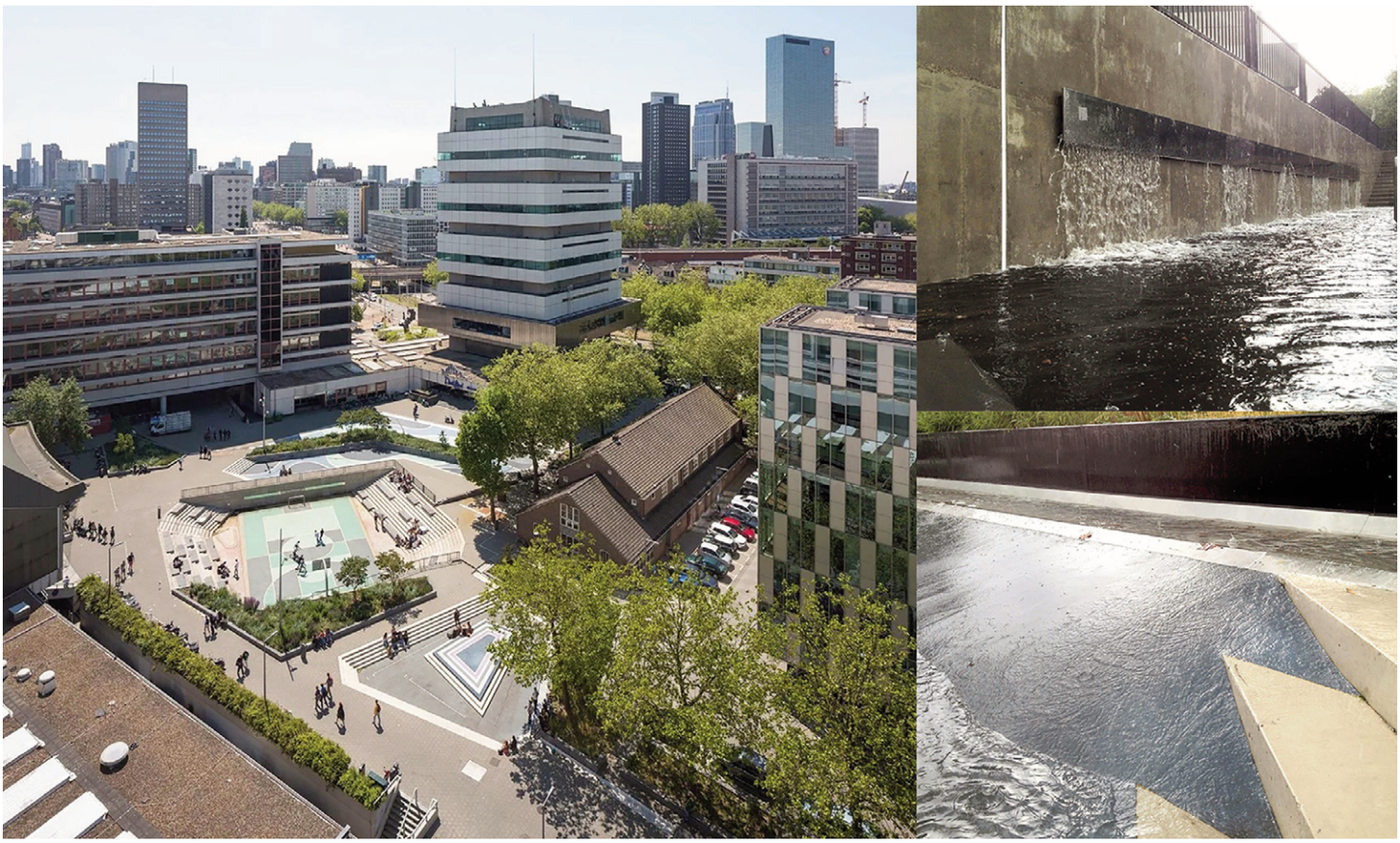


Fig. 10 | Watersquare Benthemplein in Rotterdam (2013), designed by De Urbanisten (source: urbanisten.nl, 2025).

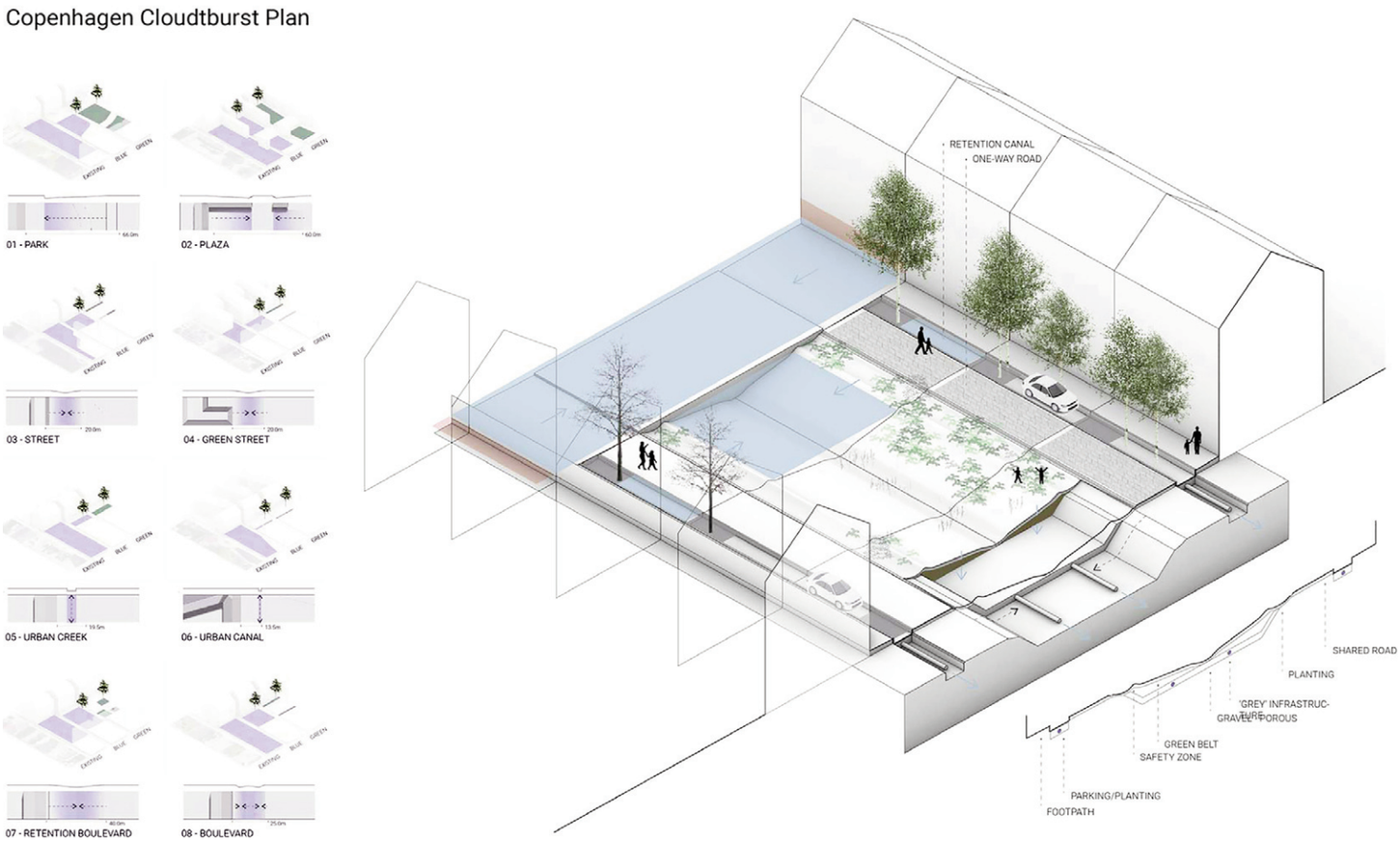


Fig. 11 | Copenhagen Cloudburst Plan, diagram (2012), designed by the City of Copenhagen (source: gsd.harvard.edu, 2025).

phenomena of water, the design confrontation with watercourses, reservoirs and urban aquatic spaces, returns fertile in the theoretical value of history, as it is guided by a vision that goes beyond the simple natural datum, loading itself with cultural, ritual and collective meanings: it is a Heritage of meaning to be recovered in today's urban design and practices. From this perspective, history, having become an object of rational investigation, can serve as a witness to time, an announcement of the present, and a clue to the future.

There are numerous historical models from different geographical contexts that, when applied to the more complex conditions of the contemporary world, can serve as examples of virtue. They are presented in the narrative as case studies of their intimate, circular, and integrated conception of water, an expression of a transversal and adaptive dimension that anticipates the goals of the 2030 Agenda.

The water between resource and threat: virtuous experiences from history | A watercourse manifests, in its diversified phenomenology, an environmental predisposition, but also unpredictability; the river marks with its presence 'all its complexity and asymmetry of spatial form and time long spaces and slow, calm stretches and then sudden onsets and outbursts, turbulence and impetuosity' (Valle, 2011). In its otherness, where new forms are discovered, its variable independent reality is reconfirmed, which is radically opposed to the epistemology of the modern, founded on the exemplarity of positive science: measuring, capturing, regimenting, channelling and keeping under control.

The relationship between the natural forms of water, architecture, and landscape has already written its own remarkable stories, which, on the one hand, are marked by memorable iconographic progressions. Many cultures have emphasised the urgency of a need in architecture. It is what distant and diverse cultures have taught us, and still teach us, on the trace of an accomplished integration of ends and means in which the primitive matrix and the art of government are preserved in the register of remote and interconnected knowledge, condensed in the constitution of a physical, cultural and symbolic order necessary for the cohesion and maintenance of a society.

The translation of a material resource into an ideational mechanism means triggering a positive dialectic between what it serves (useful, necessary, work) and what it represents (prosperity, peace, monument); where technical and symbolic dimensions coincide, water infrastructures take on the value of civil and territorial monuments and become the founding signs of urban and geographical space. History proves this.

It is, for example, the still current legacy of those engineers and architects who, between the end of the 18th century and the first half of the 19th century, measured and designed the French territory, first imagining and then realising a perfect territorial machine, where the waters, subjugated and transformed into navigable canals, are translated into monuments in the landscape and warn us of the topicality of a technical-designing culture that we consider advanced in that it is capable of vision. Water is an instrument and an ideational principle, the protagonist of a way of feeling open space typical of modernity.

The navigable canals are a proper infrastructure, a hydraulic machine, an architecture on a territorial scale beyond the city, which manifests itself in the sequence of specialised devices, in the marvellous wizardry that the science of engineers preserves. According to Fortier (1983), 'they are certainly bridges, canals, ouvrages d'art, but it is above all space that actually occupies the main place: space and territorial imagination'.

The feeling is that anything is possible, that entirely artificial networks can be created, and that a conception of the work of art can be legitimised that goes beyond the simple technical objective to make it an instrument of organisation first and then of embellishment of the territory. The place can be marked by the work of art itself, in its architectural or landscape conception, integrated with the technical object, which thus becomes a monument in itself: a monument-place expresses the entirety of the linear work that constitutes the course of the canal and its hydraulic ramifications (Pinon, 1986; Fig. 4). In that





Fig. 12 | Huaiyang Fuxi Cultural Park in Zhoukou, China (2021), designed by Kongjian Yu and Turenscape (credit: Turenscape Design Institute, 2023).

Fig. 13 | Climate adaptation of Hans Tavsense Park (2016), designed by Stig Lennart Andersson (source: sla.dk, 2025).



Fig. 14 | Hot Heart in Helsinki, a system of floating energy basins (2021), designed by Carlo Ratti Associati (source: carlorattiassociati.com, 2025).

borderland where the boundary between nature and artifice, resource and threat, is established by discrete approximations, how different cultures and societies relate to water depend on interpretative and design devices, which maintain a strong link with the territory and the culture that designed them (Fig. 5).

It is the case, for example, with the numerous works related to the water tradition in India. From the 7th to the 19th century, the constant shortage of water found important and exemplary answers to the needs of supply and accessibility. The criteria that enabled the administration and management of the precious resource over such a long period must be referred to local forms of government, but are best explained within the religious and philosophical systems of South Asia. The distance between dissimilar forms of knowledge and civilisations urges us to understand by differences: for example, the architectural system of Jaipur, in the state of Rajasthan in India, can be described through a complex orchestration of works that positively dialogue with their space (Blanc, 2020), in the sense that they take care of it and protect it at the moment when they enhance and reveal its potential resources (Figg. 6, 7). The relationship between design, construction and work is resolved in the meaning of this 'having care', in terms of the meaning of 'colere', which in the Latin language means to cultivate, care for, inhabit, but also to ornament, embellish.

Stepwells (baori) are also a shining example of this circularity between design and the use of space-place. These water-harvesting and conservation works interest us as models and texts to be deciphered as total architectures, in which the hydraulic function, architectural form, sensitive experience, and community dimension merge into a single cultural gesture. They are discrete monuments that, intercepting the water, sink into the landscape and, in their introverted monumentality, organise a system of deep trenches, well structures, sloping passages, metaphysical steps, tunnels and chambers, and cool, quiet places of refuge. They are hydraulic works that follow the intermittent water flows associated with the monsoon season. However, they are also, and above all, capable of conceiving welcome, wellbeing, and provisioning, while becoming the generative nucleus of urban architectures of unprecedented quality (Lautman, 2017; Fig. 8). Historically, government and Church patronage supported a relationship with water as a reflection of a political, cultural and environmental project that manifested itself in representative solutions linked to technical reasons. Water was made visible through fountains and monumental scenographies, becoming the means through which power was translated into care, beauty and spectacle, reflecting a holistic vision capable of transforming functionality into cultural value and the search for wellbeing into identity places and urban landscapes built for man.

A virtuous and integrated cycle underlies the story of the Acqua Acetosa Fountain's arrangement, a combination of healing, architecture, and landscape: a water with alleged curative properties, an architectural scenography that portrays it, and a vision of public space are the salient aspects around which the reformulation of the Acqua Acetosa fountain outside the Porta del Popolo in Rome promoted by Alexander VII Chigi (1655-1667) hinges (D'Amelio, 2009).

It is not enough to ensure and expand the supply of curative water at the source; the architecture must have the consistency of a visual goal, remain firmly anchored in the urban layout and be perceptible in the landscape. Andrea Sacchi and Marcantonio De Rossi's design undergoes reformulations and variations, culminating in a calibrated monumentality that involves redesigning the surrounding area. The works include an avenue planted with mulberry and elm trees for sun protection and public protection (Fig. 9).

The arrangement of the area around the fountain expresses, for us contemporaries, an urban sensibility where the improvement of the conditions of usability and accessibility are grafted into the more general desire to redesign the city: the tree-lined avenue that sets up a green theatre and at the same time induces a fruition linked to physical wellbeing and care, the new road layouts and the nymphaeum with its monumental appearance that distils a measured sacredness are part of a whole and live in the urban recomposition of the surrounding area, in the environmental value of the project.

It means, on the one hand, not renouncing the expansion of the artistic value of the work in order to put it in close confrontation with the ethical value of working on the city, the territory and the landscape, and on the other hand, creating virtuous forms of synergy between the variable potentialities of a common good. The strong interaction thus distinguishes the wisdom of traditional techniques between the ability to invent places, the quality of architecture and the habitability of spaces, while the circularity of cross-references fills the artificial gap that opens up between the project and the valorisation of the environment's potential.

Water as contemporary infrastructure: from hydraulic risk to urban landscape | The constitutive presence of water requires us to design spaces that are not just containment, but relationship, not just defence, but care. The experiences grasped by history, albeit in the specificity of local conditions and micro-histories, remind us that the grafting of policies for a critical and ecosystemic development, required by sustainability, cannot be supported by the mere nominal coherence of objectives. This grafting must materialise and translate into a controlled action in the logic of a 'supervisor' capable of ensuring the continuity and survival of technical-environmental works.

We operate in a scenario in which the strategy behind several projects, implemented at both urban and landscape scales, aims to increase the climate

resilience of inhabited places by leveraging adaptive measures that orient the organisation of spaces and connect ecological needs, settlement structures, and social practices. In these fields of application, there has been a growing debate on the need to integrate design and resilience in order to counter the dominance of grey infrastructure and bring the architectural and landscape dimension of water into dialogue with the necessary adaptation measures to climate vulnerability (Ricart et alii, 2022; Valente et alii, 2024).

These reasonings have generated a tendency to innovate transformative processes, assuming the urban water or aquatic landscape as a more favourable condition for human beings, compared to green infrastructures alone, to integrate the therapeutic dimension of landscapes with the values of accessibility, versatility, habitat and biodiversity (Zhang et alii, 2021). It is in this search for a conjunction between the socio-technical and the environmental or ecosystem dimensions that the evolutionary and functional link is generated for the element of water, in which the physical and symbolic dimensions of law, beauty, and memory must be interwoven. Such a link becomes truly incisive when the figurative articulation and symbolic value assume the founding role in the construction of sustainable contemporary landscapes (De Francesco, 2022).

Then, on the level of design transcription, various arguments open up, including the recovery of the meaning of accessibility and supply: linking the two issues means making the two aspects of ethics and aesthetics react together in working in architecture, where reasons of justice and equity become an opportunity to invent places and work on open space through a joint path in terms of quality of work and community identity values (Fig. 10).

From concealed water, an attempt has been made to move on to narrative water, stimulated by the desire to reintegrate with nature and to restore meaning to places, as in the case of the Waterplan for Antwerp, designed by De Urbanisten, where the complexity of the theme of hybridisation between water management and public space gives way to the integration of water as a living element (Corradi et alii, 2024). Alternatively, in the Copenhagen Cloudburst Plan, an integrated, systemic vision of future initiatives to reduce the impact of torrential rains emerges, along with a strategic programme that, over 20 years, envisions the implementation of 300 projects in selected vulnerable areas, connecting new investments to ongoing urban development projects. In this initiative, the relationship between rainwater, green areas, and public and private spaces is integrated into a sustainable drainage concept for the city that designs and transforms, treating water not only as a threat to be prevented but also as a generator of urban landscapes.

For over 40 years, the development of Australian integrated strategies, such as Water Sensitive Urban Design (WSUD), has stimulated debate in the field of water design in urban and landscape settings. The various forms of WSUD, adopted worldwide, follow a common framework: the water cycle is the main element to which solutions from different disciplinary perspectives are applied. Among these, the ecological approach – recognising natural phenomena as possessing their own intelligence – helps contain natural forces with respect and cooperation. This approach becomes apparent in the interactions within a physical reality that is no longer antagonistic (Di Carlo, Giancotti and Reale 2020; Fig. 11).

It is what we find in the strategy of the Sponge Cities, in that principle of urban and natural synthesis where water enjoys privileged attention: the work of Professor Kongjian Yu and his Turenscape study testifies that it is possible to read water as a dynamic matrix, capable of activating positive, evolutionary and structural processes involving the configuration of space, the organisation of functions and the ethical interaction between natural and anthropic components (Kongjian, 2024; Fig. 12).

The Huaiyang Fuxi Cultural Park bears witness to the contemporaneity of the objectives stated so far: the multifunctional space designed for the community and perfectly integrated in the latent unpredictability of a possible emergency encloses a system that interweaves ecological sustainability, cultural memory and social participation, merging environmental dimensions and symbolic values in a single narrative structure. The islands testify to this model, as craters containing different functions symbolising the Eight Chinese Trigrams, or by the paths suspended over the water, integrated in a natural setting respectful of biodiversity, an experience in which the water project is a symbol, a creative space, but at the same time resilient and adaptive.

In a recent interview with Kongjian Yu, it becomes apparent that not all the implemented interventions have been effective (Kaldor, 2024). The transition to 'sponge city' infrastructure has only begun in the last five to ten years; however, this timeframe is still insufficient to ensure adequate management of extreme weather events. Many other Sponge City projects have not achieved the same level of success, perhaps because they have fallen into a crucial paradox: they have failed to resolve the problematic relationship between the aesthetic dimension and the work's operation and maintenance.

Conclusions | In this dissertation, an attempt has been made to form a critical, certainly not exhaustive, picture of the various relationships between form and systemic interaction with water. Measuring oneself against a perspective of what is to come, in the wake of the emergency, means grasping the articulated nature of an epoch-making problem, pondering its inevitability, and recognising the different cultural and technological perspectives that justify potential solutions. It also involves acknowledging the complexity of the intervention areas, objectives, and tools, where multiple cultures and disciplines merge across various operational domains (political, economic, social, environmental, etc.). This demands the exercise of a conscious imagination – of a projectuality capable of innovating while also recapitulating what has already been established.

It also means familiarising oneself with an idea of development that includes attempts, experiments and conflicts, but also dealing with issues and resolving contradictions that are embedded in the general restlessness of the solutions sought, traversed by partial goals that push towards unifying models of integration: integrating the partial and the local means assimilating the heterogeneity of differences into a common perspective in which national identities, local cultures and the legacies of virtuous traditions can dialogue. After decades of WSUD strategies, 'sponge cities', waterscapes, sensitive cities, nature-based solutions, and models for stormwater prediction, control, and management, there are still many challenges with the applicability and scalability of results, most of which stem from the lack of a systematic approach at the urban level. Practical projects require significant investment in implementation across multiple locations to succeed, rather than piecemeal projects that allow redevelopment. The perspective is universal, meaning all countries face similar challenges across economic, social, environmental, and technological areas. The goals' universality, which applies to all nations regardless of their development level, challenges rigid, often unchangeable narrative blocks and conceptual categories. At the same time, the collective nature of the project, combined with social mediation, paves the way for new forms of ecological and settlement interaction, transforming the project into a dialogic tool capable of functioning within both natural and urban environments (Fig. 13).

Against this backdrop, the reflection urges, within the scientific debate on the relationship between water health and integrated water resource management, the implementation of more targeted and circumscribed behaviours, capable of producing an advancement with respect to the theme of public water and the natural and anthropic open space designed as a complex system that is still fragile in its response to unforeseen climatic phenomena.

In the multifaceted background of this complexity of actors, several questions remain unresolved. These include overcoming certain rigidities of contemporary culture, which attributes to the project the role of ecological and cultural 'repairer' rather than that of an anticipator of scenarios. In contrast, it is precisely in its ability to combine control and invention that the project can generate unprecedented figures, where the imagination of an environment in continuous transformation is superimposed on the physical datum.

Another objective limitation stands out: in the excessive convergence of strategies for redevelopment and transformation of the existing, often intended as a response to the errors inherited from modernity. This tendency, while varying across geographies, narrows the project's horizon, distancing it from more radical visions capable of rethinking the relationship between urban space, nature, and water from scratch within a framework of shared responsibility and care for future landscapes.

In the diversity of contemporary solutions analysed, a forced contradiction within the project is revealed, which often limits its real capacity to definitively affect the city and the landscape. In fact, the distance between the rapidity of the emergency and the long timescale of sustainable transformation generates an operational and conceptual gap that is difficult to bridge, but necessary to recognise as part of the design process; this criticality derives from the temporal and operational mismatch between emergency and sustainable transformation, which, despite their declared legitimacy, require space and time that are not collimated.

This condition brings the project, as a privileged area of mediation between contingent instances and long-term visions, to the centre of a disagreement, as it is still too rapid and technical for the emergency, but too slow and reflexive for the demand for integrated and sustainable solutions. Moreover, the functional continuity of interventions over time is subordinated to parameters outside the aesthetic value of the work and its usefulness for the urban community. The lack of maintenance, combined with insufficient attention to the care of the new systems en-

trusted to daily use, results in a decrease in local community participation.

Against this critical backdrop, there remains the need to consolidate a proactive knowledge that, although already recognised in other applied strategies, requires a broader and more concrete operational translation. In this perspective, effective operation depends on the ability to regenerate urban environments and to allocate more space to water in integrated planning.

Water, beyond its technical manifestation and ethical recognition, can become a vital community infrastructure supporting health, economic, and social development (Morpurgo, 2024). It is not just a matter of reinserting it into urban space as an environmental or symbolic resource, but of recognising it as a generative device for social relations, forms of cooperation, and new citizenship practices. When water rediscovers its original purpose, it is no longer limited to accompanying sustainable transformations. However, it opens up scenarios of co-production, in which institutions, technical knowledge and local communities work together to build a shared future.

The multifocal vision proposed in the dissertation leaves open the debate on the cross-cutting implications of other goals of the 2030 Agenda: more precisely, in the context with SDG 13, for the capacity to mitigate the effects of climate change and reduce urban heat islands; with SDG 15, for the protection of ecosystems and urban biodiversity; with SDG 9, for the promotion of material and infrastructural innovations; and with SDG 17, for the opening to processes of co-production and collaboration between institutions, knowledge and communities. In this sense, the scientific contribution consists not only in indicating future scenarios, but in highlighting the validity of processes already underway, in which water acts as a structuring and critical principle of urban and territorial transformations.

Recognising the symbolic and operational value of water means acknowledging the project's anticipatory role in defining resilient landscapes and sustainable futures. A future built on the pacification of conflicts, the control of resources in balance with the environment, and the visionary power of design (Fig. 14) is a possible form of utopia.

References

Alamanos, A., Xenarios, S., Assubayeva, A., Landis, C. F. M., Dellis, K. and Koundouri, P. (2025), "Systems-thinking innovations for water security", in *Frontiers in Water*, vol. 6, article 1492698, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.3389/frwa.2024.1492698 [Accessed 30 September 2025].

ASviS – Alleanza Italiana per lo Sviluppo Sostenibile (2025), *Pace Giustizia e diritti – Pilastri della sostenibilità – L'Italia e gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile,* Rapporto AsviS 2025. [Online] Available at: asvis.it/rapporto-asvis-2025 [Accessed 25 October 2025].

ASviS – Alleanza Italiana per lo Sviluppo Sostenibile (2023), *Gli insediamenti urbani nel Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici,* position paper elaborato dal Gruppo di Lavoro sul Goal 11. [Online] Available at: asvis.it/public/asvis2/files/Pubblicazioni/PositionPaper/2023/PositionPaperASviSGoal11_Pnacc_Insediamenti_Urbani_nov2023.pdf [Accessed 25 October 2025].

Bachelard, G. (1942), *L'eau et les rêves – Essai sur l'imagination de la matière*, José Corti, Paris.

Baratta, A. F. L., Finucci, F. and Magarò, A. (2025), "Povertà e infrastrutture idriche – Un caso studio nell'Africa Subsahariana | Poverty and water infrastructure – A case study in Sub-Saharan Africa", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 284-295. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17192025 [Accessed 25 October 2025].

Blanc, F. (2020), "Patrimoni in divenire – Progettare la loro rigenerazione | Heritages in progress – Designing their regeneration", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 54-63. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/852020 [Accessed 30 September 2025]

Carter, M., Ianiri, F. and Mariano, M. (2024), "Tattiche di resilienza per ambiti urbani costieri – La Marina di Latina e il Porto di New York | Resilience tactics for coastal urban areas – The Marina di Latina and the New York Harbour", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 156-173. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16132024 [Accessed 25 October 2025].

Cea, L. and Costabile, P. (2022), "Flood Risk in Urban Areas – Modelling, Management and Adaptation to Climate Change – A Review", in *Hydrology*, vol. 9, issue 3, article 50, pp. 1-35. [Online] Available at: doi.org/10.3390/hydrology9030050 [Accessed 30 September 2025].

Corradi, M., Stevens, T., Macaione, I., Raffa, A. and Andaloro, B. (2024), "Rigenerazione climatica green degli streetscapes – L'esperienza di De Urbanisten ad Anversa | Green climate-adaptive streetscapes regeneration – The De Urbanisten Experience in Antwerp", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 60-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1652024 [Accessed 25 October 2025].

D'Amelio, M. G. (2009), "La sorgente dell'Acqua Acetosa fuori Porta del Popolo a Roma – Medicina, Architettura e Architettura del Paesaggio", in Bonaccorso, G. (ed.), *Le acque e la città (XV-XVI secolo)*, CROMA, Roma, pp. 167-183. [Online] Available at: academia.edu/1981768/La_sorgente_dell_Acqua_Acetosa_fuori_Porta_del_Popolo_a_Roma_medicina_architettura_and_architettura_del_paesaggio_XVI_XVII_secc_in_Roma_Moderna_e_Contemporanea_Università_Roma_Tre_CROMA_XVII_2009_1_2_2010_pp_167_183_ISBN_9788883681127 [Accessed 30 September 2025].

Daniel, A. D. and Fernandes, J. (2024), "Promotion of community resilience – Do citizens have a role to play? ", in *Local Environment | The International Journal of Justice and Sustainability*, vol. 29, issue 8, pp. 987-1003. [Online] Available at: doi.org/10.1080/13549839.2024.2345621 [Accessed 30 September 2025].

De Francesco, G. (2022), "Infrastrutture dell'acqua – Nuove ecologie progettate", in *Archi*, vol. 1, pp. 19-23. [Online] Available at: espazium.ch/it/archi1-22_de_francesco_progettare_l_acqua [Accessed 30 September 2025].

Di Carlo, F., Giancotti, A. and Reale, L. (2020), "Re-Inventing Water-Ground Relations in Landscape Architecture Projects", in *Sustainability*, vol. 12, issue 24, article 10358, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su122410358 [Accessed 30 September 2025].

Fortier, B. (1983), "La nascita dell'École des Ponts et Chaussées – 2 – Il progetto", in *Casabella*, vol. 496, pp. 36-45.

Hoekstra, A. Y., Buurman, J. and van Ginkel, K. C. H. (2018), " Urban water security – A review ", in *Environmental Research Letters*, vol. 13, issue 5, article 053002, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1748-9326/aaba52 [Accessed 30 September 2025].

Iliadis, C., Glenis, V. and Kilsby, C. (2024), "A cost-benefit 'source-receptor' framework for implementation of Blue-Green flood risk management", in *Journal of Hydrology*, vol. 634, article 13113, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131113 [Accessed 30 September 2025].

Kaldor, G. (2024), "Città spugna – Funzionano davvero? Intervista al padre delle sponge cities", in *Materia rinnovabile | Renewable Matter*, newspaper online, 08/10/2024. [Online] Available at: renewablematter.eu/citta-spugna-funzionano-davvero-intervista-al-padre-delle-sponge-cities [Accessed 30 September 2024].

Kongjian, Y. (2024), "Sponge Synergy – Huaiyang Fuxi Cultural Park in Zhoukou, China", in *Landscape Architecture Frontiers*, vol. 12, issue 3, pp. 103-106. [Online] Available at: doi.org/10.15302/J-LAF-0-040004 [Accessed 30 September 2025].

Lautman, V. (2017), *The Vanishing Stepwells of India*, Merrell Publishers, London.

Meisch, S. P. (2019), "I Want to Tell You a Story – How Narrative Water Ethics Contributes to Re-theorizing Water Politics", in *Water*, vol. 11, issue 4, article 631, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/w11040631 [Accessed 30 September 2025].

Morpurgo, E. (2024), "Biomateriali e zone umide – Filiere per l'edilizia e il tessile dalla valorizzazione di ecosistemi locali | Biomaterials and wetlands – Supply chains for construction and textiles through the enhancement of local ecosystems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 314-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16262024 [Accessed 25 October 2025].

Moscatelli, M. and Raffa, A. (2023), "Infrastrutture verdi in contesti aridi urbani – Ecologie in transizione oltre il Green Riyadh | Green infrastructure in arid urban contexts – Transitioning ecologies beyond Green Riyadh", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 75-86. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1362023 [Accessed 25 October 2025].

Pinon, P. (1986), "I canali – Da strumenti di organizzazione del territorio a monumenti del paesaggio", in *Casabella*, vol. 525, pp. 42-51.

Ricart, S., Berizzi, C., Saurí, D., and Terlicher, G. N. (2022), "The Social, Political, and Environmental Dimensions in Designing Urban Public Space from a Water Management Perspective – Testing European Experiences", in *Land*, vol. 11, issue 9, article 1575, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/land11091575 [Accessed 30 September 2025].

Tasnia, T. and Growe, A. (2025), "A Systematic Literature Review of Water-Sensitive Urban Design and Flood Risk Management in Contexts of Strategic Urban Sustainability Planning", in *Land*, vol. 14, issue 2, article 224, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/land14020224 [Accessed 30 September 2025].

Valente, R., Mozingo, L. A., Bosco, R. and Giacobbe, S. (2024), "Gestione integrata delle risorse naturali in contesti urbani sostenibili | Integrated natural resource management in sustainable urban context", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 180-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15142024 [Accessed 25 October 2025].

Valle, L. (2011), *Dall'ecologia all'ecosofia – Percorsi epistemici ed etici tra Oriente e Cristianesimo, tra scienza e saggezza*, Ibis Edizioni, Como.

Zhang, X., Zhang, Y., Zhai, J., Wu, Y. and Mao, A. (2021), "Waterscapes for promoting mental health in the general population", in *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, issue 22, article 11792, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/ijerph182211792 [Accessed 30 September 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 84-97
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1832025

Article Info

Received 10 September 2025
Revised 28 October 2025
Accepted 29 October 2025
Published 30 December 2025

INFRASTRUTTURE BLU PER LA RIGENERAZIONE ECOLOGICA
Il recupero di siti estrattivi ad Amburgo e Roma

BLUE INFRASTRUCTURES FOR ECOLOGICAL REGENERATION
The recovery of mining sites in Hamburg and Rome

Sara Radi Ahmed, Alessandra Capuano

Abstract

Il contributo esplora il potenziale rigenerativo dell'acqua nei paesaggi post-industriali, con particolare attenzione alle cave dismesse lungo l'Elba ad Amburgo e l'Aniene a Roma. L'acqua è interpretata come agente ecologico attivo, capace di trasformare i laghi di cava in infrastrutture blu-verdi continue, integrando biodiversità, Patrimonio, mobilità e spazio pubblico. Attraverso un confronto critico lo studio dimostra che l'ex acquedotto di Kaltehofe ad Amburgo e le cave circostanti costituiscono un laboratorio di strategie trasferibili per la riconnessione ecologica, la memoria dei luoghi e la resilienza climatica. In coerenza con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile n. 6, 8, 11 e 15 e con le politiche europee per la biodiversità, l'articolo interpreta le trasformazioni paesaggistiche innescate dall'acqua come modello di rigenerazione ecologica e culturale, riconoscendo nei laghi di cava romani possibili nodi di una rete ambientale urbana più ampia.

This paper explores the regenerative potential of water in post-industrial landscapes, with particular attention to disused quarries along the Elbe in Hamburg and the Aniene in Rome. Water is interpreted as an active ecological agent capable of transforming quarry lakes into continuous blue-green infrastructures that integrate biodiversity, heritage, mobility, and public space. Through a critical comparison, the study demonstrates that the former Kaltehofe waterworks in Hamburg and the surrounding quarries constitute a laboratory of transferable strategies for ecological reconnection, site memory, and climate resilience. In line with Sustainable Development Goals no. 6, 8, 11, and 15, and with European biodiversity policies, the article interprets the landscape transformations triggered by water as a model of ecological and cultural regeneration, recognising the Roman quarry lakes as potential nodes in a broader urban environmental network.

Keywords

laghi di cava, paesaggi post-estrattivi, infrastrutture blu-verdi, soluzioni basate sulla natura, patrimonio industriale

quarry lakes, post-mining landscapes, blue-green infrastructures, nature-based solutions, industrial heritage



Sara Radi Ahmed, Architect and PhD in Landscape and Environment at the 'Sapienza' University of Rome (Italy), holds a Master's degree in Architecture, Landscape, and Archaeology. Her research interests focus on political ecology, post-mining practices and the resulting territories, as well as the analysis of historical urban and landscape environments through critical cartography. E-mail: sararadi.ahmed@uniroma1.it

Alessandra Capuano, Architect, is a Full Professor and Director of the Department of Architecture and Design, 'Sapienza' University of Rome (Italy), where she also leads the research laboratory 'Babele – City, Architecture, Nature'. A visiting professor at numerous North American Universities and Principal Investigator of research projects, she is a Member of the PhD Board in Landscape and Environment and General Coordinator of the Erasmus Mundus Joint Master in Architecture, Landscape and Archaeology. Her research focuses on public space and on the relationship between historical landscapes and contemporary architecture. E-mail: alessandra.capuano@uniroma1.it

Con la proliferazione dei siti industriali dismessi in Europa, e non solo, emerge l'urgenza di ripensarli non più come criticità ambientali, ma come potenziali catalizzatori di un nuovo equilibrio ecologico. Nei paesaggi post-industriali l'acqua può divenire un motore fondamentale di rigenerazione territoriale e di resilienza climatica (Berretta, Desideri and Staltari, 2024). In questa prospettiva il contributo analizza come le cave dismesse possano essere trasformate in infrastrutture verdi e blu capaci di integrare funzioni ecologiche, culturali e sociali; più che semplici bacini artificiali i laghi di cava vengono qui interpretati come infrastrutture blu attive, in cui l'acqua agisce come agente ecologico e infrastrutturale, connettendo ecosistemi, sostenendo la biodiversità e ridefinendo i territori post-estrattivi come nodi idrologici integrati in reti ambientali più ampie.

I progetti che assumono l'acqua come principio generatore possono intrecciare memoria storica, economie post-estrattive, mobilità sostenibile e spazi pubblici, delineando nuove strategie paesaggistiche. Tali approcci, fondati su una prospettiva interdisciplinare che coinvolge architettura del paesaggio, Patrimonio, riuso adattivo e biodiversità (Baiani et alii, 2024; Mehan, 2025), offrono al contempo spunti metodologici con potenziali ricadute sia sulla ricerca accademica sia sulla pratica progettuale.

L'articolo propone un confronto tra Amburgo e Roma in relazione al tema di siti industriali abbandonati dove l'acqua ha avuto e può ancora avere un ruolo importante nel territorio: mentre la prima città ha già avviato progetti di recupero e riconversione, la seconda non ha ancora sviluppato strategie operative in tal senso. Il quadro teorico colloca questi due casi studio, insieme ad altri esempi europei di rigenerazione di siti dismessi, nel più ampio contesto della trasformazione post-industriale, in cui pratiche basate sull'acqua hanno convertito aree degradate in risorse culturali, storiche ed ecologiche di valore.

Il recupero dei territori periurbani si inserisce negli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) e nelle strategie europee per la biodiversità e la rinaturazione, riconoscendo nelle infrastrutture blu-verdi una leva essenziale per l'adattamento climatico e la valorizzazione ecologica e culturale dei siti rigenerati[1]. I casi analizzati riguardano gli impianti di depurazione di Amburgo e le aree estrattive lungo il Fiume Aniene, nell'area metropolitana di Roma. L'esperienza tedesca costituisce un riferimento progettuale utile per affrontare le criticità del territorio tiburtino, tra la Capitale e Tivoli: ad Amburgo l'acqua si configura come elemento ambientale, infrastruttura territoriale e memoria culturale e in questa prospettiva la rigenerazione non è concepita come intervento puntuale su singoli siti, ma come costruzione di sistemi paesaggistici integrati.

L'obiettivo del contributo è mostrare come l'acqua, oggi utilizzata nell'area tiburtina prevalentemente a fini industriali, possa divenire motore di trasformazione delle cave dismesse in sistemi blu-verdi resilienti, capaci di rafforzare la connettività ecologica e l'accessibilità pubblica nei territori periurbani.

Quadro interdisciplinare e approccio metodologico | Dal punto di vista metodologico l'articolo presenta una rassegna critica della letteratura, il confronto con altri esempi europei, l'analisi dei due casi studio e una discussione finale che evidenzia nuove interpretazioni e possibili ricadute per la ricerca e la pratica progettuale. Il lavoro mira a colmare una lacuna nella ricerca attuale, integrando i temi della rinaturalizzazione ecologica e del riuso del Patrimonio post-industriale, proponendo un modello operativo, replicabile in diversi contesti europei (Dreiseitl, 2020), per la rigenerazione post-industriale delle cave, spesso considerate spazi marginali, nonostante il loro valore di serbatoi di biodiversità urbana (Lecardane, 2023).

Mentre la letteratura sul post-mining tende a interpretare i laghi di cava come interventi isolati di recupero ambientale, questo studio ne propone una lettura sistemica, riconoscendone il potenziale ruolo di infrastrutture connettive capaci di integrare le ecologie periurbane con la città attraverso corridoi blu continui e reti di mobilità sostenibile (Pirina, Comi and d'Abramo, 2024): un simile punto di vista rafforza al tempo stesso la continuità ecologica e l'accessibilità pubblica e presenta un approccio multidisciplinare. Studi recenti evidenziano il declino della biodiversità come una delle principali minacce per le città (Hardman and Samangooei, 2024), richiedendo soluzioni urgenti per affrontare la crisi in corso (Oke et alii, 2021). I laghi di cava offrono habitat per piante, animali e insetti e possono attrarre uccelli e anfibi (Kettermann and Fartmann, 2023), arricchendo la biodiversità, elemento essenziale nella creazione di parchi a servizio delle comunità locali (Tope, Blessing and Adebisi Heritage, 2023). Questi bacini idrici non sono soltanto serbatoi di biodiversità (Fois et alii, 2025), ma possono anche funzionare come sistemi di contenimento delle inondazioni (Mortice, 2015), riserve d'acqua per emergenze legate a incendi, siccità, irrigazione (Jawecki, Kowalczyk and Feng, 2019) e altri usi agricoli (Talento, Amado and Kullberg, 2020). Queste zone umide hanno inoltre la capacità di ridurre il deflusso delle acque meteoriche, favorire la ricarica delle falde, migliorare la qualità dell'aria e dell'acqua, abbassare le emissioni di carbonio e mitigare l'effetto 'isola di calore urbana' (Brears, 2023).

Il ripristino delle cave abbandonate attraverso la loro conversione in laghi di cava richiede un intervento minimo: l'acqua penetra naturalmente nelle cave aperte in contesti ricchi di acque sotterranee e precipitazioni (Redondo-Vega et alii, 2024); qui l'acqua non è più considerata una risorsa passiva, ma un agente ecologico attivo (Casiddu, Burlando and Chen, 2024) che genera nuove relazioni in grado di rimodellare i paesaggi post-estrattivi, negoziare con gli interventi umani, promuovere ecologie umane e non umane (El-Hitami, Mahall and Serbest, 2023) e creare le condizioni per la biodiversità (Lund and Blanchette, 2023). L'integrazione dei sistemi idrici nel trasporto verde ha anche vantaggi cognitivi perché può sostenere il benessere della comunità (Vranayova, Kaposztasova and Lis, 2024) e fornire un valore educativo (Brears, 2023; Kantor-Pietraga, Zdyrko-Bednarczyk and Bednarczyk, 2025).

I siti di estrazione spesso compromettono la continuità del paesaggio, con trasformazioni topografiche e deforestazione, per ricomporre questi paesaggi è necessario elaborare strategie che consentano di recuperare i rifiuti minerari, siano essi corsi d'acqua inquinati o ecosistemi alterati, in modo funzionale, sicuro e conveniente, consentendone il riutilizzo pubblico (Talento, Amado and Kullberg, 2020; Berger, 2006).

In questa prospettiva l'acqua, intesa come infrastruttura territoriale, diventa un elemento chiave per la rigenerazione dei paesaggi post-industriali (Aliberti, 2015); tale ruolo emerge chiaramente nei casi studio internazionali selezionati e riportati nella Tabella 1, che offrono una panoramica di progetti di rigenerazione guidati dall'acqua e fondati su principi di integrazione ecologica e infrastrutturale. I criteri di valutazione adottati si basano sui principali quadri teorici per l'analisi dei paesaggi post-estrattivi (Aliberti, 2015), sui principi di performance e governance delle infrastrutture idriche (Dreiseitl, 2020; Brears, 2023), e sugli indicatori ecologici osservati negli ambienti dei laghi di cava (Kettermann and Fartmann, 2023; Fois et alii, 2025).

Dalla Tabella 1 emergono tre principali tendenze progettuali rilevanti per l'analisi dei casi di Amburgo e Roma, ovvero la rinaturalizzazione dei siti industriali con interventi su larga scala, la riattivazione del Patrimonio industriale e l'aumento del valore ecologico, come nel caso del Progetto Emscher (Ruhr, Germania) e delle Cave di Lusazia (Germania). Il focus di questa ricerca amplia questi approcci progettuali per includere temi come l'accessibilità urbana tramite mobilità dolce, continuità storica e culturale e impatto sociale.

Nella lettura di Amburgo e Roma la metodologia impiegata è di tipo comparativo e si basa su dati GIS provenienti dalle piattaforme di Enti pubblici e sull'analisi di documenti strategici di carattere politico e urbanistico, di valutazioni ambientali e di relazioni specifiche sui siti. Un lavoro sul campo ad Amburgo per valutare i risultati degli interventi e a Roma per considerare lo stato dei luoghi è stato fondamentale per maturare alcune riflessioni pre-progettuali; i casi sono stati valutati in base ai parametri riportati nella Tabella 2.

Il caso dell'ex impianto idrico di Kaltehofe di Amburgo | Il fiume Elba, tra i principali corsi d'acqua dell'Europa centrale, ha fornito per secoli ad Amburgo acqua potabile, servendo allo stesso tempo da fognatura naturale (Exner, 2015); per il filtraggio l'approvvigionamento cittadino si affidava inizialmente all'impianto di Rothenburgsort, attivato dopo il grande incendio del 1842. Con l'aumento della domanda e il peggioramento della qualità delle acque del fiume, determinato anche dallo sviluppo delle industrie sulle sue rive (Fig. 1), l'inquinamento ha raggiunto l'apice nel 1892, quando la drammatica epidemia di colera ha reso urgente una fornitura idrica igienicamente sicura.

La città ha quindi incaricato l'ingegnere inglese William Lindley, già noto in Europa per i suoi progetti infrastrutturali (Hehl-Lange and Lange, 2023), di realizzare un nuovo sistema filtrante, l'impianto idrico di Kaltehofe, che prevedeva quattro bacini di filtrazione a sabbia lenta sull'isola, affiancati da bacini di sedimentazione (senza filtrazione) sull'isola di Bellwirder (Fig. 2); al termine dei lavori Kaltehofe è diventato il più grande impianto di depurazione dell'acqua del suo tempo. Dal 1989 i progressi tecnici hanno consentito ad Amburgo di rifornirsi tramite altri 17 impianti: l'impianto di Kaltehofe è stato gradualmente dismesso cessando l'attività nel 1990, dopo oltre un secolo, e sono stati elaborati diversi progetti di riuso adattivo del sito. La natura ha lentamente riconquistato l'isola con piante endemiche, pipistrelli, anfibi e uccelli migratori che hanno trovato nei bacini e nelle zone umide nuovi spazi vitali.

All'inizio degli anni 2000 si è avviato un processo di sviluppo sostenibile ispirato all'Agenda 21 coinvolgendo attori locali, Istituzioni, imprese e associazioni ambientaliste con l'obiettivo di mantenere la biodiversità esistente e aprire alcune aree al pubbli-

co: nel 2011 è stato inaugurato il Wasserkunst nel quale la natura, con la sua fauna e flora diversificate, è diventata parte integrante del monumento industriale e della storia urbana di Amburgo.

Oggi Kaltehofe rappresenta un unicum del Patrimonio industriale del XIX secolo, essendo l'unico luogo al mondo nel quale si conservano bacini di filtrazione a sabbia (Fig. 3): il complesso comprende 22 bacini, il laboratorio originario ospitato in una villa in stile 'svizzero' (Fig. 4) progettata da Franz Andreas Meyer, un museo contemporaneo firmato Studio Andreas Heller Architects e 44 torrette di controllo, 36 delle quali sono preservate in quanto piccoli edifici in mattoni per la regolazione dell'acqua, progettati in stile gotico da Meyer (Fig. 5). La vicina isola di Billwerder, già area di sedimentazione, è oggi la Riserva naturale di Holshafen: un paesaggio di acque dolci fangose modellate dalle maree dell'Elba, habitat esclusivo di specie come il finocchio acquatico ('Oenanthe lachenalii') e unico luogo di nidificazione dei cormorani ad Amburgo (Diekmann, 2021).

Paesaggi di cava: natura e tempo libero nel corridoio fluviale | I rami dell'Elba a sud di Kaltehofe ospitano numerosi siti di estrazione della ghiaia che convivono con processi di rigenerazione ecologica (Fig. 6); la Tabella 3 riassume i dati ecologici delle cave lungo il Fiume. Billbrook – insieme a parti di Rothenburgsort – costituisce il secondo polo industriale di Amburgo, con quartieri residenziali alternati ad attività ad alta intensità di consumo di suolo, soprattutto nel riciclo. Il bacino della cava, scavato nel 1987 a sud del Bille dove l'attività estrattiva prosegue (Fig. 7), ha favorito la formazione di biotopi palustri essenziali alla biodiversità. Il sito rientra nel Piano di sviluppo Billbrook 8 / Billwerder 27, che prevede collegamenti ciclabili con la Riserva Boberger Niederung.[2]

Più a sud, lungo l'ex cava del Dove-Elba, è sorto il Wasserpark Dove-Elbe, area ricreativa per sport acquatici e tempo libero, riqualificata dopo un concorso paesaggistico negli anni '60 (Fig. 8), il cui paesaggio conserva tracce del secolare uso agricolo (a partire dal XIII secolo) e delle più recenti attività minerarie che hanno generato gli attuali laghi. Oggi l'area comprende sentieri circolari, spiagge urbane e collegamenti con il De Reit, Riserva naturale chiave per l'avifauna migratoria; il lago meridionale ospita inoltre una pista di regata di due chilometri, dotata di torre di osservazione.

A nord-ovest del Parco si estende la Riserva Westensee & Allermöhe Meadows, dove l'acqua proveniente da un'altra ex cava continua a modellare il paesaggio agricolo di lunga durata. Dagli anni '90 sono state implementate importanti misure di compensazione ecologica: il ripristino di 20 km di canali ha favorito il ritorno di specie rare e in via di estinzione, sollevato i livelli idrici e trasformato le paludi in preziose praterie umide; la creazione di piccoli specchi d'acqua ha ulteriormente migliorato la qualità ecologica del sito (Mitschke, 2015; Hamburg, 2012). I progetti di rigenerazione guidati dall'acqua ad Amburgo si inseriscono pienamente nella visione territoriale del Das Grüne Netz Hamburg (lett. Piano della Rete Verde), una strategia di lungo periodo coordinata dal Ministero dell'Ambiente, del Clima, dell'Energia e dell'Agricoltura. L'obiettivo è tessere un paesaggio ecologico continuo, connettendo parchi urbani, riserve naturali e sistemi idrici in una rete che respira insieme alla città.

In questo quadro gli ex siti industriali ed estrattivi lungo il corridoio meridionale dell'Elba vengono riconfigurati come nuovi paesaggi multifunzionali nei quali gestione idrica, fruizione pubblica e ripristino ecologico convergono in un equilibrio dinamico. La Rete Verde lavora come infrastruttura territoriale capace di cucire il centro urbano ai paesaggi periurbani e rurali, creando corridoi blu-verdi che sostengono non solo la mobilità umana, ma anche lo spostamento e la sopravvivenza delle specie che abitano questo ecosistema in trasformazione[3]. Nel loro insieme questi interventi mostrano come Amburgo riesca a trasformare la bonifica post-industriale in un motore di pianificazione ecologica metropolitana, mantenendo un filo continuo tra la scala locale dei progetti e le strategie urbane di adattamento climatico.

Site	Ecological Function	Hydrological Performance	Public Use	Heritage Value	Governance	Risks	Transferable Patterns
Duisburg-Nord (Germany)	High *strong natural recolonisation*	Medium *integrated water management*	High *extensive public use*	High *industrial heritage valorisation*	High *strong public–private partnership*	Low / Medium	industrial reuse & musealization on a territorial scale
Emscher River Project (Ruhr, Germany)	High *large-scale ecological corridor*	High *systemic river restoration*	High	Medium *integration of industrial heritage*	High *metropolitan governance*	Medium	territorial scale & watershed management
Zhongshan Shipyard Park (Guangzhou, China)	Medium *urban ecological regeneration*	Medium	High *urban park*	Medium	Medium	Low / Medium	integration of water in dense urban contexts
Shanghai Botanical Garden (China)	High *strong botanical and ecological value*	Medium	High *educational & research uses*	Low–Medium	High institutional	Low	integration of research and education
Tangshan Quarry Park (Nanjing, China)	Medium / High	Medium	High	Medium	Medium	Medium *residual water quality*	quarry-to-park model
Henry Palmisano Park (Chicago, USA)	Medium	Medium	High	Low / Medium	Medium	Low	quarry lagoon & urban recreation
Bellwood Quarry / Westside Park (Atlanta, USA)	Medium	Medium	High	Low	Medium	Medium	greenway & cycle link integration
Don Valley Brickworks (Toronto, Canada)	High *wetland habitat creation*	Medium / High	High	High *industrial heritage*	High *community cooperative model*	Low / Medium	heritage & ecology hybrid reuse
Somerset Earth Science Centre (UK)	Medium	Medium	Medium	Low / Medium	Medium	Low	educational adaptive reuse
Pugneys Country Park (Wakefield, UK)	Medium / High	Medium	High	Low	Medium	Low	recreation & biodiversity restoration
Lusatia Quarries (Germany)	High *post-mining succession*	Medium	Medium	High	Medium	Medium *local contamination*	large-scale renaturation
Biville Quarries (Normandy, France)	Medium	Medium	Medium	Low	Medium	Medium	local-scale renaturation
Parkfield Road Park (Rugby, UK)	Medium	Low / Medium	High	Low	Low / Medium	Medium	community-driven parkification
Jardin de Saint-Adrien / Parc de la Plage Bleue / Buttes Chaumont (Paris, France)	Medium	Low / Medium	High	High *urban / historic heritage*	High *urban governance*	Low	urban park integration

L'asse delle cave storiche della Tiburtina-Aniene a Roma | A differenza di altre aree della campagna romana, note per la vocazione agricola e per la presenza di residenze per la villeggiatura, la periferia orientale di Roma si distingue per un territorio profondamente segnato dalla stratificazione industriale e dalle trasformazioni legate alla mobilità e alla produzione. Il corridoio Tiburtina-Aniene, modellato dalla sua posizione strategica tra Roma e Tivoli e dalla conformazione pianeggiante del fondovalle, ha rappresentato per secoli un asse fondamentale per la circolazione di merci, persone e risorse: storicamente ha consentito il trasporto dei blocchi lapidei lungo il Fiume Aniene, un tempo navigabile, ha sostenuto il traffico militare e commerciale sulla via Tiburtina e ha costituito il principale itinerario per gli artisti del Grand Tour e per la transumanza attraverso Tivoli e le aree termali delle Acque Albule (Fig. 9).

Il Fiume Aniene è stato a lungo un'infrastruttura essenziale per l'industria locale (D'Ascanio and Palazzo, 2023) fornendo acqua alle manifatture tessili, alle centrali idroelettriche, alle attività estrattive e alle oltre venti cartiere che, fino agli anni Cinquanta e Sessanta dello scorso secolo, hanno trainato l'economia dell'area, alimentando un know-how tecnico e favorendo lo sviluppo di altri settori produttivi. Con il loro declino il ruolo trainante dell'economia locale è stato progressivamente assunto dal settore edilizio e l'estrazione di calcare, travertino, tufo, pozzolana, argilla e altri materiali da costruzione è diventata l'asse portante dell'economia territoriale, consolidando il legame fra edilizia e imprenditoria estrattiva (Martines and Pallottino, 2019); il bacino estrattivo del travertino si è esteso rapidamente, trasformando in pochi decenni il paesaggio circostante.

Nel periodo immediatamente precedente e successivo alla Seconda guerra mondiale l'espansione urbana ha interessato le aree poste al di sopra e intorno ai nuclei medievali preesistenti, dove le grandi proprietà agricole, organizzate in 'ville' come Villalba o Villanova, furono progressivamente suddivise e trasformate in insediamenti residenziali a bassa densità. Tale processo, alimentato dal boom edilizio romano degli anni Cinquanta e Sessanta, ha riconfigurato gli antichi agglomerati rurali in periferie frammentate, sorte in continuità con le aree industriali ed estrattive della valle dell'Aniene, spesso attraverso fenomeni di autocostruzione e in assenza di una pianificazione unitaria. Queste nuove urbanizzazioni, che in passato erano collegate alla Capitale tramite la tranvia e successivamente tramite la linea ferroviaria regionale, sono oggi spesso carenti di servizi primari e secondari, nonostante lungo l'asse Tiburtina-Aniene si insedino circa 500 mila abitanti.

L'attività estrattiva, tuttora presente, continua a generare conflitti legati all'uso delle risorse e a produrre impatti significativi sulla qualità ecologica e

Previous page

Tab. 1 | Comparison between international water-based post-industrial regeneration projects (credit: S. Ahmed, 2025).

Parameter	key indicators
Ecological value	The percentages of the natural protected areas and special conservation zones, along with related biodiversity indicators such as the number of endemic and protected species
Urban accessibility	The connectivity of the site to the city centre, with a focus on sustainable mobility infrastructure like railways, cycle paths and footpaths
Cultural continuity	The enhancement and adaptive reuse of cultural resources such as archaeological sites, industrial heritage, and their integration into the landscape
Multifunctional reuse	The presence of diverse public amenities, such as sports facilities, swimming areas, open-air museums, and nature trails
Social impact	The involvement of the community in the maintenance of the sites, public use, educational role, and its effects on their well-being

Tab. 2 | Evaluation parameters of post-industrial areas recovered through water-related interventions in Hamburg and Rome (credit: S. Ahmed, 2025).

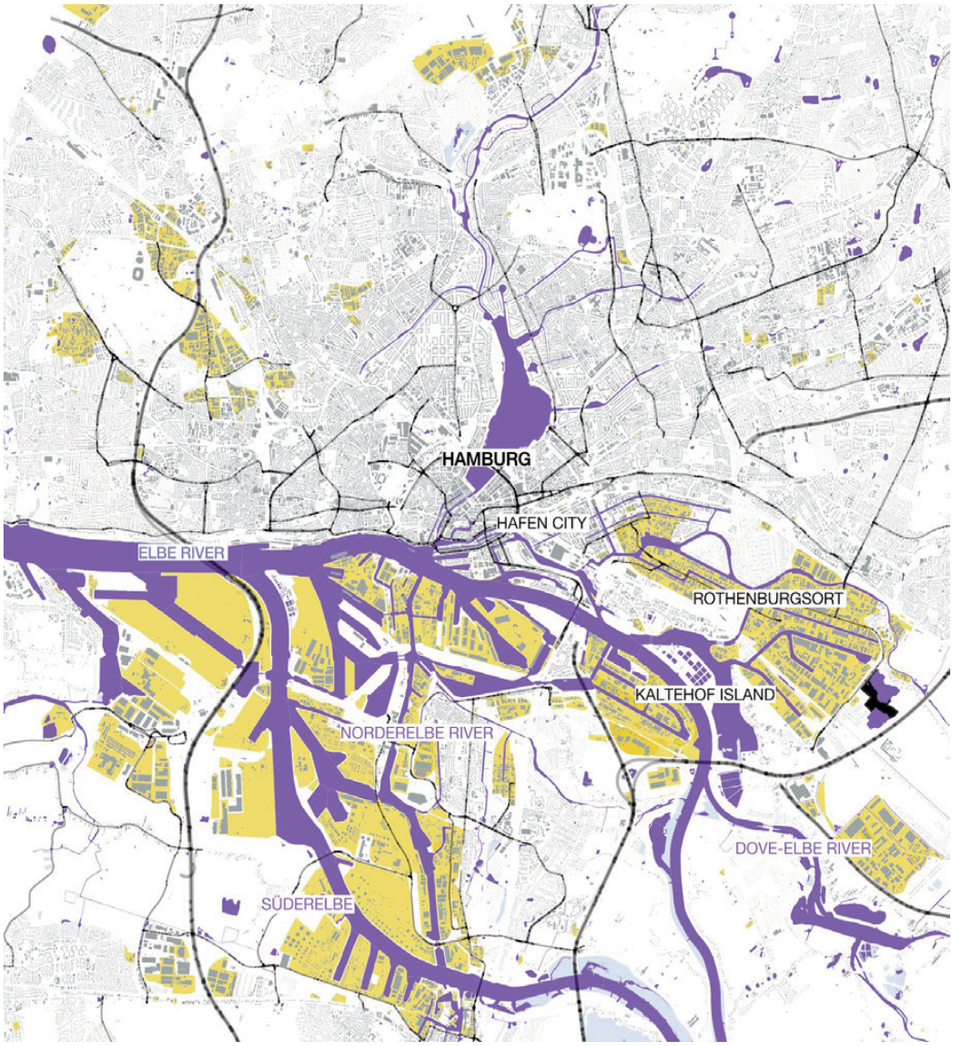


Fig. 1 | Industrial areas of Hamburg, highlighted in yellow (credit: S. Ahmed, 2025).

chimica del Fiume Aniene, tuttavia i numerosi specchi d'acqua che si sono formati nelle cave abbandonate offrono potenziali opportunità di rigenerazione ambientale, ospitando elevati livelli di biodiversità con anfibi, uccelli, insetti, piccoli mammiferi e specie vegetali autoctone (Kettermann and Fartmann, 2023). Il corso dell'Aniene attraversa oggi un sistema di aree protette e riserve naturali, tra cui la Valle dell'Aniene, l'area dei Travertini delle Acque Albule e il Parco Regionale dei Monti Lucretili, che costituiscono una rete ecologica di fondamentale importanza per la resilienza del territorio (Fig. 10).

Non vi sono Programmi recenti per un'effettiva rigenerazione di questi luoghi: nel 2002 è stato elaborato il Programma di Recupero Urbano e Sviluppo Sostenibile del Territorio (PRUSST) Asse Tiburtino[4] che rappresenta uno dei più significativi interventi di pianificazione integrata dedicato al bacino estrattivo del travertino tra Roma, Tivoli e Guidonia Montecelio. Il progetto mira a rigenerare il corridoio Tiburtina-Aniene come asse infrastrutturale ed ecologico strategico, connettendo i paesaggi storici, termali e industriali lungo il Fiume.

Strutturato sui tre principi fondamentali di miglioramento dell'accessibilità, equilibrio tra sistemi produttivi e ambientali e introduzione di una mixité funzionale nelle aree industriali, il Piano prevede l'ampliamento della via Tiburtina, la riqualificazione del Distretto Termale delle Acque Albule e la creazione di un Parco fluviale lungo l'Aniene, estendendo la Riserva Naturale del Fiume di circa 1.300 ettari fino ai Comuni di Guidonia Montecelio e Tivoli. Pur allineandosi ai più ampi strumenti di pianificazione territoriale e idrografica il progetto mette tuttavia in luce la persistente tensione tra priorità economiche ed ecologiche: l'obiettivo dichiarato di ricucire i paesaggi frammentati resta ostacolato dall'inerzia di strumenti normativi superati, che ancora limitano una piena tutela di questo fragile territorio.

Più recente è il Parco Lineare Roma Est, noto anche come ParcoLineaRE, un progetto di riqualificazione urbana e ambientale che mira a trasformare un ampio corridoio della periferia est della Capitale in infrastruttura verde pubblica. Altri studi riguardano il recupero di edifici industriali dismessi a Tivoli, uno dei quali descrive il bacino estrattivo tra Tivoli e Guidonia come 'paesaggio della memoria' e propone scenari di rigenerazione che trasformino la zona da cesura territoriale a rete di riconnessione ambientale e paesaggistica. Un ultimo progetto è Ri_CaVa – Rigenerazione delle Cave e Valorizzazione (Paudice, 2023), citato come modello che integra attività estrattive, uso pubblico e rigenerazione ecologica in un piano territoriale. Il presente studio nasce in risposta a un quadro territoriale tuttora privo di una strategia coerente di recupero e valorizzazione.

Laghi di Tor Cervara e Salone | Alcune delle prime attività di estrazione della pietra si sono insediate nei terreni vulcanici lungo le rive dell'Aniene, in una posizione favorevole per il trasporto dei blocchi via acqua fino al centro della città, come le cave di Tor Cervara e Salone, distanti 12 chilometri, parte del vasto sistema di cave lungo il Fiume che ha fornito materiali lapidei a molti monumenti iconici di Roma, tra cui il Colosseo. Tor Cervara e Salone, che conservano ancora rare tracce visibili di estrazione archeologica risalenti al II secolo a.C. (Fig. 11), oggi sono state trasformate in laghi di cava con sistemi di acque miste; altri laghi di cava storici su proprietà private sono stati riutilizzati per vari scopi quali luoghi per eventi o club di pesca.

Le cave di tufo della Cervara sono state trasformate in paesaggio culturale: a partire dal 1856 la Ponte Mollo Society – un'associazione di artisti tedeschi – vi ha organizzato regolarmente il Cervarafest, trasformando le cave in spazi in cui arte, paesaggio e ritualità sociale si intrecciavano (Fig. 12). Tra il 1815 e il 1890 questa celebrazione dal carattere carnevalesco, animata dalla comunità internazionale di artisti residenti a Roma, si è svolta annualmente a Tor Cervara, inscrivendo le cave nel panorama culturale e artistico internazionale dell'epoca.

Le cave di Salone si estendono per circa sei ettari, in gran parte sotterranei, ma metà dell'area è stata distrutta con la costruzione dell'autostrada A24 Roma-L'Aquila. La realizzazione dell'infrastruttura non è stata supportata da studi sulla biodiversità e sui suoi legami con l'acqua, il che rappresenta un limite importante per il presente studio. Le cave, che si trovano oggi in stato di abbandono, parzialmente allagate e colonizzate da vegetazione spontanea (Fig. 13), fanno parte del più ampio contesto del Parco della Valle dell'Aniene nonostante siano ancora circondate da attività industriali attive: la loro integrazione con il sistema idrico dell'Aniene potrebbe favorire la tutela del più vasto complesso delle cave di Salone, ponendo le basi per la creazione di un Parco naturalistico-archeologico inserito nel perimetro del Parco Regionale del Fiume Aniene.

Laghi di travertino: micro-ecologie nei paesaggi post-estrattivi | Secoli di estrazione del travertino hanno profondamente modellato il territorio, lasciando in eredità vaste cave a cielo aperto i cui bacini bianchi scolpiti – profondi dai 20 ai 60 metri – si riempiono d'acqua una volta abbandonati (Fig. 14). I depositi di travertino sono generalmente caratterizzati da superfici prive di uno strato consistente di terra vegetale, condizione che normalmente limita la formazione di ecosistemi biodiversi a causa dello scarso sviluppo dell'apparato radicale. Tuttavia i sottili substrati carbonatici del travertino possono ospitare una ricca biocenosi micro-ecologica (Pentecost, 2005), favorita dalla costante interazione tra acqua e minerali; questi microstrati, pur limitati in spessore, sostengono licheni, specie vegetali rupicole e microfauna adattata, formando ecosistemi di alto valore ecologico, con presenza di specie rare e protette (Giardini, 2013).

Nei laghi delle cave abbandonate dominano procarioti come il 'Chromatium' (Tortora and Pentecost, 1989) che formano un tappeto di 2-5 mm sulle superfici di travertino, creando un supporto per ospitare altri organismi (Della Porta et alii, 2022) tra cui i cianobatteri, minuscoli arbusti microbici in grado di produrre ossigeno, microrganismi straordinari che hanno modificato la composizione chimica della Terra. Nelle acque prosperano diverse alghe verdi, comprese specie che raramente sopravvivono in acque sulfuree e calde: sono state osservate fino a venti specie legate al travertino, tra cui la 'Charales vulgaris', che contribuisce alla caratteristica texture 'pelosa' e vegetale della pietra.

Sulle sponde dell'Aniene si trova anche la cava del Barco, un sito romano risalente al II secolo, le cui tracce sono in gran parte scomparse a causa delle attività estrattive moderne. Nelle aree circostanti sopravvivono specie vegetali rare, protette e dall'elevato valore ecologico come la 'Iberis pinnata L.', presente unicamente nel Montarozzo del Barco[5] (Giardini, 2013), insieme a una fauna di grande interesse scientifico come il moscerino 'Paracoenia beckeri', recentemente individuato dopo sessant'anni e considerato endemico di quest'area (Pulvirenti et alii, 2024).

Sebbene dal 2019 la zona sia stata classificata come Zona Speciale di Conservazione (ZSC) grazie all'impegno di diverse associazioni ambientaliste locali, tale forma di tutela non garantisce ancora un'effettiva accessibilità pubblica, né impedisce il

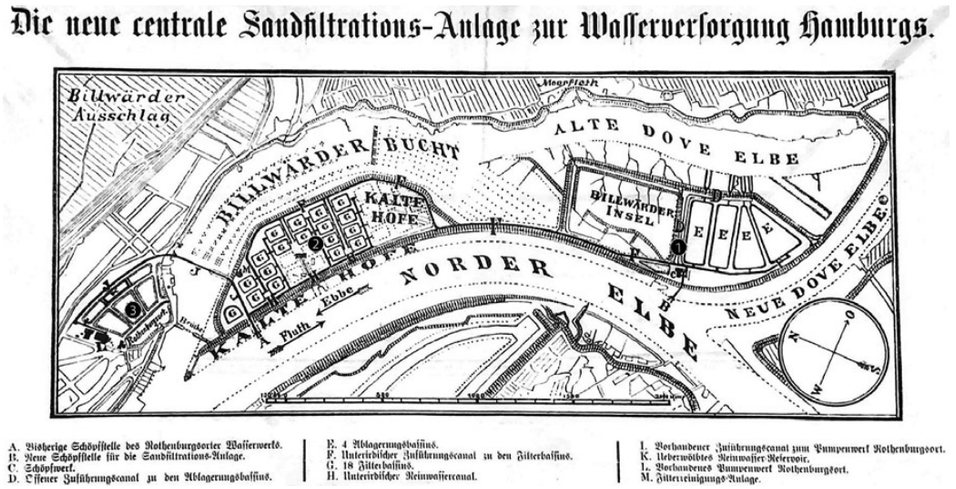




Fig. 2 | 1848 map titled 'The new central sand filtration plant for Hamburg's water supply', scan from the archives of the Wasserkunst Museum, Kaltehofe Island, Hamburg (credit: Staatsarchiv Hamburg, 2025).

Fig. 3 | Aerial view of Kaltehofe Island and its basins (credit: Stiftung Wasserkunst Elbinsel Kaltehofe, 2025).

proseguimento delle attività industriali di estrazione. Gli studi più recenti descrivono le norme di salvaguardia e le iniziative di monitoraggio ambientale attivate nel quadro della ZSC, sottolineando come possano contribuire a valorizzare a biodiversità e definire un nuovo equilibrio ecologico. Nonostante le forti pressioni dovute all'estrazione del travertino, allo sfruttamento delle acque termali e all'urbanizzazione incontrollata, i laghi di cava mostrano un potenziale straordinario per la conservazione e il ripristino degli ecosistemi, grazie ai rapidi processi di rinaturalizzazione in atto (Pulvirenti et alii, 2024).

Riflessioni conclusive: una greenway tra Roma e Tivoli | In tutta Europa le città stanno avviando progetti su larga scala per riqualificare le ex aree industriali dismesse in nuovi spazi pubblici, combinando la rivitalizzazione urbana e la salvaguardia ambientale ed ecosistemica. Piuttosto che cancellare ogni traccia industriale molti progetti scelgono di integrarla nei nuovi disegni, utilizzandola come elemento artificiale del paesaggio, capace di accrescere valore storico e curiosità. Le strategie di rigenerazione si concentrano sul ripristino delle condizioni idrologiche naturali, sulla reintroduzione di vegetazione autoctona e sulla creazione di habitat per la fauna selvatica a sostegno della biodiversità.

Un aspetto centrale è certamente la creazione di nuovi spazi pubblici, destinati allo svago, all'educazione e al tempo libero, che permettano ai cittadini di interagire con i loro ambienti rigenerati e di apprezzarli. Il successo di questi interventi dipende in larga misura dall'elaborazione di un progetto accurato e dalla stretta collaborazione con gli attori coinvolti, per garantire accettazione e sostegno duraturo alle iniziative da parte delle comunità locali.

Il paesaggio dell'Aniene, palinsesto complesso e stratificato che conserva tracce di millenni di storia, si configura come un sistema urbano e ambientale di primaria importanza per l'area metropolitana di Roma e rappresenta una risorsa strategica per il suo futuro. In questo contesto il sistema delle cave di travertino e delle altre cave a est della Capitale costituisce non solo una ferita nel territorio, ma rappresenta un insieme articolato, espressione della lunga interazione tra processi naturali e trasformazioni antropiche. L'acqua oggi utilizzata a fini industriali può trasformare le cave dismesse in sistemi blu-verdi resilienti, capaci di rafforzare la connettività ecologica e l'accessibilità pubblica nei territori periurbani.

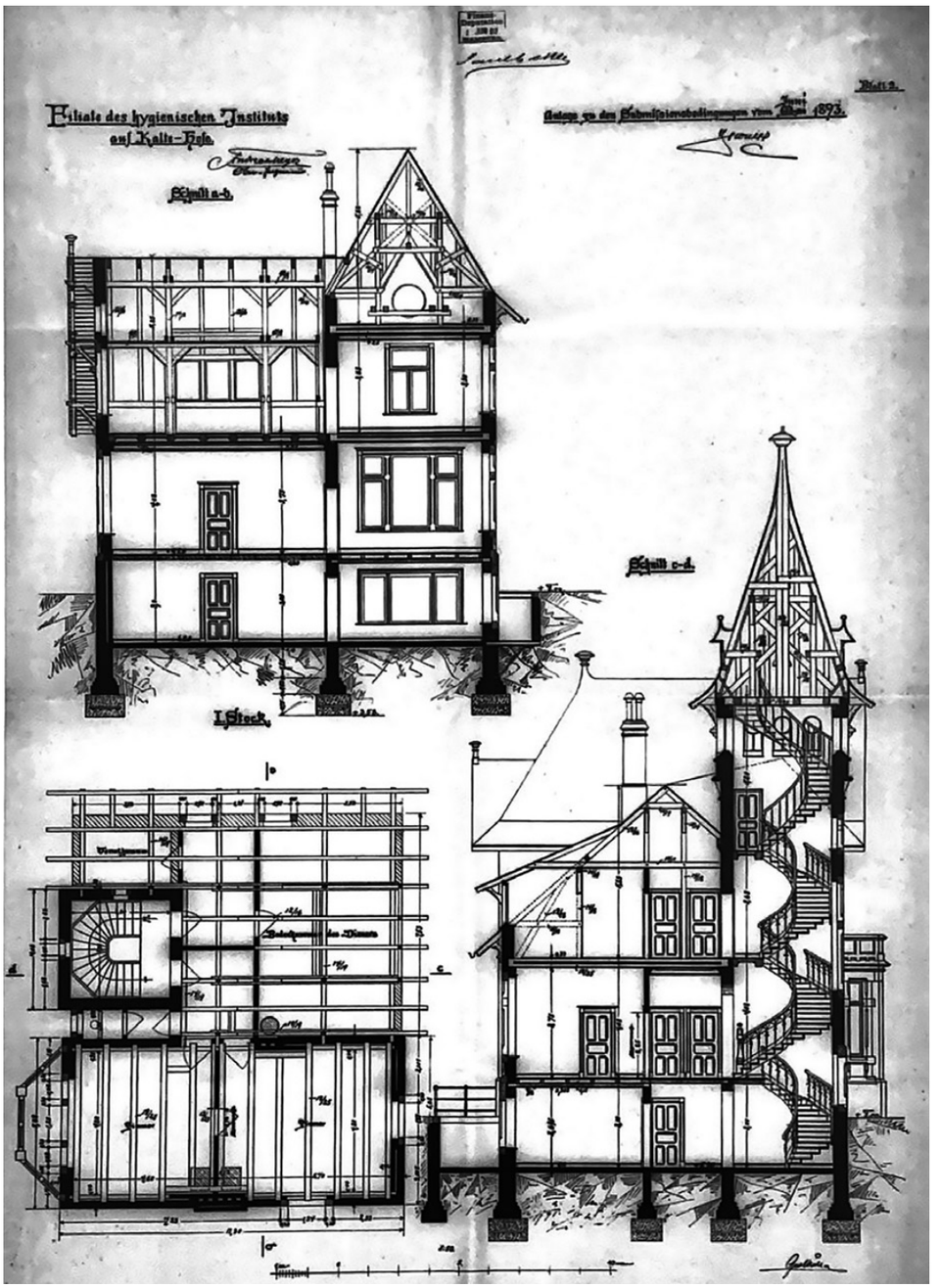




Fig. 4 | Swiss Villa, formerly the pumping laboratory and now the Wasserkunst Museum (credit: Staatsarchiv Hamburg, 2025).

Fig. 5 | Renaturalised basin with a valve house (credit: S. Ahmed, 2025).

Non tutte le cave sono adatte a essere trasformate in bacini idrici: parametri come posizione, dimensioni, volume d'acqua, permeabilità del suolo, deflusso dalle pareti e tipologia del materiale estratto devono essere attentamente valutati, poiché i laghi di cava possono presentare rischi significativi legati al bilancio idrico, dall'impoverimento delle falde nei climi aridi alle tracimazioni nelle aree soggette a inondazioni, con conseguenze ecologiche, sociali ed economiche (Sharma and Franks, 2013). Tuttavia l'acqua ha spesso dimostrato di poter essere impiegata con successo come agente ecologico in numerosi contesti a livello mondiale i quali, se integrati in un più ampio sistema di infrastrutture blu, possono sostenere nuove funzioni ricreative e turistiche e promuovere modelli economici sostenibili, mitigando gli effetti negativi e contribuendo al raggiungimento degli SDG in territori segnati da pratiche estrattive miopi.

Il modello di Amburgo rappresenta un esempio emblematico nel quale i siti sono inseriti in un anello verde ecologico continuo e collegati ai margini estremi della città da una pista ciclabile lungo l'Elba (Fig. 15). Ciò testimonia l'evoluzione dell'approccio regionale alla gestione delle risorse idriche come strumento di trasformazione paesaggistica, in cui le 'cicatrici' industriali vengono reinterpretate come spazi multifunzionali capaci di sostenere biodiversità, svago e Patrimonio.

Dal punto di vista della gestione paesaggistica gli interventi di riqualificazione industriale di Amburgo si fondano su dati e Piani multiscalari di lungo periodo che coinvolgono una pluralità di attori, tra cui Municipalità, comunità locali, ecologi, ONG e soggetti privati. Le rilevanti limitazioni geografiche e politiche che ne ostacolano la trasferibilità al bacino Tiburtina-Aniene, e che coincidono anche con i principali limiti di questo studio, sono riconducibili alla diversa scala di governance, alla frammentazione amministrativa e fondiaria e alla difficoltà di reperimento di dati ecologici e idrologici sistematici nel caso romano (Tab. 4).

Lungo l'asse del fiume Aniene e della via Tiburtina si può immaginare un corridoio ecologico in grado di connettere Roma a Tivoli, configurando una vera e propria greenway che unisca terrains vagues, aree agricole, aree industriali dismesse, patrimonio storico e archeologico e centri urbani. Un simile sistema percorso da una pista ciclabile e dalla ferrovia consentirebbe di costruire un nuovo asse verde verso est, complementare al Parco dell'Appia a sud, al Parco di Veio a nord e al Fiume Tevere a ovest, con l'ambizione di delineare il nuovo cardo e decumano ecologico della Roma del XXI secolo.

L'acqua può quindi assumere contemporaneamente i ruoli di catalizzatore progettuale, infrastruttura portante e custode della memoria: in quanto catalizzatore modella i paesaggi, informa l'organizzazione spaziale e ispira interventi che integrano dimensioni ecologiche, sociali ed estetiche; come infrastruttura sostiene funzioni urbane ed ecologiche essenziali, dal governo delle acque agli habitat per la biodiversità, fino alla regolazione climatica e agli usi ricreativi; come custode della memoria conserva tracce di pratiche passate, attività industriali e storie culturali, innestandole nei paesaggi in trasformazione e consentendo alle comunità di interagire con narrazioni insieme ecologiche e storiche.

With the proliferation of disused industrial sites in Europe and beyond, there is an urgent need to reconsider them not as environmental liabilities but as potential catalysts for a new ecological balance. In post-industrial landscapes, water can become a fundamental driver of territorial regeneration and climate resilience (Berretta, Desideri and Staltari, 2024). From this perspective, this paper analyses how disused quarries can be transformed into green and blue infrastructures capable of integrating ecological, cultural, and social functions. More than simple artificial basins, quarry lakes are here interpreted as active blue infrastructures in which water acts as both an ecological and infrastructural agent, connecting ecosystems, supporting biodiversity, and redefining post- mining territories as hydrological nodes integrated into broader environmental networks.

Projects that take water as their generating principle can intertwine historical memory, post-mining economies, sustainable mobility, and public spaces, outlining new landscape strategies. Such approaches – based on an interdisciplinary perspective that involves landscape architecture, heritage, adaptive reuse, and biodiversity (Mehan, 2025; Baiani et alii, 2024) – offer, at the same time, methodological insights with potential implications for both academic research and design practice. The article compares abandoned industrial sites in Hamburg

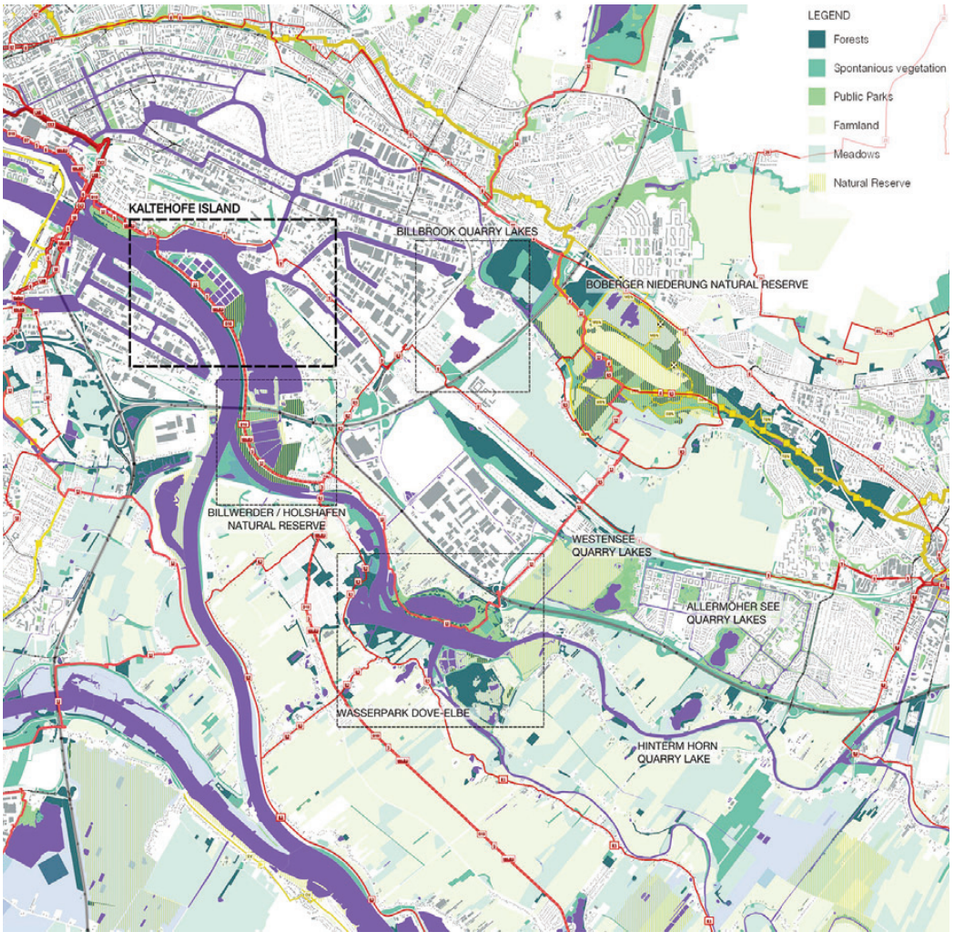


Fig. 6 | Map of the area showing other quarries and renaturalised industrial sites along the branches of the Dove Elbe, highlighting natural systems in relation to water bodies, with cycle paths in red and pedestrian routes in yellow (credit: S. Ahmed, 2025).



Fig. 7 | Billbrook quarry lake with extraction activities in the background (credit: S. Ahmed, 2025).

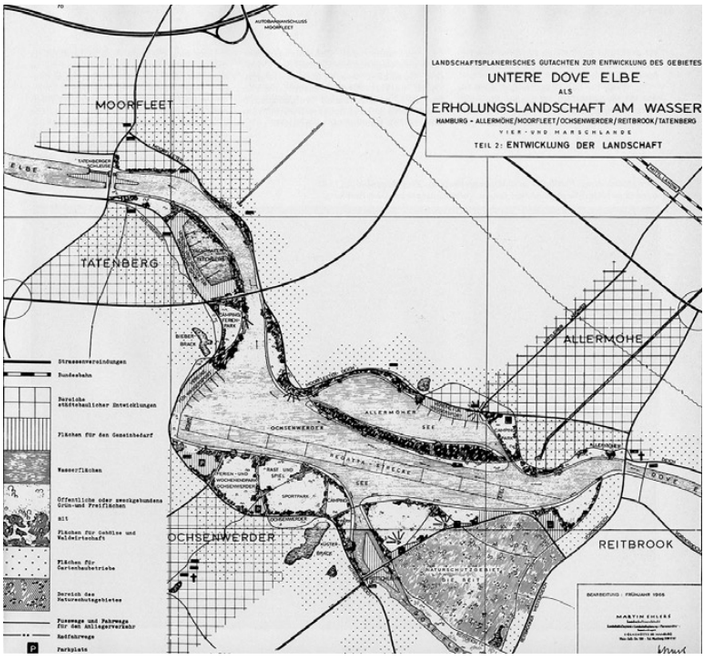


Fig. 8 | Landscape plan of the Untere Dove Elbe, showing the construction of the regatta area (credit: V. Dinse, 1966).

and Rome, where water has played – and can still play – an important role in the territory: while the former has already initiated recovery and reconversion projects, the latter has not yet developed operational strategies in this direction. The theoretical framework situates these two case studies, together with other European examples of disused sites regeneration, within the broader context of post-industrial transformation, in which water-based practices have converted degraded areas into cultural, historical, and ecological assets of value.

The recovery of peri-urban areas is part of the Sustainable Development Goals (SDGs) and of European strategies for biodiversity and re-naturalisation, recognising blue-green infrastructures as an essential lever for climate adaptation and for the ecological and cultural enhancement of regenerated sites[1]. The analysed cases concern the wastewater treatment plants of Hamburg and the mining areas along the Aniene River, within the metropolitan area of Rome. The German experience provides a valuable design reference for addressing the challenges of the Tiburtina territory between the Capital and Tivoli: in Hamburg, water is configured as an environmental element, a territorial infrastructure, and a cultural memory. From this perspective, regeneration is not conceived as an isolated intervention on single sites but as the construction of integrated landscape systems.

This paper aims to show how water, currently used in the Tiburtina area mainly for industrial purposes, can become the driving force behind the transformation of disused quarries into resilient blue-green systems that strengthen ecological connectivity and public accessibility in peri-urban territories.

Interdisciplinary framework and methodological approach | From a methodological perspective, the article presents a critical review of the literature, a comparison with other European examples, an analysis of the two case studies, and a final discussion that highlights new interpretations and possible implications for research and design practice. The work aims to fill a gap in current research by integrating the themes of ecological re-naturalisation and the reuse of post-industrial heritage, proposing an operational model, replicable in different European contexts (Dreiseitl, 2020), for the post-industrial regeneration of quarries, which are often considered marginal spaces despite their value as reservoirs of urban biodiversity (Lecardane, 2023).

While post-mining literature tends to interpret quarry lakes as isolated environmental recovery interventions, this study proposes a systemic reading of them, recognising their potential role as connective infrastructures capable of integrating peri-urban ecologies with the city through continuous blue corridors and sustainable mobility networks (Pirina, Comi and d'Abramo, 2024). Such a perspective strengthens both ecological continuity and public accessibility by offering a multidisciplinary approach.

Recent studies highlight biodiversity decline as one of the main threats to cities (Hardman and Samangooei, 2024), requiring urgent solutions to address the ongoing crisis (Oke et alii, 2021). Quarry lakes provide habitats for plants, animals, and insects. They can attract birds and amphibians (Kettermann and Fartmann, 2023), enriching biodiversity, an essential element in creating parks that serve local communities (Tope, Blessing and Adebisi Heritage, 2023). These water bodies are not only biodiversity reservoirs (Fois et alii, 2025) but can also function as flood control systems (Mortice, 2015), water reserves for emergencies related to fires, drought, irrigation (Jawecki, Kowalczyk and Feng, 2019), and other agricultural uses (Talento, Amado and Kullberg, 2020). Wetlands of this kind can also reduce stormwater runoff, promote groundwater recharge, improve air and water quality, lower carbon emissions, and mitigate the 'urban heat island' effect (Brears, 2023).

The restoration of abandoned quarries by converting them into quarry lakes requires minimal intervention: water naturally infiltrates open pits in areas with abundant groundwater and rainfall (Redondo-Vega et alii, 2024). Here, water is no longer considered a passive resource but an active ecological agent (Casiddu, Burlando and Chen, 2024) that generates new relationships capable of reshaping post-mining landscapes, negotiating with human interventions, promoting human and non-human ecologies (El-Hitami, Mahall and Serbest, 2023), and creating the conditions for biodiversity (Lund and Blanchette, 2023). The integration of water systems with green transport also has cognitive benefits, as it can enhance community well-being (Vranayova, Kaposztasova and Lis, 2024) and provide educational value (Brears, 2023; Kantor-Pietraga, Zdyrko-Bednarczyk and Bednarczyk, 2025).

Extraction sites often disrupt landscape continuity through topographic changes and deforestation. To restore these landscapes, it is necessary to develop strategies that recover mining waste, whether from polluted waterways or altered ecosystems, in functional, safe, and cost-effective ways, enabling their reuse for public purposes (Talento, Amado and Kullberg, 2020; Berger, 2006).

From this perspective, water – understood as territorial infrastructure – becomes a key element in the regeneration of post-industrial landscapes (Aliberti, 2015). This role clearly emerges from the selected international case studies presented in Table 1, which offer an overview of water-driven regeneration projects grounded in ecological and infrastructural integration. The adopted evaluation criteria are based on the main theoretical frameworks for the analysis of post-mining landscapes (Aliberti, 2015), on performance and governance principles of water infrastructures (Dreiseitl, 2020; Brears, 2023), and on ecological indicators observed in quarry lake environments (Kettermann and Fartmann, 2023; Fois et alii, 2025).

Site	Area (ha)	% Protected	Key Species (flora / fauna)	Ecological Value	Urban Accessibility	Cultural Continuity	Multifunctional Reuse	Social Impact
Kaltehofe Island	11	75%	280 plant species, 44 bird species, 1/3 of German bat species	High biodiversity; restored wetland ecology; adaptive rewilding of industrial basins	Medium *accessible by bridge, limited internal paths, connected with cycle paths*	Strong *historic filtration plant preserved as museum (Wasserkunst)*	Education, recreation, and heritage interpretation	Community engagement through exhibitions and environmental education
Billwerder Holzhafen (Billwerder Island)	20	Natural reserve	Water hemlock fennel (*Oenanthe lachenalii*), cormorants (only Hamburg breeding ground)	Rare freshwater mudflat ecosystem; bird habitat of national relevance	Low *limited to guided access*	Moderate *retains industrial topography, natural processes dominate*	Conservation-oriented; limited public use	High symbolic value for urban biodiversity and climate adaptation
Billbrook Quarry Pond	16	Linked to the Boberger Niederung Nature Reserve	220 fauna species, 20 endangered species	High critical wetland buffer zone	Medium *proximity to industrial areas; limited public facilities, connected with a cycle path*	Moderate *traces of industrial past and present*	Potential for recreational development and ecological education	Supports biodiversity awareness near industrial zones
Wasserpark Dove-Elbe	61	Adjacent and connected to De Reit Nature Reserve (since 1973)	Crested newt, moor frog, migratory birds	High ecological and hydrological performance	High *integrated cycle routes and pedestrian paths, connected with a cycle path*	Moderate *traces of gravel extraction remain*	Recreational and sports uses (regatta, leisure)	Strong local participation; urban recreation hub
Westensee & Allermöhe Meadows	80	Natural reserve; connects Boberger Niederung and Die Reit	56 endangered plant species reported	High connectivity across habitats; restoration of a 20 km ditch system	Low *peripheral but linked to the trail network and cycle paths*	Moderate *maintains historical agricultural pattern*	Ecological compensation and wetland restoration	Indirect impact through ecosystem services and water retention

Tab. 3 | Summary of the ecological data of quarry sites along the river branches of southeastern Hamburg (credit: S. Ahmed, 2025).

From Table 1, three main design trends emerge as particularly relevant for the analysis of the Hamburg and Rome cases: the re-naturalisation of industrial sites through large-scale interventions, the reactivation of industrial heritage, and the enhancement of ecological value, as illustrated by the Emscher Project (Ruhr, Germany) and the Lusatian Quarries (Germany). The focus of this research expands these design approaches to include issues such as urban accessibility through soft mobility, historical and cultural continuity, and social impact.

In examining Hamburg and Rome, the applied methodology is comparative, based on GIS data from public institutions and on the analysis of strategic political and urban planning documents, environmental assessments, and specific reports on the sites. Fieldwork in Hamburg to assess the outcomes of interventions and in Rome to evaluate the state of the places was fundamental in developing pre-design reflections; the cases were assessed according to the parameters reported in Table 2.

The case of Hamburg's former Kaltehofe waterworks | The Elbe River, one of Central Europe's main waterways, has for centuries provided Hamburg with drinking water while also serving as a natural sewer (Exner, 2015). For filtration, the city's water supply initially relied on the Rothenburgsort plant, built after the Great Fire of 1842. With the growing demand for water and the worsening quality of the river, further aggravated by the industrial development along its banks (Fig. 1), pollution reached its peak in 1892, when a devastating cholera epidemic made it urgent to ensure a hygienically safe water supply.

The city therefore commissioned the English engineer William Lindley, already known in Europe for his infrastructural projects (Hehl-Lange and Lange, 2023), to design a new filtration system: the Kaltehofe waterworks, which included four slow sand filtration basins on the island, alongside sedimentation basins (without filtration) on Bellwirder Island (Fig. 2). Upon completion, Kaltehofe became the largest water purification plant of its time. From 1989 onwards, technological progress enabled Hamburg to rely on 17 other plants; the Kaltehofe facility was gradually decommissioned and ceased operations in 1990, after more than a century of activity. Several adaptive reuse projects for the site were subsequently developed. Meanwhile, nature slowly reclaimed the island: endemic plants, bats, amphibians, and migratory birds found new habitats in the basins and wetlands.

In the early 2000s, a sustainable development process inspired by Agenda 21 was launched, involving local actors, institutions, businesses, and environmental associations, to preserve existing biodiversity and open parts of the area to the public. In 2011, the Wasserkunst was inaugurated, where nature, with its diverse fauna and flora, became an integral part of the industrial monument and of Hamburg's urban history.

Today, Kaltehofe represents a unique example of 19th-century industrial heritage, being the only site in the world where sand filtration basins are still preserved (Fig. 3). The complex includes 22 basins, the original laboratory housed in a Swiss-style villa (Fig. 4) designed by Franz Andreas Meyer, a contemporary museum designed by Studio Andreas Heller Architects, and 44 control towers, 36 of which are preserved as small brick buildings used for water regulation, designed in Gothic style by Meyer himself (Fig. 5). The nearby Billwerder Island, formerly a sedimentation area, is today the Holshafen Nature Reserve: a landscape of muddy freshwater shaped by the Elbe's tides, and the exclusive habitat of species such as 'Oenanthe lachenalii' (water fennel). It is also the only cormorant nesting site in Hamburg (Diekmann, 2021).

Quarry landscapes: nature and leisure in the river corridor | The southern branches of the Elbe near Kaltehofe host numerous gravel extraction sites that coexist with ongoing processes of ecological regeneration (Fig. 6). Table 3 summarises the ecological data of the quarries located along the river.

Billbrook – together with parts of Rothenburgsort – constitutes Hamburg's second industrial hub, where residential areas alternate with land-intensive activities, particularly in recycling. The quarry basin, excavated in 1987 south of the Bille, where extraction continues (Fig. 7), has encouraged the formation of wetland biotopes essential to biodiversity. The site is part of the Billbrook 8 / Billwerder 27 development plan, which includes cycle path connections to the Boberger Niederung Reserve.[2]

Further south, along the former Dove Elbe quarry, lies the Wasserpark Dove-Elbe, a recreational area for water sports and leisure, redeveloped following a landscape design competition in the 1960s (Fig. 8). Its landscape still preserves traces of centuries-old agricultural use (dating back to the 13th century) and of more recent mining activities that generated the present lakes. Today, the area includes circular walking paths, urban beaches, and connections with De Reit, a key nature reserve for migratory birdlife; the southern lake also features a two-kilometre regatta course equipped with a viewing tower.

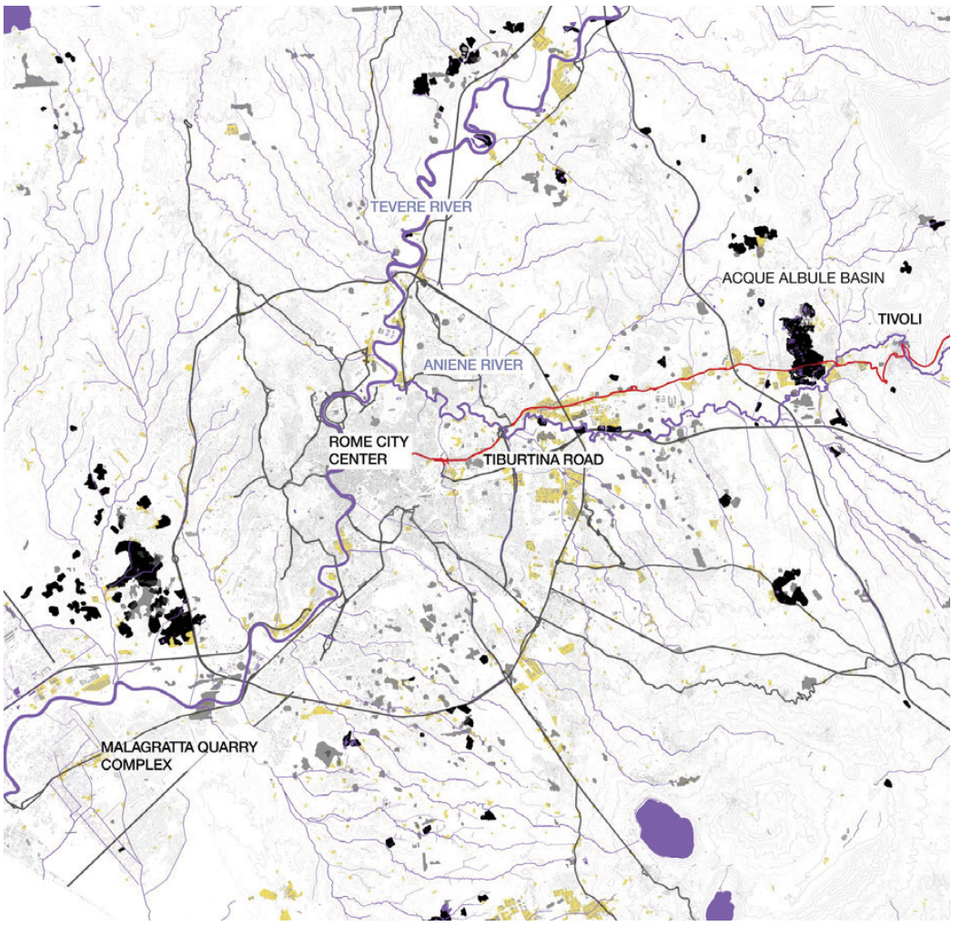
To the northwest of the park, the Westensee & Allermöhe Meadows Reserve extends, where water from another former quarry continues to shape the long-standing agricultural landscape. Since the 1990s, significant ecological compensation measures have been implemented: the restoration of 20 km of canals has encouraged the return of rare and endangered species, raised water levels, and transformed the marshes into valuable wet meadows. The creation of small ponds has further enhanced the site's ecological quality (Mitschke, 2015; Ham-

burg, 2012). Water-driven regeneration projects in Hamburg are fully embedded within the territorial vision of Das Grüne Netz Hamburg (lit. Green Network Plan), a long-term strategy coordinated by the Ministry for Environment, Climate, Energy and Agriculture. The aim is to weave a continuous ecological landscape, connecting urban parks, nature reserves, and water systems into a network that breathes together with the city.

Within this framework, former industrial and extraction sites along the southern Elbe corridor are reconfigured as new multifunctional landscapes where water management, public enjoyment, and ecological restoration converge in a dynamic balance. The Green Network operates as a territorial infrastructure capable of stitching together the urban core with peri-urban and rural landscapes, creating blue-green corridors that sustain not only human mobility but also the movement and survival of the species inhabiting this transforming ecosystem[3]. Taken together, these interventions demonstrate how Hamburg has succeeded in transforming post-industrial remediation into a driving force for metropolitan ecological planning, maintaining a continuous thread between the local scale of projects and the city's broader climate-adaptation strategies.

The axis of the historic Tiburtina-Aniene quarries in Rome | Unlike other areas of the Roman countryside, known for their agricultural vocation and their villas for leisure, the eastern periphery of Rome is characterised by a territory profoundly marked by industrial stratification and by transformations linked to mobility and production. The Tiburtina-Aniene corridor, shaped by its strategic position between Rome and Tivoli and by the flat valley floor, has for centuries served as a fundamental axis for the circulation of goods, people, and resources. Historically, it enabled the transport of stone blocks along the once-navigable Aniene River, supported military and commercial traffic on the Via Tiburtina, and served as the main route for Grand Tour artists and for transhumance between Tivoli and the thermal areas of the Acque Albule (Fig. 9).

The Aniene River was long an essential infrastructure for local industry (D'Ascanio and Palazzo, 2023), providing water to textile manufactories, hydroelectric plants, mining activities, and over twenty paper mills that, until the 1950s and 1960s, sustained the area's economy, fostering technical know-how and the growth of other production sectors. With their decline, the construction sector gradually took over as the main driver of the local economy, and the extraction of limestone, travertine, tuff, pozzolana, clay, and other building materials became the backbone of the territorial economy, consolidating the link between construction and the mining industry (Martines and Pallottino, 2019). The travertine extraction basin expanded rapidly, transforming the surrounding landscape within a few decades. In the period immediately before and after



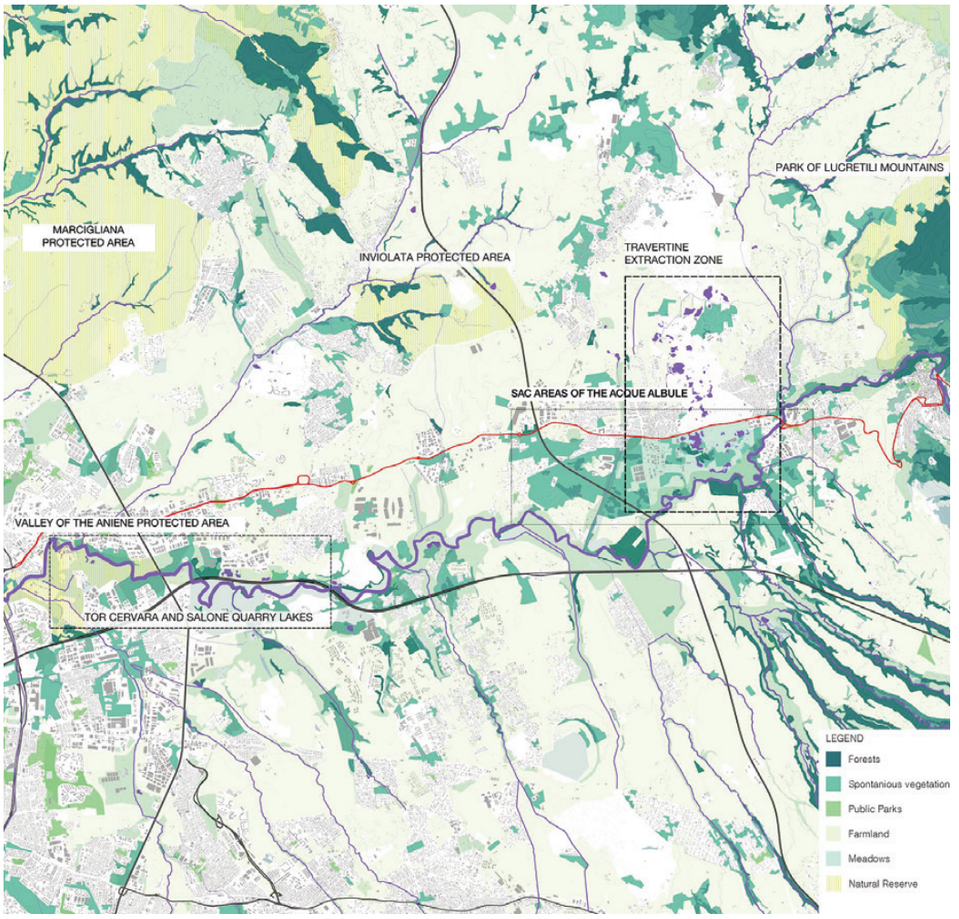


Fig. 9 | The area east of Rome is characterised by a concentration of industrial activities; the map shows active industries, quarries from the bibliography (in grey), visible quarries (in black), and Via Tiburtina, together with the main rivers and water systems of the area (credit: S. Ahmed, 2025).

Fig. 10 | Map of the territory showing quarries, water systems, nature reserves, and national parks between Rome and Tivoli (credit: S. Ahmed, 2025).



Fig. 11 | Traces of Roman stone extraction in the Salone quarries (credit: S. Ahmed, 2025).



Fig. 12 | 'Cervarafest', painting by Carl Morgenstern, Artists' Festival at Cervara, 6 April 1837 (credit: Städel Museum, Frankfurt am Main).

the Second World War, urban expansion affected areas above and around pre-existing medieval nuclei, where large agricultural estates, organised into 'villas' such as Villalba or Villanova, were gradually subdivided and converted into low-density residential settlements. This process, fuelled by Rome's construction boom in the 1950s and 1960s, reshaped the ancient rural clusters into fragmented suburbs, developed in continuity with the industrial and mining areas of the Aniene Valley, often through self-built housing and in the absence of unified planning. These new urbanisations, once connected to the capital by tramway and later by regional rail, today often lack both primary and secondary services, even though approximately 500,000 inhabitants reside along the Tiburtina-Aniene axis.

Mining activity, still ongoing, continues to generate conflicts over resource use and to produce significant impacts on the ecological and chemical quality of the Aniene River. However, the numerous water bodies that have formed in abandoned quarries offer opportunities for environmental regeneration, hosting high biodiversity, including amphibians, birds, insects, small mammals, and native plant species (Kettermann and Fartmann, 2023). The course of the Aniene now crosses a system of protected areas and nature reserves, including the Valle dell'Aniene, the Travertine area of the Acque Albule, and the Monti Lucretili Regional Park, which together form an ecological network of fundamental importance for territorial resilience (Fig. 10).

No recent programmes have been implemented to regenerate these places effectively. In 2002, the PRUSST Tiburtina Axis – Programme for Urban Recovery and Sustainable Territorial Development[4] was drawn up, representing one of the most significant examples of integrated planning dedicated to the travertine extraction basin between Rome, Tivoli, and Guidonia Montecelio. The project aims to regenerate the Tiburtina-Aniene corridor as a strategic infrastructural and ecological axis, connecting the historical, thermal, and industrial landscapes along the river.

Structured around three key principles, improvement of accessibility, balance between productive and environmental systems, and the introduction of functional mixité in industrial areas, the plan foresees the widening of Via Tiburtina, the redevelopment of the Thermal District of the Acque Albule, and the creation of a river park along the Aniene, extending the natural reserve by about 1,300 hectares up to the municipalities of Guidonia Montecelio and Tivoli. Although aligned with broader territorial and hydrographic planning tools, the project nonetheless highlights the persistent tension between economic and ecological priorities: the stated goal of reconnecting fragmented landscapes remains hindered by the inertia of outdated regulatory frameworks that still limit the complete protection of this fragile territory.

More recently, the Parco Lineare Roma Est, also known as ParcoLineaRE, has emerged as an urban and environmental redevelopment project aimed at transforming a wide corridor in the eastern periphery of the capital into a public green infrastructure. Other studies have addressed the recovery of disused industrial buildings in Tivoli, one of which describes the extraction basin between Tivoli and Guidonia as a 'landscape of memory' and proposes regeneration scenarios that would transform the area from a territorial fracture into a network of environmental and landscape reconnection.

A more recent initiative is Ri_CaVa – Regeneration of Quarries and Enhancement (Paudice, 2023), cited as a model that integrates mining activities, public use, and ecological regeneration within a territorial plan. This study was developed in response to a territorial framework that still lacks a coherent strategy for the recovery and enhancement of these areas.

Tor Cervara and Salone Lakes | Some of the earliest stone extraction activities were located in the volcanic soils along the banks of the Aniene, in a favourable position for transporting blocks by water to the city centre, such as the Tor Cervara and Salone quarries, located about 12 kilometres apart. They form part of the vast quarry system along the river that supplied stone materials for many of Rome's iconic monuments, including the Colosseum. Tor Cervara and Salone still preserve rare visible traces of ancient Roman quarrying, dating back to the 2nd century BC (Fig. 11). Today, they have been transformed into quarry lakes with mixed water systems; other historic quarry lakes on private properties have been repurposed for various uses, such as event venues or fishing clubs.

The Cervara tuff quarries have been transformed into a cultural landscape: beginning in 1856, the Ponte Mollo Society, an association of German artists, regularly organised the Cervarafest there, transforming the quarries into spaces where art, landscape, and social ritual intertwined (Fig. 12). Between 1815 and 1890, this carnival-like celebration, animated by Rome's international artistic community, took place annually at Tor Cervara, inscribing the quarries into the cultural and artistic panorama of the era.

The Salone quarries cover approximately six hectares, largely underground, but half of the area was destroyed during the construction of the A24 Rome-L'Aquila motorway. The infrastructure's construction was not supported by biodiversity studies or by analyses of its links with water, a significant limitation for the present research. The quarries, now abandoned, are partially flooded and colonised by spontaneous vegetation (Fig. 13). They are part of the broader Aniene Valley Park context. However, they remain surrounded by active industrial activity. Integrating them with the Aniene water system could support the protection of the more expansive Salone quarry complex, laying the groundwork for the creation of a naturalistic–archaeological park within the boundaries of the Aniene River Regional Park.

Travertine lakes: micro-ecologies in post-mining landscapes | Centuries of travertine extraction have profoundly shaped the territory, leaving behind vast open-pit quarries whose white carved basins, between 20 and 60 metres deep, fill with water once abandoned (Fig. 14). Travertine deposits are generally characterised by surfaces lacking a consistent layer of topsoil, a condition that usually limits the formation of biodiverse ecosystems due to the reduced development of plant root systems. However, the thin carbonate substrates of travertine can host a rich micro-ecological biocenosis (Pentecost, 2005), fostered by the constant interaction between water and minerals. These micro-layers, though shallow, support lichens, rupicolous plant species, and adapted microfauna, forming ecosystems of high ecological value that include rare and protected species (Giardini, 2013).

In the lakes of abandoned quarries, prokaryotes such as 'Chromatium' (Tortora and Pentecost, 1989) dominate, forming a 2-5 mm thick mat on travertine surfaces that provides a base for hosting other organisms (Della Porta et alii, 2022), including cyanobacteria, minute microbial shrubs capable of producing oxygen. These extraordinary microorganisms have altered the Earth's chemical composition. Various green algae also thrive in these waters, including species that rarely survive in sulphurous and hot environments. Up to twenty species associated with travertine have been identified, including 'Charales vulgaris', which contributes to the stone's characteristic 'hairy' and vegetal texture.

On the banks of the Aniene lies the Barco quarry, a Roman site dating to the 2nd century, whose traces have disappeared mainly due to modern extraction activities. In the surrounding areas survive rare and protected plant species of high ecological value, such as 'Iberis pinnata L.', found exclusively on the Montarozzo del Barco[5] (Giardini, 2013), together with fauna of great scientific interest, such as the fly 'Paracoenia beckeri', recently rediscovered after sixty years and considered endemic to this area (Pulvirenti et alii, 2024).

Although since 2019 the area has been classified as a Special Area of Conservation (SAC) thanks to the efforts of several local environmental associations, this form of protection does not yet guarantee adequate public accessibility, nor does it prevent the continuation of industrial extraction activities. The most recent studies describe the safeguard regulations and environmental monitoring initiatives implemented within the SAC framework, emphasising





Limitation and risk	Description	Possible solution
Fragmented governance and Policy gap	Water-based ecologies are hindered by the lack of coordination between municipalities and basin authorities across this vast territory. No clear legislation that highlights water as a valid restorative tool	The organisation of several workshops that led to a governance platform, and the establishment of a consorzio that represents government bodies and park authorities. Integration of these areas in the ongoing green infrastructure projects of the region
Private ownership	The territories along the Aniene may be privately owned, restricting public access	Public acquisition of abandoned open quarries, or incentivising ecological restoration through tax reliefs
Active extraction	Economic sensitivity and quarry lobbying prevent this territorial project	The formulation of a post-extraction future in phased transition policies, with the focus on abandoned quarry ponds
Scarcity of ecological analysis	Studies on the hydrological and chemical regeneration of the water in the quarries in Rome, unlike Hamburg, are still limited	Transparent monitoring of restoration projects measuring biodiversity and accessibility through independent research institutions, and publication of scientific papers on the matter

Fig. 13 | View of the largest lake of the Salone Latomies (credit: S. Ahmed, 2025).

Fig. 14 | View of a lake in an abandoned travertine quarry in the Acque Albule area (credit: S. Ahmed, 2025).

Tab. 4 | Main limitations and risks affecting water-based regeneration in the Tiburtina-Aniene area and related strategies (credit: S. Ahmed, 2025).

their contributions to biodiversity enhancement and the establishment of a new ecological balance. Despite intense pressures from travertine extraction, the exploitation of thermal waters, and uncontrolled urbanisation, the quarry lakes show an extraordinary potential for the conservation and restoration of ecosystems, thanks to the rapid processes of re-naturalisation currently underway (Pulvirenti et alii, 2024).

Concluding reflections: a greenway between Rome and Tivoli | Across Europe, cities are launching large-scale projects to redevelop former industrial areas into new public spaces, combining urban revitalisation with environmental and ecosystem protection. Rather than erasing all industrial traces, many projects choose to integrate these remnants into new designs, using them as artificial landscape elements that enhance historical value and curiosity. Regeneration strategies focus on restoring natural hydrological conditions, reintroducing native vegetation, and creating wildlife habitats to support biodiversity.

A central aspect is undoubtedly the creation of new public spaces dedicated to recreation, education, and leisure, allowing citizens to interact with and appreciate their regenerated environments. The success of these interventions largely depends on the development of carefully planned designs and close collaboration with all involved stakeholders to ensure lasting acceptance and support from local communities. The Aniene landscape, a complex and stratified palimpsest preserving traces of millennia of history, constitutes an urban and environmental system of primary importance for the metropolitan area of Rome and represents a strategic resource for its future. Within this context, the system of travertine quarries and other extraction sites east of the capital not only represents a scar in the territory but also an articulated whole that expresses the long interaction between natural processes and anthropogenic transformations. Water, currently used mainly for industrial purposes, could transform disused quarries into resilient blue-green systems that strengthen ecological connectivity and public accessibility in peri-urban territories.

Not all quarries are suitable for conversion into water basins: parameters such as location, size, water volume, soil permeability, wall runoff, and the type of material extracted must be carefully evaluated, as quarry lakes can pose significant risks linked to the water balance, from groundwater depletion in arid climates to overflow in flood-prone areas, with ecological, social, and economic consequences (Sharma and Franks, 2013). However, water has often proven to be successfully employable as an ecological agent in numerous contexts worldwide, which, when integrated into a broader blue infrastructure system, can sustain new recreational and tourism functions and promote sustainable economic models, mitigating adverse effects and contributing to the achievement of the SDGs in territories marked by short-sighted mining practices.

The Hamburg model stands as an emblematic example, in which sites are included within a continuous ecological green ring and connected to the outer edges of the city by a cycle path along the Elbe (Fig. 15). This demonstrates the evolution of the regional approach to water resource management as a tool for landscape transformation, in which industrial 'scars' are reinterpreted as multifunctional spaces capable of supporting biodiversity, recreation, and heritage.

From a landscape management perspective, Hamburg's industrial redevelopment projects are based on multi-scalar and long-term plans supported by a wide range of actors, including municipalities, local communities, ecologists, NGOs, and private entities. The significant geographical and political constraints that hinder the transferability of this model to the Tiburtina-Aniene basin, and which also represent the main limitations of this study, can be attributed to the differing scales of governance, administrative and land fragmentation, and the difficulty of obtaining systematic ecological and hydrological data in the Roman case (Tab. 4).

Along the Aniene River and Via Tiburtina, one can imagine an ecological corridor connecting Rome to Tivoli, forming a true greenway that unites terrains vagues, agricultural areas, disused industrial zones, historical and archaeological heritage, and urban centres. Such a system, traversed by a cycle path and a railway line, would make it possible to create a new green axis toward the east, complementing the Appian Park to the south, the Veio Park to the north, and the Tiber River to the west, with the ambition of outlining the new ecological cardo and decumanus of 21st-century Rome.

Water can thus simultaneously serve as a design catalyst, structural infrastructure, and guardian of memory. As a catalyst, it shapes landscapes, informs spatial organisation, and inspires interventions that integrate ecological, social, and aesthetic dimensions. As infrastructure, it supports essential urban and ecological functions, from water management to biodiversity habitats, from climate regulation to recreational uses. As guardian of memory, it preserves traces of past practices, industrial activities, and cultural histories, embedding them within evolving landscapes and allowing communities to interact with narratives that are both ecological and historical.

Acknowledgements

This paper is based on the research project 'Paesaggi del Sacro – Antiche e nuove percorrenze per risignificare i legami tra archeologia, natura e insediamenti tra Roma, Tivoli e Subiaco' (lit. 'Landscapes of the Sacred – Ancient and new routes to resignify the relationships between archaeology, nature, and settlements between Rome, Tivoli, and Subiaco'), coordinated by A. Capuano within the PNRR CHANGES programme, and on the PhD thesis by S. R. Ahmed entitled 'Mapping the Void – Landscapes of Roman Travertine Extraction'. The introductory and 'Concluding reflections: a greenway between Rome and Tivoli' sections have to be attributed to A. Capuano, while all other sections to S. R. Ahmed; A. Capuano supervised the entire text.

Notes

1) The recovery of such peri-urban areas aligns with SDG 6, particularly regarding decentralised water reuse and ecosystem restoration, and with SDG 8, which promotes health and well-being for the most vulnerable communities. These objectives, in association with the European Union Biodiversity Strategy for 2030 (European Commission, 2020), the Nature Restoration Regulation (European Parliament and Council of the European Union, 2024), and SDG 15 (Life on Land), confirm the role of blue-green infrastructures as a primary lever for climate adaptation, ecological regeneration, and environmental resilience. In accordance with SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), water-driven interventions also enable the preservation and enhancement of the historical features of sites that, once regenerated, can serve educational, touristic, and recreational purposes (Kantor-Pietraga, Zdyrko-Bednarczyk and Bednarczyk, 2025).

2) For more information, see the webpage: uvp-verbund.de/trefferanzeige?docuuid=3BA8E41C-A072-45ED-84B9- 3F9C7302F7C0&zrstart=0&currentSelectorPage=1&f=state%3Anw&layer=zv&N=51.20&E=10.45&zoom=5&toggle_procedure=&provider=hh&category=wasservorhaben%3Bverarbeitung&procedure=obj_class_zv [Accessed 25 September 2025].

3) For more information, see the webpage: hamburg.de/politik-und-verwaltung/behoerden/bukea/themen/hamburgs-gruen/gruenes-netz/die-gruenen-ringe-280590 [Accessed 25 September 2025].

4) For more information, see the webpage: urbanistica.comune.roma.it/strumenti-urbanistici/rigenerazione-urbana/prusst.html [Accessed 25 September 2025].

5) An ancient artificial Roman hill, formed from travertine residues resulting from Roman quarrying activities 2000 years ago, today hosts over 260 plant species. It is considered a natural monument within the 430 hectares delimited by activists and designated as a SAC (Special Area of Conservation).

References

Aliberti, L. (2015), *Preadattamento e trasformabilità dei siti alterati da attività estrattiva*, Tesi di Dottorato Progettazione Architettonica e Tecnologie Innovative per la Sostenibilità, Università degli Studi di Napoli 'Federico II', Italia, Ciclo XXVII, Relatore Prof. Scarano, R. [Online] Available at: doi.org/10.6092/UNINA/FEDOA/10267 [Accessed 25 September 2025].

Baiani, S., Altamura, P., Turchetti, G. and Romano, G. (2024), "Transizione energetica e circolare del patrimonio industriale – Il caso dell'ex SNIA a Roma | Energy and circular transition of the industrial heritage – The Ex SNIA case in Rome", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 190-203. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15152024 [Accessed 25 September 2025].

Berger, A. (2006), *Drosscape – Wasting Land in Urban America*, Princeton Architectural Press, New York.

Berretta, T., Desideri, F. and Staltari, M. (2024), "Il progetto dello spazio pubblico, tra complessità e crisi ecologica – Da sfida a opportunità per la rigenerazione urbana | Public space project, between complexity and ecological crisis – From challenge to opportunity for urban regeneration", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 74-87. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1662024 [Accessed 25 September 2025].

Brears, R. C. (2023), *Blue and Green Cities – The Role of Blue-Green Infrastructure in Managing Urban Water Resources*, Palgrave Macmillan, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-41393-3 [Accessed 25 September 2025].

Casiddu, N., Burlando, F. and Chen, B. (2024), "Human-de-centred Design – Verso una (nuova) era della sofferenza | Human-de-centred Design – Towards a (new) era of suffering", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 242-249. [Online] Available at:

doi.org/10.19229/2464-9309/16212024 [Accessed 25 September 2025].

D'Ascanio, R. and Palazzo, A. L. (2023), "Unfolding the Aniene River in Peri-Urban Rome – From Conflicts to Opportunities for a Sustainable Strategy", in Giudice, B., Novarina, G. and Voghera, A. (eds), *Green Infrastructure – Planning Strategies and Environmental Design*, Springer, Cham, pp. 43-53. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-28772-5_4 [Accessed 25 September 2025].

Della Porta, G., Hoppert, M., Hallmann, C., Schneider, D. and Reitner, J. (2022), "The influence of microbial mats on travertine precipitation in active hydrothermal systems (Central Italy)", in *The Depositional Record | The Journal of the International Association of Sedimentologists*, vol. 8, issue 1, pp. 165-209. [Online] Available at: doi. org/10.1002/dep2.147 [Accessed 25 September 2025].

Diekmann, V. L. (2021), "Die Natur erobert sich die Billwerder Insel zurück", in *Hamburger Abendblatt*, newspaper online, 18/08/2021. [Online] Available at: abendblatt.de/hamburg/bergedorf/article401910234/die-natur-erobert-sich-die-billwerder-insel-zurueck.html [Accessed 25 September 2025].

Dreiseitl, H. (2020), "Water and Sustainable Design", in Meyers, R. A. (ed.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Springer, New York, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_1032-1 [Accessed 25 September 2025].

El-Hitami, H., Mahall, M. and Serbest, A. (2023), "Ecologia dello spazio – Progetto architettonico e relazioni transfrontaliere | An ecology of space – Architectural design for transboundary relationships", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 153-164. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13132023 [Accessed 25 September 2025].

European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – EU Biodiversity Strategy for 2030 – Bringing nature back into our lives*, document 52020DC 0380, COM/ 2020/380 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0380 [Accessed 25 September 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2024), *Regulation (EU) 2024/1991 of the European Parliament and of the Council of 24 June 2024 on Nature Restoration and amending Regulation (EU) 2022/869*, document 32024R1991. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/reg/2024/1991/oj [Accessed 25 September 2025].

Exner, M. (2015), "Cholera epidemic in Hamburg, Germany 1892", in Bartram, J., Baum, R., Coclanis, P., Gute, D., Kay, D., McFadyen, S., Pond, K., Robertson, W. and Rouse, M. (eds), *Routledge Handbook of Water and Health*, Routledge, London, pp. 644-647.

Fois, M., Cuena-Lombraña, A., Boi, M. E., McInnes, R. J. and Bacchetta, G. (2025), "Changes in biodiversity and ecosystem services over time in post-mining and quarry ponds", in *Hydrobiologia | The International Journal of Aquatic Sciences*, article e13268, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10750-025-05892-4 [Accessed 25 September 2025].

Giardini, M. (2013), "La flora vascolare del Montarozzo del Barco Tivoli (Tivoli, Roma)", in *Annali del Museo Civico di Rovereto*, vol. 28, pp. 161-197. [Online] Available at: fondazionemcr.it/UploadDocs/4972_art08_giardini.pdf [Accessed 25 September 2025]

Hamburg (2012), *Naturschutz für Hamburg – 10 Jahre Sondervermögen für Naturschutz und Landschaftspflege*. [Online] Available at: hamburg.de/resource/blob/172050/9d96fc1628e8a543ec547b9fcee9094a/10jahresov-broschuereb-data.pdf [Accessed 25 September 2025].

Hardman, M. and Samangooei, M. (2024), "Cities, climate change and the biodiversity crisis", in *Climate Interactions | An Elevate Journal*, vol. 1, issue 1, article 2479355, pp. 1-2. [Online] Available at: doi.org/10.1080/29966876.2025.2479355 [Accessed 25 September 2025].

Hehl-Lange, S. and Lange, E. (2023), "Adaptive Transformation of Historic Water Works in Hamburg, Germany – From Essential Infrastructure and Cornerstone of Public Health to Valuable Man-Made Ecosystems and Designed Public Spaces", in *Landscape Architecture Frontiers*, vol. 11, issue 6, pp. 44-52. [Online] Available at: doi.org/10.15302/J-LAF-1-020088 [Accessed 25 September 2025].

Jawecki, B., Kowalczyk, T. and Feng, Y. (2019), "The Evaluation of the Possibility to Use the Water from Quarry Lakes for Irrigation", in *Journal of Ecological Engineering*, vol. 20, issue 9, pp. 188-201. [Online] Available at: doi.org/10.12911/22998993/112490 [Accessed 25 September 2025].

Kantor-Pietraga, I., Zdyrko-Bednarczyk, A. and Bednarczyk, J. (2025), "Importance of Blue-Green Infrastructure in the Spatial Development of Post-Industrial and Post-Mining Areas – The Case of Piekary Śląskie, Poland", in *Land*, vol. 14, issue 5, article 918, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/land14050918 [Accessed 25 September 2025].

Kettermann, M. and Fartmann, T. (2023), "Quarry ponds are hotspots of amphibian species richness", in *Ecological Engineering*, vol. 190, article 106935, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106935 [Accessed 25 September 2025].

Lecardane, R. (2023), "Natura Capitale –Transizione ecologica e fenomeni di trasformazione dello spazio aperto | Nature Capital – An ecological transition and open space transformation phenomena", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 119-130. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13102023 [Accessed 25 September 2025].

Lund, M. A. and Blanchette, M. L. (2023), "Closing pit lakes as aquatic ecosystems – Risk, reality, and future uses", in *WIREs Water*, vol. 10, issue 4, article e1648, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.1002/wat2.1648 [Accessed 25 September 2025].

Martines, F. and Pallottino, E. (2019), *Tivoli, un laboratorio urbano – Ieri, oggi, domani*, Roma Tre Press, Roma. [Online] Available at: romatrepress.uniroma3.it/wp-content/uploads/2019/03/Tivoli-un-laboratorio-urbano.-Ieri-oggi-domani.pdf [Accessed 25 September 2025].

Mehan, A. (2025), "Ripensare i paesaggi post-industriali attraverso la lente dello sviluppo sostenibile | Reimagining post-industrial landscapes through the lens of sustainable development", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 120-129. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1772025 [Accessed 25 September 2025].

Mitschke, A. (2015), *Avifaunistische Begleitkartierung im Rahmen des Biotopschutzprogramms in der Kulturlandschaft Hamburgs – Berichtsperiode 1989 bis 2014*, Gutachten im Auftrag der Abteilung Naturschutz Hamburg. [Online] Available at: hamburg.de/resource/blob/172380/a046ef688166e623ecc54e6169ff7e64/download-wiesenvogel-gutachten-2015-data.pdf [Accessed 25 September 2025].

Mortice, Z. (2015), "The history of Chicago is buried under one of its least-known and most astonishing parks [Palmisano Park]", in *Landscape Architecture*, vol. 105, issue 11, pp. 150-163. [Online] Available at: dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6574216 [Accessed 25 September 2025].

Oke, C., Bekessy, S. A., Frantzeskaki, N., Bush, J., Fitzsimons, J. A., Garrard, G. E., Grenfell, M., Harrison, L., Hartigan, M., Callow, D. and Cotter, B. (2021), "Cities should respond to the biodiversity extinction crisis", in *npj | Urban Sustainability*, vol. 1, article 11, pp. 1-4. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s42949-020-00010-w [Accessed 25 September 2025].

Paudice, E. (2023), "White and blue. Water and travertine landscapes along the Aniene", in Garcia, P. R., Mottogno, B. and Cappuccitti, A. (eds), *Waterfront dialectics – Rome and its Region facing climate change impacts*, TAB Edizioni, Roma, pp. 213-223. [Online] Available at: iris.uniroma1.it/retrieve/389ec92e-aeea-4151-8d55-e85518e13c6a/Paudice_White%20and%20blue_2023.pdf [Accessed 25 September 2025].

Pentecost, A. (2005), *Travertine*, Springer, Dordrecht. [Online] Available at: doi.org/10.1007/1-4020-3606-X [Accessed 25 September 2025].

Pirina, C., Comi, G. and d'Abramo, V. (2024), "Per una transizione progettuale – Composizione e progetto del verde per la città contemporanea | For a design transition – Green composition and design for the contemporary city", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 124-137. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1592024 [Accessed 25 September 2025].

Pulvirenti, E., Cervoni, F., Giardini, M., Mei, M. and Cerretti, P. (2024), "Rediscovery of Paracoenia beckeri (Kuntze, 1897) in the Acque Albule Plain, Italy – Implications for conservation and ecosystem restoration", in *Proceedings of ECCB 2024 – 7th European Congress of Conservation Biology – Biodiversity positive by 2030 – 17-21 June 2024 – Bologna, Italy*, Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali Alma Mater Studiorum Universita di Bologna, p. 254. [Online] Available at: doi.org/10.13140/RG.2.2.17154.49609 [Accessed 25 September 2025].

Redondo-Vega, J. M., Santos-González, J., Melón-Nava, A., Gómez-Villar, A., Pena-Pérez, S. A. and González-Gutiérrez, R. B. (2024), "Pit Lakes in Abandoned Slate Quarries in Northwestern Spain – Characteristics and Potential Uses", in *Water*, vol. 16, issue 17, article 2403, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.3390/w16172403 [Accessed 25 September 2025].

Sharma, V. and Franks, D. M. (2013), "In Situ Adaptation to Climatic Change – Mineral Industry Responses to Extreme Flooding Events in Queensland, Australia", in *Society & Natural Resources | An International Journal*, vol. 26, issue 11, pp. 1252-1267. [Online] Available at: doi.org/10.1080/08941920.2013.797528 [Accessed 25 September 2025].

Talento, K., Amado, M. and Kullberg, J. C. (2020), "Quarries – From Abandoned to Renewed Places", in *Land*, vol. 9, issue 5, article 136, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/land9050136 [Accessed 25 September 2025].

Tope, G., Blessing, J. and Adebisi Heritage, S. (2023), "The Role of Water in Landscape Design – Influencing Place-making and Creating Meaningful Spaces", in *researchgate.net*, August 2023. [Online] Available at: researchgate.net/publication/385621651 [Accessed 25 September 2025].

Tortora, P. and Pentecost, A. (1989), "Bagni di Tivoli, Lazio – A modern travertine depositing site and its associated microorganism", in *Bollettino della Società Geologica Italiana*, vol. 108, fasc. 2, pp. 315-324. [Online] Available at: researchgate.net/publication/277476212_Bagni_di_Tivoli_Lazio_a_modern_travertine_depositing_site_and_its_associated_microorganism [Accessed 25 September 2025].

Vranayova, Z., Kaposztasova, D. and Lis, A. (2024), "Cognitive and Environmental Benefits of Blue-Green Infrastructure and Green Skills Training", in *Selected Scientific Papers | Journal of Civil Engineering*, vol. 19, issue 1, article 20240015, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.2478/sspjce-2024-0015 [Accessed 25 September 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 98-113
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1842025

Article Info

Received 20 September 2025
Revised 23 October 2025
Accepted 25 October 2025
Published 30 December 2025

FUTURI GALLEGGIANTI
Ripensare le relazioni tra acqua, energia e lavoro attraverso l'idrologia culturale

FLOATING FUTURES
Rethinking the relationships between water, energy, and labour through cultural hydrology

Matteo D'Ambros, Stefano Tornieri

Abstract

Nell'epoca delle grandi accelerazioni energetiche, climatiche e delle disuguaglianze globali, il Lago Loktak nello Stato di Manipur (India) rappresenta un caso emblematico per esplorare equilibri tra governance idrica e regimi energetici, tra pratiche produttive e abitative locali. Il contributo indaga come l'adattamento di pratiche tradizionali nei paesaggi d'acqua possa guidare configurazioni progettuali per la sostenibilità degli ecosistemi anfibi e propone il 'modello Loktak' come paradigma 'post-crescita'. L'unicità ecologica del Lago risiede nelle sue isole galleggianti di biomassa e in un'economia stagionale basata su pesca e agricoltura. Il caso è emblematico in quanto, nonostante siano state realizzate diverse infrastrutture imposte come la Diga di Ithai che hanno alterato i regimi naturali causando degrado ambientale, le comunità locali hanno risposto, in modo adattivo, rigenerando le isole galleggianti, le cosiddette Athapum Phumdi. Attraverso mappature multiscalari e letture socio-spaziali, il Lago emerge come paesaggio idro-culturale in cui la 'circolarità galleggiante' orienta infrastrutture ibride, acqua, energia e lavoro. In tale ottica il Loktak è visto come dispositivo regolativo naturale, capace di ispirare progetti in altri contesti anfibi e di orientare in chiave inedita una riflessione nel campo degli studi sul territorio.

In an era marked by rapid advances in energy, climate, and global inequality, Loktak Lake in the State of Manipur (India) exemplifies the delicate balance between water governance and energy systems, as well as between local productive and dwelling practices. This study explores how adapting traditional practices in water landscapes can guide design configurations of sustainable amphibious ecosystems, proposing the 'Loktak model' as a post-growth paradigm. The Lake's ecological uniqueness stems from its floating biomass islands and a seasonal economy rooted in fishing and agriculture. Despite the construction of imposed infrastructures such as the Ithai Dam – which disrupted natural regimes and caused environmental harm – local communities have responded with adaptive measures, notably in regenerating the floating islands known as Athapum Phumdi. Through multi-scalar mappings and socio-spatial analyses, the Lake is revealed as a hydro-cultural landscape where 'floating circularity' orchestrates hybrid infrastructures, water, energy, and labour. In this light, Loktak serves as a natural regulatory mechanism capable of inspiring projects in other amphibious settings and of guiding, in an unprecedented manner, a new approach within territorial studies.

Keywords

infrastrutture galleggianti, paesaggi umidi, paesaggi produttivi, economia circolare, post-crescita

floating infrastructures, wetland landscapes, productive landscapes, circular economy, post-growth



Matteo D'Ambros, Architect and PhD, is a Researcher at the University of Trieste (Italy). He studies and works in the field of urban planning and design, with a particular focus on environmental issues, landscape, and devices to improve the performance of open spaces, starting from the idea of public space maintenance. E-mail: matteo.dambros@units.it

Stefano Tornieri, Architect and PhD, is a Researcher in urban regeneration at Jade University of Applied Science in Oldenburg (Germany). He conducts research on productive landscapes in coastal and river areas. E-mail: stefano.tornieri@jade-hs.de

L'Antropocene, nella quale l'umanità influisce in maniera sempre più significativa sull'ecologia globale, è definita da McNeill ed Engelke (2016) l'era 'della grande accelerazione' di produzione e consumo, ma anche 'delle grandi disuguaglianze globali' (Burke, Hsiang and Miguel, 2015) e 'del tardo capitalismo' (Alami, Copley and Moraitis, 2024). In questo contesto assistiamo alle più grandi 'sparizioni' o 'perdite' degli ecosistemi naturali: interi paesaggi, biodiversità ed ecologie risultano profondamente alterati da monoculture, incendi, produzioni intensive e infrastrutture (Koolhaas, 2020; Weller, Hoch, Huang, 2017). Si pone quindi come prioritario un cambiamento radicale nel modo di pensare alle risorse e ai modi di agire attraverso l'uso di strumenti e materiali di progetto non solo negli spazi urbani, ai limiti della crescita economica (Meadows et alii, 1972) e all'interno di un auspicabile prospettiva di sviluppo globale 'post-crescita' (Jackson, 2021).

Dati i limiti del Pianeta e delle sue risorse il paradigma della post-crescita si focalizza sulla possibilità di soddisfare i bisogni fondamentali degli esseri viventi garantendo benessere usando risorse assai limitate (Kallis et alii, 2025; IPCC, 2023; Richardson et alii, 2023), garantendo una redistribuzione delle risorse più equa, senza dipendere direttamente da una crescita economica senza limiti, come puntualizzato dall'Agenda 2030 (UN, 2015) attraverso gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG). Tuttavia, mentre gli SDG cercano di bilanciare crescita economica e sostenibilità, la teoria post-crescita è scettica riguardo alla crescita economica come obiettivo in sé (Soper, 2020; Fioramonti, 2024).

Dal punto di vista del progetto del paesaggio e del progetto urbano gli studi che riflettono sul paradigma della post-crescita affrontano concetti di rigenerazione e redistribuzione delle risorse a disposizione (Bensús Talavera, 2024) con l'obiettivo di contenere l'espansione delle infrastrutture urbane e incentivare l'uso efficace degli spazi per attività non estrattive e comunitarie (Durrant, Lamker and Rydin, 2023) o attraverso azioni che mettano in valore i paesaggi rurali in un'ottica rinnovata (Spanier and Feola, 2022). Da questa prospettiva pare quindi utile approfondire casi studio utili alla comprensione della relazione tra morfologia e sistema produttivo che indichino una via del progetto innovativa, atipica o straordinaria nella sua unicità, al fine di individuare possibili modelli, sistemi relazionali o principi guida replicabili in contesti simili.

A riguardo emerge il caso studio del grande Lago Loktak, che si estende per 287 chilometri quadrati nello Stato del Manipur (India), la cui profondità varia tra 0,5 e 5 metri, con una altezza media delle sue acque di circa 2,7 metri (Figg. 1-3). Nella parte meridionale del Loktak si sviluppa una delle formazioni ecologiche più straordinarie di paesaggio lacustre: un'immensa area di suolo flottante nota come Keibul Lamjao, costituita da un processo plurisecolare di sedimentazione di isole galleggianti, le Phumdi. Una massa compatta di biomassa sospesa sulla superficie del Lago si estende per circa 40 chilometri quadrati, alimentata ciclicamente dall'accumulo di materiale organico e detriti vegetali che danno origine a un ambiente anfibio straordinariamente stabile, un esempio unico di Parco nazionale galleggiante: il Keibul Lamjao National Park.

La rilevanza del contributo risiede nel carattere inedito con cui il progetto è affrontato rispetto alla letteratura sul paesaggio e sulla pianificazione territoriale. Finora infatti il caso studio del Lago Loktak non è stato oggetto di analisi approfondite dal punto di vista ecosistemico e paesaggistico, ma prevalentemente trattato entro prospettive riconducibili alle scienze sociali, all'ingegneria idraulica o all'economia. Manca quindi una riflessione articolata sulle implicazioni legate al progetto dell'architettura del paesaggio e della pianificazione territoriale che il presente contributo intende avviare.

In tale ottica il testo si articola con una struttura metodologica e narrativa finalizzata a intrecciare riflessione teorica, analisi critica e sperimentazione progettuale, a partire dal quadro di riferimento relativo alle sfide contemporanee (con particolare attenzione ai paradigmi teorici del post-crescita e alla necessità di ripensare i modelli insediativi e produttivi in una prospettiva ecologica e sistemica) e attraverso una revisione della letteratura scientifica sul caso studio del Lago Loktak, utile a restituire una mappatura dello stato dell'arte e a individuare i principali ambiti di approfondimento ancora inesplorati (Dessì, 2023).

La trattazione del caso studio si articola in cinque sezioni integrate che compongono un racconto coerente del paesaggio lacustre, interpretato attraverso elementi singolari considerati materiali costitutivi di un progetto implicito, ricco di potenzialità estetiche e funzionali.

La prima sezione affronta il tema della stabilità ambientale come condizione necessaria alla durabilità del sistema di paesaggio, illustrandone la struttura ecosistemica, la geografia e le principali caratteristiche morfologiche. Segue una sezione dedicata alla ricognizione critica della letteratura scientifica che evidenzia la lacuna del dibattito disciplinare sul caso studio e la conseguente originalità del presente contributo. I risultati vengono poi articolati in due nuclei tematici: il primo interpreta il Loktak come possibile modello progettuale replicabile e ne valuta la coerenza rispetto agli SDG; il secondo propone una lettura spaziale e culturale del paesaggio come esito di una complessa stratificazione di fattori sociali, funzionali e gestionali. Le conclusioni tracciano infine un bilancio critico, mettendo in luce limiti, aperture e potenzialità evolutive del cosiddetto 'modello Loktak'.

L'obiettivo del contributo è l'individuazione dei principi costitutivi di un possibile 'modello Loktak', inteso come dispositivo territoriale e culturale capace di informare, in senso esteso, la pratica progettuale dell'architettura del paesaggio e della pianificazione del territorio. L'ipotesi di fondo è che i saperi ecologici, sociali e spaziali sedimentati intorno al Lago possano costituire una base operativa per l'individuazione e la declinazione di strategie replicabili o adattabili ad altri contesti anfibi particolarmente vulnerabili o di margine con alto valore paesaggistico e territoriale, in risposta alle sfide ambientali e insediative nell'epoca dell'Antropocene.

Equilibri fragili dell'ecosistema lacustre del Loktak | Ogni ecosistema è esposto a rischi di diversa natura che sono riconducibili tanto ad azioni antropiche quanto a processi di cambiamento climatico. La stabilità dell'equilibrio ambientale si mantiene in maniera più o meno durevole quando adattamento e resilienza diventano componenti strutturali dell'evoluzione di un habitat; in questo quadro anche l'azione antropica può assumere un carattere di sostenibilità qualora sia in grado di orientare le trasformazioni ambientali verso una riduzione delle esternalità negative e degli impatti irreversibili.

La discussione proposta in queste pagine si interroga su questioni fondamentali che riguardano differenti scale del territorio e che presentano forti implicazioni per le discipline del progetto, con particolare riferimento alla costruzione dell'architettura del paesaggio e della pianificazione territoriale. Una prima considerazione muove dalla forma del territorio e conduce al riconoscimento del valore prestazionale delle azioni che lo trasformano, è quindi utile chiedersi in che misura la configurazione e la morfologia di un territorio incidono sulla qualità ecosistemica, sull'abitare e sulla dimensione produttiva dei luoghi (Steiner, 2011; Musacchio, 2009).

In parallelo risulta altrettanto significativo riflettere sulla coesistenza di paesaggi antropizzati e ambienti naturali e sulla capacità del progetto di tradursi in azione di trasformazione sostenibile orientata alla costruzione consapevole di nuovi paesaggi (Ahern, 2013; Waldheim, 2016). Ne deriva una domanda cruciale: quale convivenza tra specie può essere generata dalla messa a sistema di strumenti, elementi e materiali del progetto in una configurazione virtuosa e integrata? Tale prospettiva implica lo sviluppo di economie circolari a basso impatto, in grado di costruire ambienti di convivenza fondati su un adattamento sistemico e collaborativo tra le diverse componenti ambientali (Shannon et alii, 2008; Costanza et alii, 2017).

Il caso studio del Lago Loktak rappresenta in tal senso un esempio paradigmatico: esso offre spunti di riflessione sulle possibilità e sui limiti della convivenza in un contesto ecologicamente fragile, nel quale la sinergia tra specificità morfologica del luogo, soluzioni paesaggistiche e problematiche ambientali di portata regionale dà origine a un paesaggio che assume le caratteristiche di sistema dalle componenti tecniche e socio-culturali con alto valore ecologico e ambientale.

Il Lago Loktak è una zona umida, del tipo pianura alluvionale, del fiume Manipur, soggetta a escursioni del livello medio dell'invaso provocate da inondazioni cicliche. La prossimità del Lago al promontorio della municipalità di Sugnu garantisce il flusso diretto di importanti quantità d'acqua, accresciuta stagionalmente dall'apporto dei corsi d'acqua vicini, tra cui in particolare il fiume Chapki che è solito allagare stagionalmente vaste aree della provincia.

Il bacino idrografico e lacustre del Lago Loktak presenta una topografia di superficie singolare, in quanto è il risultato di numerosi laghi minori, che nella lingua locale sono chiamati Pats. Durante la stagione monsonica l'aumento del livello idrometrico complessivo del Lago restituisce un'unica estesa superficie d'acqua che senza soluzione di continuità connette i Pats. In passato il Lago è stato soggetto a forti oscillazioni in negativo del livello idrico nell'arco dell'anno, per cui i Pats apparivano come entità separate nella fase di bassa marea e si unificavano durante le piene.

La costruzione della Diga di Ithai nel 1983 ha modificato la natura dell'ecosistema riducendo le oscillazioni del livello idrico, facendo proliferare le quantità di biomassa prodotta dalle acque del bacino e dall'apporto dei fiumi circostanti, mettendo in pericolo questa logica resiliente attraverso la stabilizzazione artificiale del livello del Lago e impedendo le naturali escursioni idriche. Ne sono derivate gravi modifiche degli equilibri ecosistemici consolidati tra cui l'assottigliamento delle Athaphum Phumdi, la disgregazione del suolo organico e la compromissione delle pratiche locali di pesca e agricoltura

(Irom et alii, 2025). La gestione idrica si configura quindi come una questione progettuale cruciale, in cui è necessario rinegoziare l'equilibrio tra produzione energetica, tutela ambientale e continuità culturale.

La caratteristica più distintiva del Lago Loktak è la presenza di isole flottanti chiamate Phumdis, che presentano uno spessore medio di circa 2,5 metri, la maggior parte delle quali ricorda i giardini galleggianti del lago Dal in Kashmir o le Chinampas del Messico (Fig. 4). Prevalentemente sommerse e con solo una piccola parte sopra il livello dell'acqua le isole incrementano la loro superficie espandendosi da 0,1 a 2 metri nell'arco di 6 mesi; sono masse eterogenee composte da terra, vegetazione e materiale organico in diversi stadi di decomposizione, utilizzate come risorse dalle comunità locali per la coltivazione di ortaggi, piante alimentari, foraggio, combustibile, materiali per tetti e recinzioni, erbe medicinali e altri prodotti di uso quotidiano.

In particolare l'alto livello di fertilità del suolo galleggiante facilita la coltivazione di riso e ortaggi la cui crescita beneficia del materiale estremamente fertile presente sui fondali del Lago. La sua ricchezza organolettica è strettamente connessa alla dinamica idrica di marea del Lago che dipende da allagamenti e inondazioni fluviali: durante l'abbassamento del livello medio delle acque del Lago ciò che è in superficie scende progressivamente verso i fondali; così avviene che le Phumdi sprofondano e rimangono completamente immerse in poche decine di centimetri d'acqua. In questo periodo ogni anno esse entrano in contatto con il fondale ricco di materiale organico che ne arricchisce il grado di fertilità, poi amplificato da processi naturali aerobici quando le Phumdi tornano a galleggiare non appena il livello del Lago ritorna a regimi idrici di normalità (Fig. 5).

Di fondamentale importanza è il fatto che il Lago costituisce la principale fonte della produzione ittica dello Stato del Manipur; a rendere singolare e di assoluto rilievo la tecnica tradizionale di pesca, nota come 'athaphum', è la sua relazione con il Lago, dove vengono modellate ad hoc porzioni di Phumdi in forma di recinti galleggianti disposti in cerchio. Le Athapum Phumdi vengono realizzate intrecciando strisce di Phumdi fino a formare delle spesse corone di materiale organico galleggiante, dove vengono inserite piante acquatiche come la 'Echinochloa stagnina' e il 'Capillipedium sp.' per attirare i pesci (Figg. 6-9). Questa pratica, sviluppatasi nel corso dei secoli, prevede una fase di raccolta detta 'phum namba', che può avvenire a intervalli variabili, da ogni quindici giorni fino a tre mesi: si tratta di un sistema di pesca che non solo integra saperi ecologici locali, ma riflette anche una forma di adattamento sostenibile e ciclico al contesto fluviale e lacustre.

Il Lago Loktak e la letteratura scientifica | La revisione della letteratura scientifica evidenzia come il Lago Loktak sia stato finora oggetto di studio prevalentemente attraverso approcci legati alla progettazione ambientale, con l'ausilio di tecniche di mappatura dell'uso del suolo e della copertura del territorio. Gli effetti negativi derivanti dalla costruzione della Diga sulla sostenibilità complessiva del bacino lacustre sono stati quantificati e verificati in studi recenti (Singh, 2017; Ngasepam et alii, 2025; Singh and Singh, 2023; Paonam and Chatterjee, 2023), mentre la biodiversità del Lago e la correlata rilevanza della presenza umana nei processi di monitoraggio ambientale sono state oggetto di indagini di carattere socio-ecologico (Laishram, 2021). Le trasformazioni in atto nelle attività produttive tradizionalmente associate al Lago, in particolare l'agricoltura e l'acquacoltura (Figg. 11-15), sono state studiate in relazione alle problematiche di gestione e alla documentata carenza di un adeguato impegno da parte delle Autorità governative per la conservazione e tutela dell'ecosistema locale (Devi, 2022).

Altri studi si sono concentrati sull'equilibrio tra gli usi idrici a fini idroelettrici e quelli agricoli, dimostrando che, attraverso una regolazione accurata del livello delle acque, è possibile garantire una coesistenza sostenibile tra produzione energetica e pratiche agricole locali (Singh et alii, 2011). Nel campo delle scienze sociali diversi studi evidenziano il potenziale pedagogico insito nel sistema ecologico del Lago Loktak e nella sua ricca varietà ecosistemica, sottolineando da un lato l'urgenza di strategie di conservazione, dall'altro la possibilità di costruire un modello educativo e territoriale replicabile (Devi, Satapathy and Kumar, 2024).

Dal punto di vista della pianificazione territoriale, l'analisi degli stakeholder e delle azioni necessarie per promuovere uno sviluppo sostenibile del bacino lacustre è stata affrontata da Devarani e Basu (2019), i quali propongono l'identificazione di un 'modello Loktak' potenzialmente trasferibile ad altri contesti di zone umide, lagunari o deltizi, caratterizzati da dinamiche socio-ecologiche analoghe.

Tuttavia si rileva una significativa carenza di studi riconducibili alle discipline del progetto, quali l'Architettura del Paesaggio, l'Urbanistica e la Pianificazione territoriale. Nonostante il Lago Loktak sia stato riconosciuto come Patrimonio naturale di rilevanza nazionale – è sito RAMSAR dal 1990 e l'area del Keibul Lamjao Floating National Park è istituita dal 1977 – risultano assenti iniziative sistematiche volte ad analizzare le potenzialità rigenerative delle isole galleggianti che lo caratterizzano in modo singolare.

Le isole infatti non soltanto svolgono un ruolo cruciale nella costruzione di forti legami identitari e nel mantenimento della produttività agricola locale, ma manifestano anche elevate capacità adattive rispetto a pressioni ambientali improvvise o non pianificate. Inoltre l'articolato sistema anfibio delle Athapum Phumdi contribuisce alla definizione di un'immagine paesaggistica unica, dotata di un'elevata valenza estetica e simbolica, le cui potenzialità ecosistemiche rimangono ancora largamente inesplorate nelle attuali politiche e narrazioni per la sua salvaguardia e sviluppo.

La chiave di lettura del Lago Loktak | È utile chiarire fin da subito la scelta di escludere dalla trattazione un livello di approfondimento riferito al piano delle pratiche quotidiane e della relazione affettiva degli attori locali con il paesaggio, possibile da svolgere solo mediante interviste dirette alle comunità residenti. Questa omissione è attualmente uno dei limiti della riflessione sviluppata in questo scritto e risiede nella mancanza di una verifica diretta sul campo, che di certo potrebbe rafforzare l'analisi attraverso l'osservazione partecipata e la raccolta di dati primari.

Si ritiene tuttavia che tale estensione metodologica implicherebbe uno spostamento del focus su un ambito specifico proprio degli studi antropologici e socio-culturali, mutando gli obiettivi in questa fase di discussione critica coerentemente orientata alla costruzione di una lettura spaziale e progettuale del caso studio. L'assenza di reperimento di dati sul campo è stata compensata dal confronto critico del caso studio con contesti ambientali similari – discussi in seguito – e da riflessioni rintracciate nella letteratura scientifica specifica di genere (Meitei and Prasad, 2015; Kumar, 2024).

Nella lettura del caso studio del Lago Loktak l'approccio adottato è ancorato a una dimensione strategica e teorica, finalizzata all'individuazione degli elementi di base che compongono il sistema di relazioni di un inedito paesaggio agrourbano abitabile. I dispositivi spaziali che lo caratterizzano sono potenzialmente declinabili e trasferibili ad altri contesti anfibi particolarmente vulnerabili o di margine con alto valore paesaggistico. Questioni e informazioni finora elaborate in questo contributo si fondano esclusivamente su una rilettura critica della letteratura scientifica e su un accurato lavoro di ridisegno interpretativo di porzioni significative del paesaggio lacustre di Loktak.

Le considerazioni originali che ne emergono mettono in evidenza l'esemplarità del caso studio, riconducibile a un modello dotato di caratteristiche specifiche, enumerabili come materiali elementari potenzialmente replicabili e costitutivi di futuri progetti. Nella letteratura su Loktak, per esempio, vi sono studi che descrivono il ruolo essenziale delle Athapum Phumdi nei processi ecologici, economici e sociali, anche come spazi di coltivazione stagionale per la pesca, fondazioni galleggianti per abitazioni e suolo per l'agricoltura (Singh et alii, 2024). Altri articoli esaminano la compostabilità dei Phumdi, la loro biomassa come risorsa e le implicazioni per la gestione ecosistemica (Singh and Kalam-

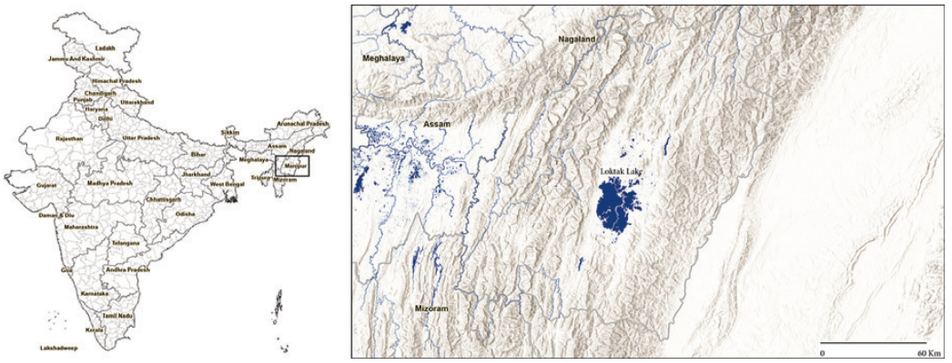
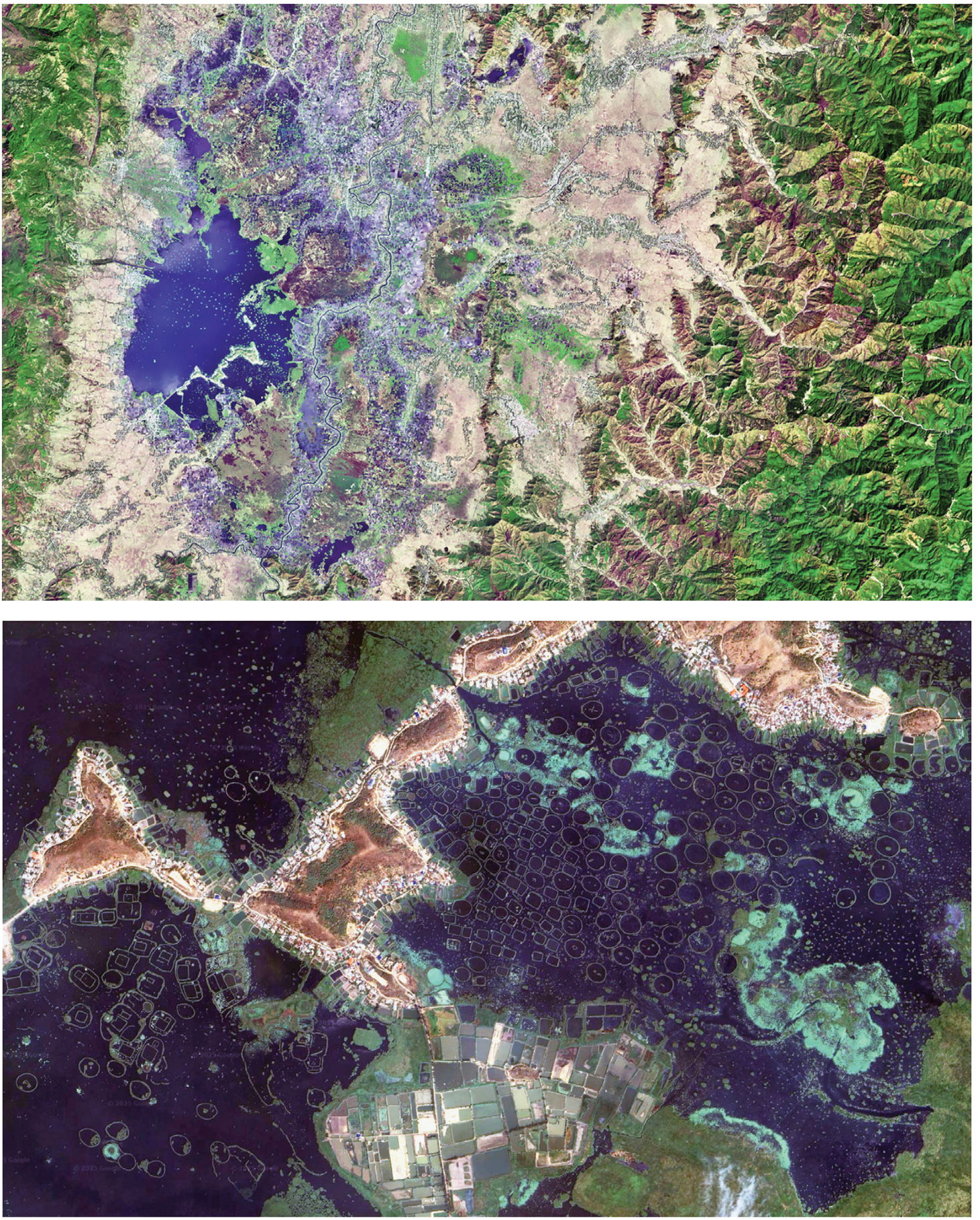


Fig. 1 | Territorial framework (credit: S. Tornieri, 2025).



Figg. 2, 3 | Loktak Lake (credits: Google Maps, 2025).



Fig. 4 | The Mexican Chinampas (credit: J. P. Espinosa, 2021).

dhad, 2014; Khoiyangbam, 2021). La capacità intrinseca di questo paesaggio è quella di conciliare bisogni produttivi, abitativi e ambientali, frutto di un sapere tecnico derivante da un'esperienza popolare accumulata nel tempo da varie generazioni (Meitei and Prasad, 2015).

Simili a piccoli atolli, a livello planimetrico, le Athaphum Phumdi, intese come materiale elementare di base del paesaggio lacustre, si presentano come dei perimetri galleggianti su cui le comunità indigene hanno costruito strutture leggere funzionali alla pesca e all'agricoltura stagionale (Figg. 10, 11). Esse operano come paesaggi adattivi che rispondono alle oscillazioni idriche stagionali, sfruttando la ciclicità delle piogge monsoniche e l'accumulo di sostanza organica come risorsa fertilizzante. Questo approccio integra i principi della circolarità dell'acqua, rigenerando il suolo attraverso processi naturali e offrendo un'alternativa concreta ai sistemi irrigui intensivi e ai modelli agricoli ad alto consumo idrico (Singh et alii, 2024).

Il consolidamento del suolo delle Athaphum Phumdi avviene progressivamente: lunghe canne disposte in modo regolare formano leggere barriere che intrappolano e filtrano il materiale organico semisolido presente in sospensione o depositato sul fondo del Lago (Singh and Kalamdhad, 2014). In questo modo il lavoro manuale di assemblamento e compattazione avviene su una maglia strutturale minimale disposta a rettangoli o forme circolari della superficie di circa 1,5 ha, con lato o diametro in un range compreso tra 100 e 150 metri (Devi, Satapathy and Kumar, 2022). Il costante lavoro manutentivo avviene accumulando strati di sostanza organica che contribuiscono alla stabilizzazione e all'ispessimento progressivo della massa galleggiante (Figg. 12, 13).

Il 'modello Loktak' e gli SDG | All'interno di un dibattito internazionale sul progetto dei territori d'acqua, se si considera la dimensione anfibia come inevitabile orizzonte futuro delineato per l'abitabilità di vasti territori lacustri, costieri e deltizi in conseguenza dei cambiamenti climatici in atto, il 'modello Loktak' costituisce una dimensione ancora scarsamente esplorata dalle discipline dell'Architettura del paesaggio e della Pianificazione territoriale. Le caratteristiche ambientali e paesaggistiche del Lago costituiscono un laboratorio avanzato di coesistenza tra sistemi umani e naturali, anticipando o confermando molte delle strategie promosse dall'Agenda 2030; in particolare, in relazione all'obiettivo SDG 6 (acqua pulita e servizi igienico-sanitari), che riconosce l'acqua come bene primario e diritto universale, il 'modello Loktak' offre un contributo significativo allo studio e alla ridefinizione delle pratiche di gestione idrica in chiave ecologica e sistemica, nonché alla valorizzazione delle zone umide per la progettazione di sistemi adattivi nella gestione delle acque (Kumar, 2024).

Il ridisegno e la comprensione del funzionamento delle Athaphum Phumdi – isole galleggianti composte da biomassa organica – rendono visibile una modalità alternativa di abitare il paesaggio dell'acqua, superando la rigida dicotomia tra naturale e artificiale. Questi dispositivi sono in parte generati autonomamente – poiché si autoproducono grazie all'alternarsi delle maree stagionali – e in parte modellati dall'intervento umano (Meitei and Prasad, 2015). Essi definiscono in modo strutturale il paesaggio, configurandosi come una forma inedita di infrastruttura ecologica capace di filtrare e rendere naturalmente pulita l'acqua, mantenendo alta la produttività del Lago.

Queste caratteristiche portano a riconoscere il 'modello Loktak' come modello teorico-operativo che potremmo definire come 'circolarità galleggiante' in dialogo con l'obiettivo SDG 6. In un'interpretazione del paesaggio quale sistema integrato e poroso, esso diviene capace di articolare bisogni ambientali, sociali e produttivi dove processi come osmosi, ibridazione e simbiosi possono generare condizioni spaziali per accogliere nuove alleanze tra umani e non umani (Rizzi, 2025).

L'economia rurale del Lago Loktak, strettamente connessa al sistema delle Phumdis, si fonda in larga misura sulla pesca, che soddisfa circa il 60% del fabbisogno ittico dello Stato di Manipur e costituisce una risorsa vitale per oltre 50.000 pescatori e le loro famiglie. Considerato che le pratiche di sostentamento della popolazione indigena concorrono di fatto alla costruzione del paesaggio del Lago, quale modello di infrastruttura ecologica capace di rigenerare ciclicamente suolo e risorse idriche, la valorizzazione sostenibile delle sue potenzialità si configura come un fondamentale laboratorio avanzato per coniugare tutela ambientale e sviluppo economico locale e come alternativa concreta ai modelli irrigui intensivi.

In questo senso le iniziative di gestione comunitaria delle risorse ittiche, i programmi di acquacoltura integrata e gli strumenti di governance partecipativa risultano cruciali per rafforzare la resilienza dei pescatori, diversificare le opportunità di reddito e garantire un uso equo delle risorse, come indicato dall'SDG 8 dell'Agenda 2030, che mira a promuovere una crescita economica inclusiva e sostenibile, unitamente a un'occupazione piena e dignitosa.

Complessivamente la lettura del caso Loktak attraverso la lente degli SDG ne evidenzia al tempo stesso potenzialità e limiti; in primo luogo il sistema garantisce che le comunità locali non cadano in condizioni di povertà estrema (SDG 1), assicurando una produzione costante e diversificata di alimenti – tra pesca e coltivazioni orticole – che contribuisce alla sicurezza alimentare e alla salute pubblica (SDG 2 e 3). Si tratta di un modello che consolida la resilienza delle comunità, pur senza introdurre forme più complesse di attività economiche e infrastrutturali, come richiesto dagli SDG 8 e 9, in cui innovazione, industrializzazione sostenibile e infrastrutture giocano un ruolo centrale. In questo senso la natura estensiva delle pratiche produttive appare come un punto critico: se da un lato garantisce equilibrio ecologico e continuità culturale, dall'altro non favorisce l'avvio di imprese diversificate o la crescita industriale su scala più ampia.

Il 'modello Loktak' si dimostra coerente con la sostenibilità urbana (SDG 11), in particolare con i target relativi all'accesso ad aree verdi e alla gestione dei rifiuti. Qui lo scarto organico e i residui delle attività non sono trattati come rifiuti, ma sono rein-

tegrati nel paesaggio stesso, divenendo nutrienti e suolo, in un ciclo di rigenerazione naturale che richiama pratiche di economia circolare (Ingaramo et alii, 2023). Letto in chiave 'post-crescita' questo modello evidenzia come il radicamento in un paesaggio tradizionale possa interpretare in maniera alternativa le istanze degli SDG 13, 14 e 15: le azioni per il clima, la vita sott'acqua e la vita sulla terra non vengono attuate attraverso strategie mirate o tecnologie complesse, ma emergono dal mantenimento di un equilibrio dinamico tra uomo e natura, scandito dai ritmi del paesaggio stesso.

Il punto di maggiore contraddizione si manifesta con la costruzione della Diga Ithai, che ha compromesso l'ecosistema delle Phumdi, dimostrando l'antitesi tra un'idea di progresso legata alla crescita economica – caratterizzata da infrastrutture ad alto impatto – e una visione di sviluppo più radicata nelle pratiche ecologiche locali. Il compromesso più significativo si ritrova dunque nella gestione idrica del Lago: la produzione di energia idroelettrica da un lato risponde all'SDG 7 (target 7.b), migliorando l'accesso e l'efficienza energetica della regione, dall'altro mette in crisi la capacità adattiva del paesaggio, indebolendo i processi ecologici che garantivano la resilienza tradizionale del sistema Loktak.

Scale e strategie del paesaggio | Il caso del Lago Loktak consente di individuare una serie di elementi strategici e progettuali utili alla definizione di un modello teorico-applicativo: una griglia concettuale e operativa che, pur tenendo conto delle specificità ambientali dei diversi contesti, può contribuire alla configurazione di una morfologia insediativa adattiva in territori anfibi – quali lagune, laghi e delta fluviali o territori di bonifica (Brisotto et alii, 2023).

È possibile individuare quindi tre scale ideali – quella del territorio, quella del sostentamento e quella di specie (non soltanto antropica) – che concorrono alla definizione di un sistema, il cosiddetto 'modello Loktak', fondato sull'equilibrio tra il carattere di sostenibilità ambientale e il carattere di riproducibilità incrementale di materiali base elementari costitutivi del paesaggio.

La dimensione territoriale del Lago corrisponde all'idea di 'sistema ambientale elementare': la sua estensione potrebbe essere idealmente infinita poiché definita da un numero estremamente limitato di materiali, altrettanto elementari quali l'acqua, il suolo umido, la vegetazione e le abitazioni (Morpurgo, 2024). La dimensione economico-produt-

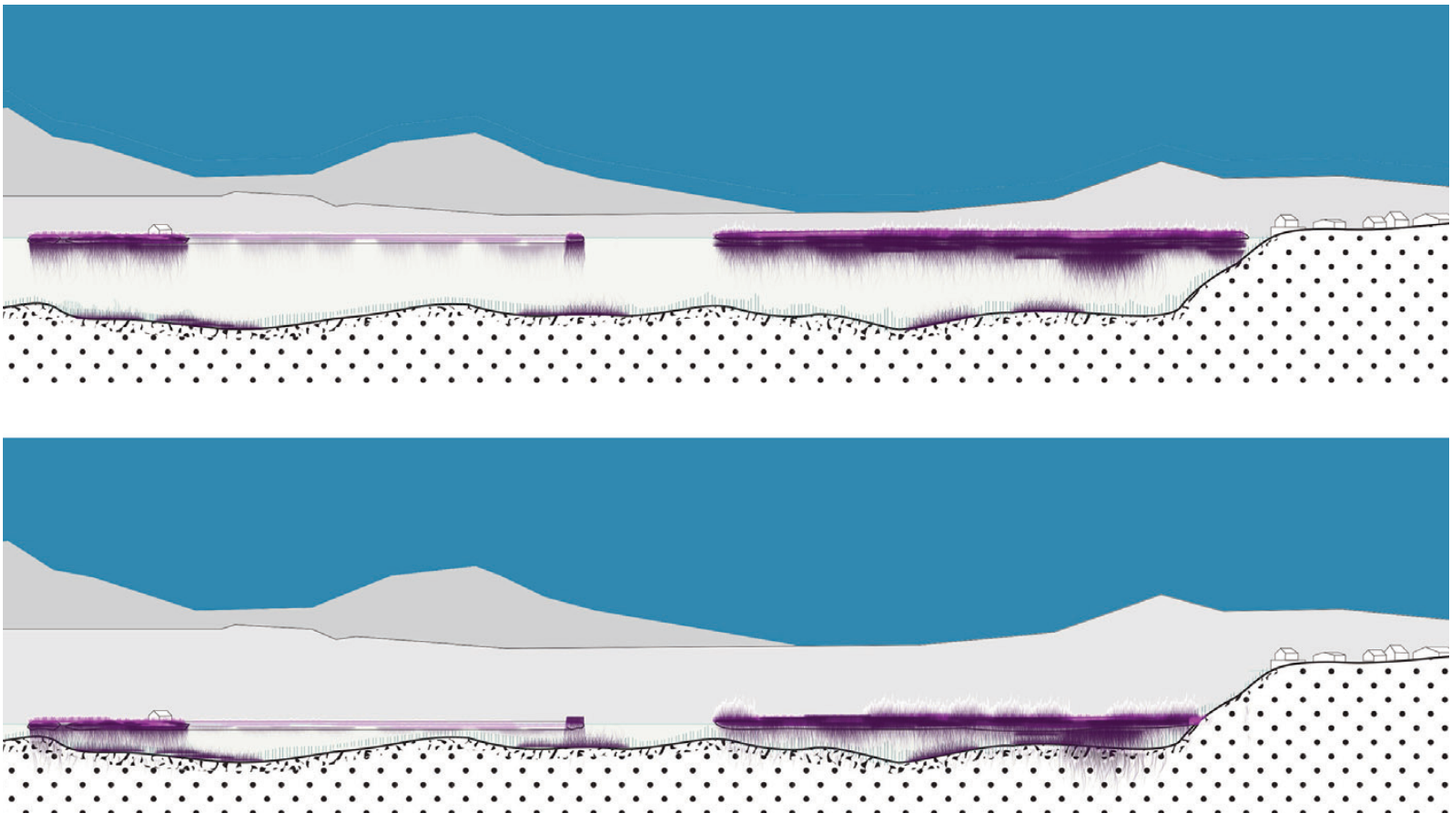


Fig. 5 | Sample section of Loktak Lake (credit: S. Tornieri, 2025).

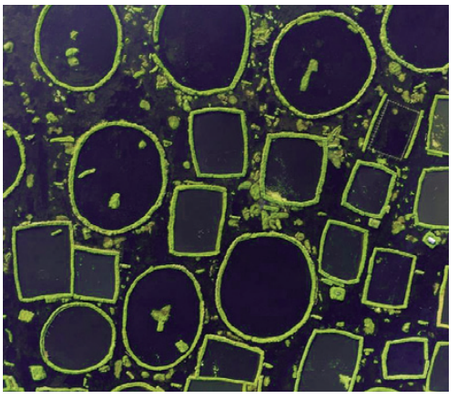


Fig. 6 | The Athapum Phumdi geometry (credit: A. Selvan, 2023).



Fig. 7 | The formations of the Athapum Phumdi (credit: K. Conniff, 2023).



Fig. 8 | Landscape integration (credit: India Travel Tourism, 2023).

tiva (agricola), a sua volta, si identifica in un altro materiale base caratterizzato da elementarità: le Athaphum Phumdi che presentano dimensioni e forme molto simili, una costruzione dipendente dalla ciclicità stagionale e logiche di replicabilità radicate in un sapere tradizionale (Khoiyangbam, 2021). Infine la dimensione dell'abitare e del manutenere il paesaggio ha a che fare con l'idea di prossimità (Dessì, 2023) ed è riferibile alla scala del corpo umano: la riproducibilità del paesaggio è individuata da una 'giusta distanza' tra la dimensione antropica dell'abitare e l'ambiente naturale (Fig. 14).

Conclusioni | Il presente saggio si colloca all'interno di un più ampio quadro di ricerca orientato verso approcci post-crescita e basati sulla natura, fornendo una lettura critica per operare in contesti vulnerabili e in trasformazione (Vacanti and Leonardi, 2024). Nel contesto della crisi climatica globale, che minaccia l'equilibrio delle zone costiere e degli ecosistemi intertidali, emerge con forza la questione del futuro degli spazi di transizione. Il caso Loktak dimostra che la forma del territorio è il risultato di sedimentazioni lente e adattamenti continui e che grazie a una costruzione consapevolmente sostenibile del paesaggio è possibile rispondere con efficacia alle trasformazioni ambientali che all'apparenza possono risultare sfavorevoli e negative alla dimensione antropica. In tale prospettiva il progetto non si configura come imposizione formale, ma come strumento di conoscenza in grado di sistematizzare gradi diversi di azione: lettura, manutenzione e mediazione tra processi ecologici e istanze umane (Figg. 15-18).

Uno degli elementi più significativi che strutturano questo territorio-paesaggio si confronta con l'impiego dei materiali organici come risorsa progettuale: nei contesti intertidali risorse come canneti, detriti lignei, terreni spugnosi ed esoscheletri molluschi rappresentano materiali disponibili e rigenerabili. In altri contesti assimilabili a quello del caso studio del Lago Loktak, possiamo trovare alcune esperienze significative.

Il progetto Life Vimine (2013-2017), nella Laguna di Venezia dimostra l'efficacia di interventi a basso impatto, basati sull'impiego di fascinate, pennelli e barriere frangionda biodegradabili, nonché sul riutilizzo di sedimenti locali per la ricostruzione morfologica delle barene erose. Analogamente, il progetto Ecological Citizens (2018) di SCAPE Studio reintegra materiali espositivi per attivare processi di re-



Fig. 9 | The Phumdi (credit: K. Conniff, 2023).



Fig. 10 | The landscape of Loktak Lake (credit: India Travel Tourism, 2023).

Next page

Fig. 11 | Phumdi and Athapum Phumdi in an aerial view (credit: Google Maps, 2025).

stauro ecologico e creare spazi fisici per il coinvolgimento civico nella laguna veneziana.

Il fondale come risorsa è un ulteriore principio emerso dal 'modello Loktak'. Il substrato lacustre non è un'entità passiva, ma costituisce un doppio suolo vivo e attivo, capace di alimentare la vita in superficie. Le recenti applicazioni delle coltivazioni multitrofiche integrate offshore (Buck et alii, 2018; Chopin et alii, 2008) mostrano come gli scarti organici derivati dalla produzione ittica possano essere riutilizzati nei livelli inferiori della colonna d'acqua per sostenere la crescita di biomassa algale. Sistemi simili, ridotti di scala, possono essere applicati in ambito rurale come dispositivi di bio-mitigazione (Zhang et alii, 2019), suggerendo una logica di simbiosi interspecie e di ciclicità della materia. Un caso simile che in qualche modo ne verifica la possibilità realizzativa è il sistema agricolo galleggiante del Lago Inle in Birmania (Watson, 2025; Figg. 19, 20).

La riflessione fin qui condotta conferma con chiarezza la centralità della manutenzione come fase imprescindibile del processo rigenerativo, intesa non come conservazione statica, ma come azione progettuale in grado di sostenere una convivenza tra modelli di sviluppo e ambienti fragili. L'obiettivo non è rendere il territorio 'sostenibile a tutti i costi', piuttosto ridurre gli impatti legati al consumo del territorio, attraverso regole e forme di governance capaci di anticipare le soglie di degrado e irreversibilità ambientale. Le isole galleggianti Athapum Phumdi del Loktak diventano una forma di resistenza spaziale ai modelli estrattivi: in esse il progetto assume una funzione di cura che utilizza la manutenzione come azione di rigenerazione sistemica del territorio.

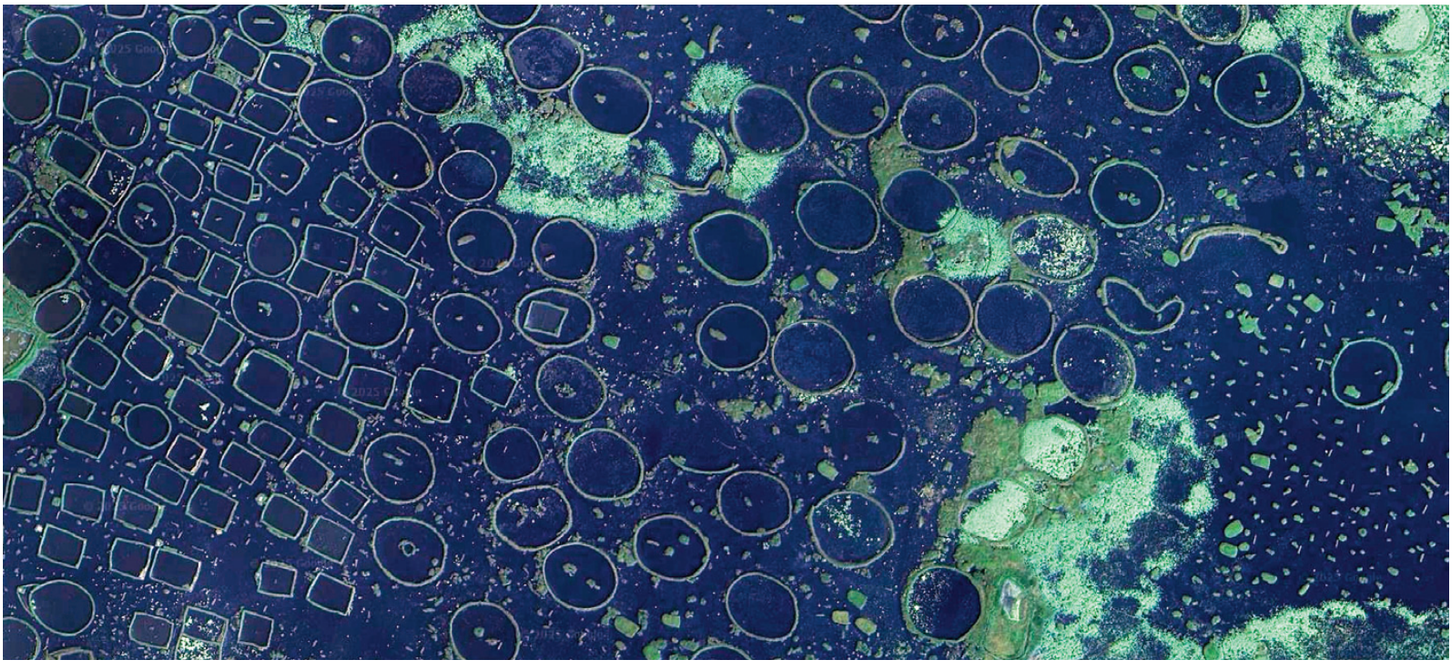
Uno dei fattori che dichiara la potenzialità è la replicabilità delle Athapum Phumdi, corrispondente a un'elevata economicità di risorse e tempi brevi di realizzazione. La reperibilità in loco dei materiali per la costruzione e la manutenzione delle isole assicura una gestione di filiera corta, facile da controllare nei suoi aspetti prestazionali per il raggiungimento di un più elevato grado di efficienza. Le condizioni alla base per consentire un'efficace replicabilità di questo paesaggio partono dall'individuazione di superfici lacustri o salmastre, estese, accompagnate da un'alta reperibilità dei materiali organici da costruzione, come canneti o alghe e radici, ma anche torba, giunchi, paglia, fibre naturali, residui di piante acquatiche sommerse e sedimenti organici. In molti ambienti lacustri questi materiali si possono combinare con elementi minerali locali come limo, sabbia, ghiaia fine e argille, che contribuirebbero alla coesione e alla stabilità di eventuali piattaforme e strutture galleggianti o semisommerse. Accanto a tali risorse la presenza di biomasse spontanee o coltivate quali bambù, legname leggero o fibre intrecciate rappresenta un ulteriore potenziale costruttivo, in grado di integrare sistemi strutturali ad alta adattabilità.

Inoltre osservando la dimensione delle isole si notano misure e grandezze ricorrenti che testimoniano con molta probabilità una scala limite delle singole Athapum Phumdi, deducibile sia dalla quantità di manodopera impiegata per la loro costruzione, sia da necessità e funzionalità produttive dipendenti da un'economia di tipo famigliare e locale. In questo senso si può riconoscere un'idea implicita di progetto che nasce da esigenze pratiche più che da intenzioni formali, dove il superamento dei 'limiti naturali' della produzione non avviene attraverso l'imposizione tecnica, ma mediante principi collaborativi della comunità. Questi processi si configurano come risposte adattive a vincoli ambientali e climatici, quali i cicli stagionali dei monsoni, e a condizionamenti antropici, come quelli derivanti dalla Diga di Ithai.

L'esportabilità del 'modello Loktak' ha forti potenzialità di applicabilità in altri contesti geografici, tuttavia nel contesto internazionale, e in particolare in quello europeo e italiano, le condizioni socioeconomiche e normative richiederebbero alcuni adattamenti per rendere il modello applicabile. Le forme di collaborazione già esistenti tra Istituzioni e attori locali, come i contratti di fiume o di area umida, rappresentano piattaforme adeguate ad accogliere e valorizzare il potenziale esemplare del caso studio. Ciò che ostacola maggiormente tali processi è però l'eccessiva complessità burocratica e normativa, che tende a rallentare non tanto la costruzione fisica del paesaggio, quanto la definizione condivisa della sua gestione. In questo senso il 'modello Loktak' può essere letto come una sintesi di processo, in cui la bellezza del paesaggio emerge come esito e valore fondante, in linea con i principi della Convenzione Europea del Paesaggio (Council of Europe, 2000), che riconosce il paesaggio stesso come Patrimonio culturale.

The Anthropocene, in which humanity exerts an increasingly profound influence on the global ecology, is defined by McNeill and Engelke (2016) as the era of the 'Great Acceleration' of production and consumption, but also as one of 'great global inequalities' (Burke, Hsiang and Miguel, 2015) and of 'late capitalism' (Alami, Copley and Moraitis, 2024). Within this context, we are witnessing the most extensive 'disappearances' or 'losses' of natural ecosystems: entire landscapes, forms of biodiversity, and ecological systems have been profoundly transformed by monocultures, wildfires, intensive production and infrastructure development (Koolhaas, 2020; Weller, Hoch, Huang, 2017). It thus becomes imperative to initiate a radical shift in the way we conceive of resources and act upon them – through the use of design tools and materials – not only within urban spaces, but also at the very limits of economic growth (Meadows et alii, 1972) and within a desired global perspective of 'post-growth' development (Jackson, 2021).

Given the limits of the planet and its resources, the post-growth paradigm focuses on the possibility of meeting the fundamental needs of living beings and ensuring well-being through the use of severely limited resources (Kallis et alii, 2025; IPCC, 2023; Richardson et alii, 2023), while promoting a more equitable redistribution of those resources, without depending directly on unbounded econom-



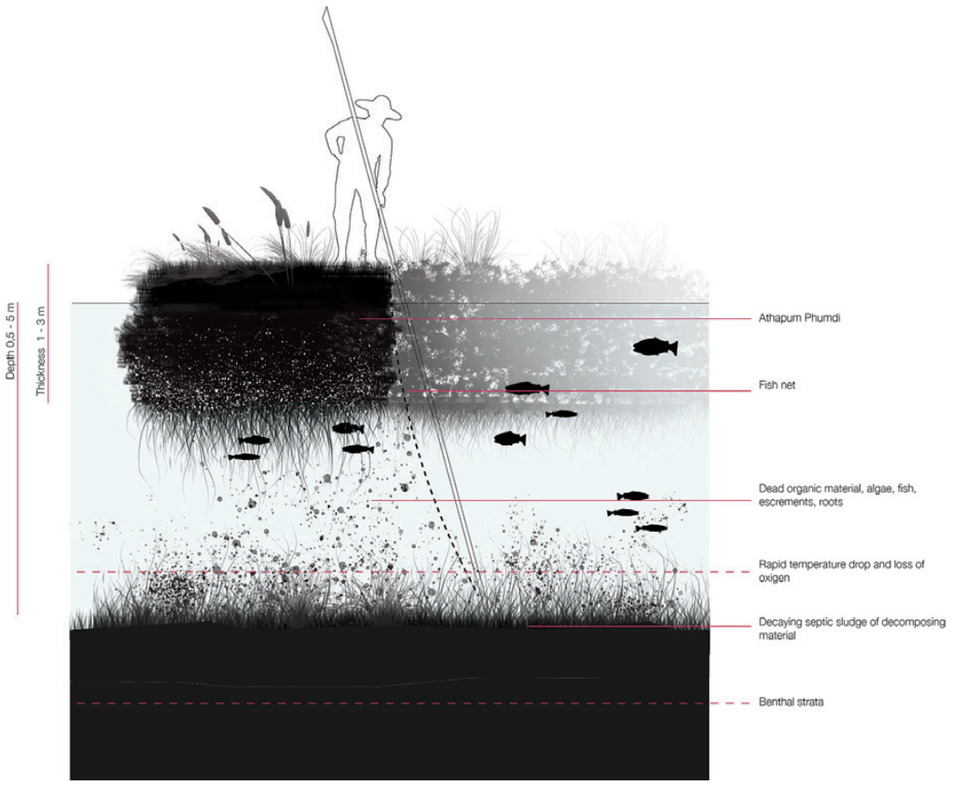


Fig. 12 | Detail section of Athapum Phumdi (credit: S. Tornieri, 2025).

ic growth, as emphasised in the 2030 Agenda (UN, 2015) through the Sustainable Development Goals (SDGs). However, while the SDGs seek to balance economic growth and sustainability, post-growth theory remains sceptical of economic growth as an end in itself (Soper, 2020; Fioramonti, 2024).

From the perspective of landscape and territorial planning, studies engaging with the post-growth paradigm address concepts of regeneration and the redistribution of available resources (Bensús Talavera, 2024), with the aim of containing the expansion of urban infrastructures and encouraging the effective use of space for non-extractive and community-oriented activities (Durrant, Lamker and Rydin, 2023), or through actions that revalorise rural landscapes from a renewed perspective (Spanier and Feola, 2022). From this standpoint, it therefore appears useful to investigate case studies that contribute to understanding the relationship between morphology and the productive system, and that point towards innovative, atypical or extraordinary design approaches distinguished by their singularity, with the objective of identifying potential models, relational systems or guiding principles that may be replicated in similar contexts.

In this regard, the case study of the great Loktak Lake emerges as particularly significant. Extending over an area of 287 square kilometres in the State of Manipur (India), the lake's depth varies between 0.5 and 5 metres, with an average water level of approximately 2.7 metres (Figg. 1-3). One of the most extraordinary ecological formations in a lacustrine landscape develops in the southern part of Loktak: an immense expanse of floating soil known as Keibul Lamjao, generated over the centuries by the sedimentation of the Phumdi, the floating islands. A compact mass of biomass suspended on the surface of the lake extends over approximately 40 square kilometres, cyclically sustained by the accumulation of organic matter and vegetative debris that give rise to a remarkably stable amphibious environment – a unique example of a floating national park: the Keibul Lamjao National Park.

The relevance of this contribution lies in the unprecedented perspective through which the project is approached in relation to the existing literature on landscape and spatial planning. Indeed, the case of Loktak Lake has not yet been the subject of in-depth analyses from ecological and landscape perspectives, having been primarily examined within frameworks of the social sciences, hydraulic engineering, or economics. Thus, this study seeks to initiate a comprehensive reflection on the implications for landscape architecture and territorial planning.

From this perspective, the paper is structured around a methodological and narrative framework that intertwines theoretical reflection, critical analysis, and design experimentation. It begins with a contextual framework addressing contemporary challenges – with particular attention to the theoretical paradigms of post-growth and the need to reconsider settlement and productive models from an ecological and systemic perspective – and proceeds through a review of the scientific literature on the Loktak Lake case study, aimed at mapping the current state of research and identifying the principal areas that remain to be explored (Dessì, 2023).

The discussion of the case study is divided into five interconnected sections that together form a coherent narrative of the lacustrine landscape, interpreted through distinctive elements regarded as the fundamental materials of an implicit project rich in aesthetic and functional potential.

The first section addresses the theme of environmental stability as a necessary condition for the durability of the landscape system, illustrating its ecosystemic structure, geography and principal morphological characteristics. This is followed by a section devoted to a critical review of the scientific literature, which highlights the gap in the disciplinary debate on the case study and, consequently, the originality of this contribution.

The results are then organised into two thematic clusters: the first interprets Loktak as a potential replicable design model and assesses its coherence with the SDGs; the second proposes a spatial and cultural reading of the landscape as the outcome of a complex stratification of social, functional, and managerial factors. Finally, the conclusions outline a critical synthesis, emphasising the limitations, openings and evolutionary potential of the so-called 'Loktak model'.

The objective of this contribution is to identify the constitutive principles of a possible 'Loktak model', conceived as a territorial and cultural device capable of informing, in a broad sense, the design practice of landscape architecture and spatial planning. The underlying hypothesis is that the ecological, social and spatial knowledge sedimented around the lake may constitute an operative basis for identifying and articulating strategies that can be replicated or adapted to other amphibious contexts — particularly those that are vulnerable or peripheral yet possess high landscape and territorial value — in response to the environmental and settlement challenges of the Anthropocene.

Fragile balance of the Loktak Lake ecosystem | Every ecosystem is exposed to risks of various kinds, arising both from human activities and from climate change processes. The stability of the environmental balance persists to a greater or lesser extent as adaptation and resilience become structural components of habitat evolution. Within this framework, human action itself can acquire a sustainable character when it steers environmental transformations toward reducing negative externalities

and irreversible impacts. The discussion in these pages addresses fundamental questions about different territorial scales, with significant implications for design disciplines, particularly for landscape architecture and territorial planning. A first consideration stems from the territory's form and leads to the recognition of the performative value of the actions that transform it. It is therefore helpful to ask to what extent the configuration and morphology of a territory influence the ecosystemic quality, the patterns of inhabitation and the productive dimension of places. (Steiner, 2011; Musacchio, 2009).

In parallel, it is equally significant to reflect on the coexistence of human-shaped landscapes and natural environments, and on the project's capacity to translate into a sustainable transformative action aimed at the conscious construction of new landscapes (Ahern, 2013; Waldheim, 2016). This leads to a crucial question: what forms of coexistence between species can be generated through the systemic integration of design tools, elements and materials into a virtuous and holistic configuration? Such a perspective implies the development of low-impact circular economies capable of constructing living environments based on systemic and collaborative adaptation among diverse environmental components (Shannon et alii, 2008; Costanza et alii, 2017).

In this sense, the case study of Loktak Lake represents a paradigmatic example: it offers insights into the possibilities and limitations of coexistence within an ecologically fragile context, where the synergy between the site's morphological specificity, landscape solutions and regionally scaled environmental issues gives rise to a landscape that functions as a system – the result of technical and sociocultural components with high ecological and environmental value.

Loktak Lake is a floodplain wetland in the Manipur River system and is subject to fluctuations in its average water level due to cyclical flooding. The lake's proximity to the promontory of the Sugnu municipality ensures a direct inflow of substantial amounts of water, seasonally increased by the contribution of nearby rivers, particularly the Chapki River, which regularly inundates vast areas of the province.

The hydrographic and lacustrine basin of Loktak Lake presents a singular surface topography, resulting from the confluence of numerous smaller

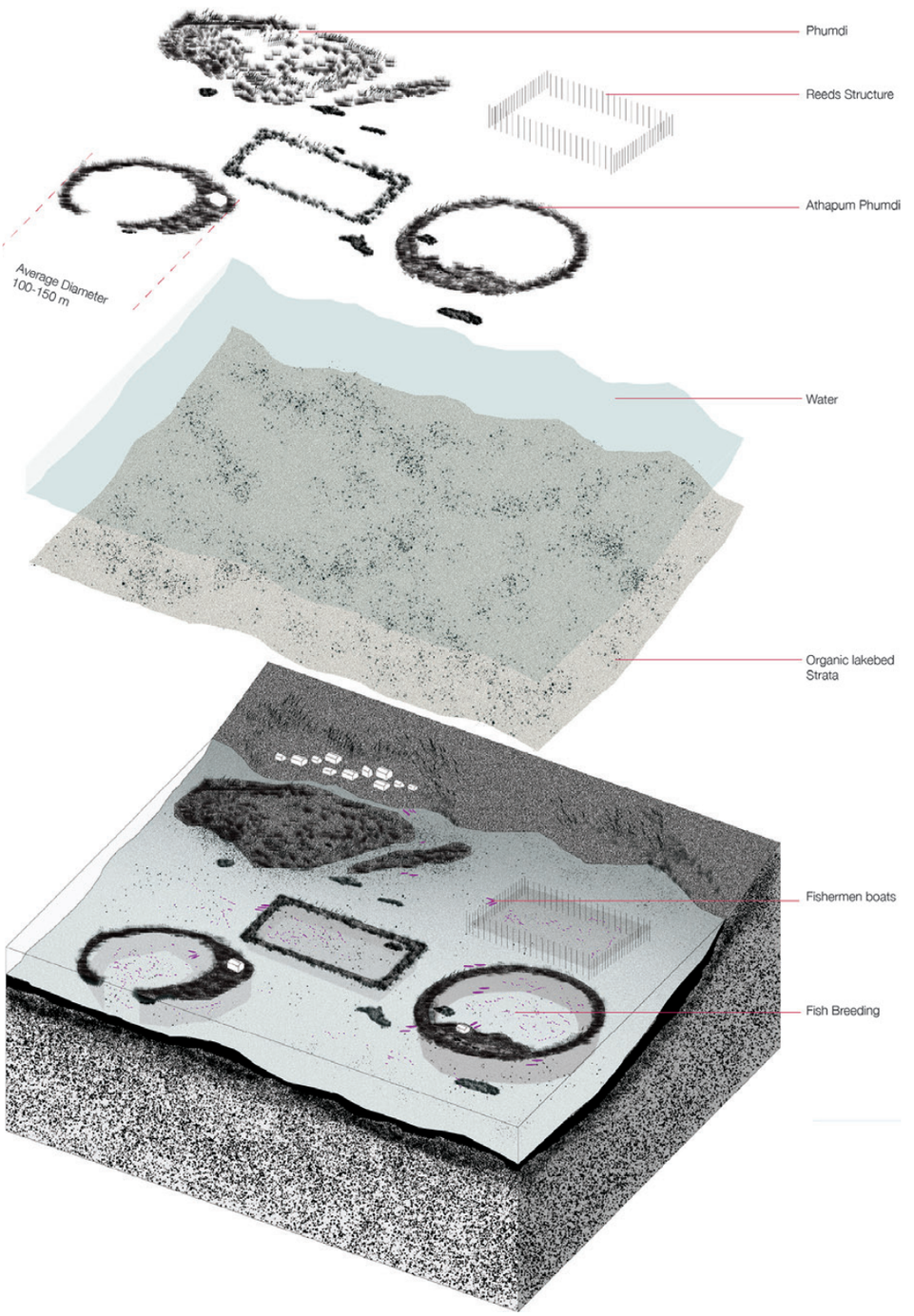


Fig. 13 | The elementary components of the Loktak Model (credit: S. Tornieri, 2025).



Fig. 14 | The formations of the Athapum Phumdi with the positioning of fishing nets (credit: K. Conniff, 2023).



Fig. 15 | The formation of Phumdi (credit: K. Conniff, 2023).



Fig. 16 | The fishing activity (credit: K. Conniff, 2023).

lakes known locally as Pats. During the monsoon season, the overall rise in the lake's hydrometric level produces a single, extensive water surface, creating a continuous expanse that seamlessly connects the Pats. In the past, the lake was subject to considerable seasonal fluctuations in water level, during which the Pats appeared as separate entities during low water and merged during floods.

The construction of the Ithai Dam in 1983 altered the nature of the ecosystem, reducing fluctuations in water level, fostering the proliferation of biomass within the basin and from the inflows of surrounding rivers, and endangering this resilient logic through the artificial stabilisation of the lake's level, thereby preventing natural hydrological variations. This has led to severe alterations in established ecosystemic balances, including the thinning of the Athaphum Phumdi, the disintegration of organic soil and the disruption of local fishing and agricultural practices (Irom et alii, 2025). Water management thus emerges as a crucial design issue, requiring the renegotiation of the balance between energy production, environmental protection and cultural continuity. Water management, therefore, constitutes a critical design issue, necessitating a renegotiation of the balance between energy production, environmental protection and cultural continuity.

The most distinctive feature of Loktak Lake is the presence of floating islands known as Phumdi, with an average thickness of approximately 2.5 metres, most of which resemble the floating gardens of Dal Lake in Kashmir or the Chinampas of Mexico (Fig. 4). Predominantly submerged, with only a small portion above the water's surface, these islands gradually expand their surface area from 0.1 to 2 metres over a period of six months. They are heterogeneous masses composed of soil, vegetation and organic material in varying stages of decomposition, used by local communities as resources for cultivating vegetables and food crops, as well as for providing fodder, fuel, roofing and fencing materials, medicinal herbs and other products for everyday use.

In particular, the high level of fertility of the floating soil facilitates the cultivation of rice and vegetables, whose growth benefits from the highly fertile material deposited on the lakebed. This organic richness is closely linked to the lake's tidal hydrodynamics, which depend on flooding and fluvial inundation. As the lake's average water level drops, everything on the surface gradually descends towards the bottom. The same occurs with the Phumdi, which sink and remain completely submerged under only a few tens of centimetres of water. Each year, they come into contact with the organic matter-rich lakebed, which enhances their fertility – a process later amplified by natural aerobic processes once the Phumdi rise again and float as the lake returns to its regular hydrological regime (Fig. 5).

The fact that the lake constitutes the principal source of fish production for the State of Manipur is of fundamental importance. What makes the traditional fishing technique, known as 'athaphum', distinctive and of particular significance is its direct relationship with the lake itself, where portions of Phumdi are specially shaped into circular floating enclosures. Interweaving strips of Phumdi create the Athaphum Phumdi to form thick rings of floating organic material, within which aquatic plants such as Echinochloa stagnina and Capillipedium sp. are placed to attract fish (Figg. 6-9). This practice, developed over the centuries, involves a harvesting phase known as phum namba, which may occur at intervals ranging from every 15 days to every 3 months. It represents a fishing system that not only integrates local ecological knowledge but also embodies a sustainable and cyclical form of adaptation to the fluvial and lacustrine context.

Loktak Lake in the scientific literature | The review of the scientific literature reveals that Loktak Lake has so far been studied predominantly through approaches related to environmental design, supported by land-use and land-cover mapping techniques. The adverse effects arising from the construction of the dam on the overall sustainability of the lacustrine basin have been quantified and verified in recent studies (Singh, 2017; Ngasepam et alii, 2025; Singh and Singh, 2023; Paonam and Chatterjee, 2023), while the biodiversity of the lake and the associated significance of human presence in environmental monitoring processes have been the subject of socio-ecological investigations (Laishram, 2021). The ongoing transformations in the productive activities traditionally associated with the lake – in particular agriculture and aquaculture – have been examined in relation to management issues and the documented lack of adequate commitment on the part of government authorities to the conservation and protection of the local ecosystem (Figg. 11-15; Devi, 2022).

Other studies have focused on the balance between water uses for hydroelectric and agricultural purposes, demonstrating that, through careful regulation of water levels, it is possible to ensure a sustainable coexistence between energy production and local farming practices (Singh et alii, 2011). Within the field of social sciences, several studies highlight the pedagogical potential inherent in the ecological system of Loktak Lake and its rich ecosystemic diversity, emphasising on the one hand the urgency of conservation strategies, and on the other the possibility of constructing a replicable educational and territorial model (Devi, Satapathy and Kumar, 2024).

From the perspective of spatial planning, the analysis of stakeholders and the actions required to promote sustainable development within the lacustrine basin has been addressed by Devarani and Basu (2019), who propose the identification of a 'Loktak model' potentially transferable to other wetland, lagoon or deltaic contexts characterised by analogous socio-ecological dynamics.

However, there is a significant lack of studies in the design disciplines, such as Landscape Architecture, Urbanism, and Spatial Planning. Although Loktak Lake has been recognised as a natural heritage site of national importance – it has held RAMSAR status since 1990, and the Keibul Lamjao Floating National Park was established in 1977 – there remains an absence of systematic initiatives to analyse the regenerative potential of the floating islands that characterise it so distinctly.

These islands not only play a crucial role in strengthening local identity and maintaining agricultural productivity, but also demonstrate remarkable adaptive capacities in response to sudden or unplanned environmental pressures. Moreover, the complex amphibious system of the Athapum Phumdi contributes to defining a unique landscape image endowed with high aesthetic and symbolic value, whose ecosystemic potential remains unexplored mainly within current policies and narratives regarding its protection and development.



Fig. 17 | Fishing nets inside the Athapum Phumdi (credit: N. Satam, 2017).

Understanding Loktak Lake | It is necessary to clarify, from the outset, the rationale for excluding from this discussion a deeper level of analysis of the everyday practices and affective relationships that local actors maintain with the landscape. This dimension could only be investigated through direct engagement and interviews with resident communities. This omission constitutes one of the current limitations of the reflection developed in this paper, rooted in the absence of on-site fieldwork, which would undoubtedly have strengthened the analysis through participatory observation and the collection of primary empirical data.

However, we maintain that such a methodological extension would entail a shift in focus towards a distinct field of anthropological and sociocultural inquiry, thereby altering the objectives of this phase of critical discussion, which remains consistently oriented towards developing a spatial and design-based interpretation of the case study. The absence of direct fieldwork has been mitigated through the crucial comparison of this case with analogous environmental contexts – discussed below – and through the incorporation of insights drawn from the relevant scientific literature on the subject (Meitei and Prasad, 2015; Kumar, 2024).

In interpreting the Loktak Lake case study, the approach adopted is grounded in a strategic and theoretical framework aimed at identifying the fundamental components that constitute the network of relationships underpinning an unprecedented, inhabitable agro-urban landscape. The spatial configurations that define it are potentially adaptable and transferable to other amphibious contexts of high landscape value, particularly those characterised by vulnerability or marginality. The questions and insights developed thus far in this paper derive exclusively from a critical re-examination of the scientific literature and from a careful interpretative re-drawing of significant portions of the Loktak Lake landscape.

The original considerations that emerge underscore the exemplary nature of the case study, which can be understood as a model endowed with specific characteristics that may be regarded as elementary components, potentially replicable and constitutive of future design frameworks. Within the Loktak literature, for instance, several studies emphasise the crucial role of the Athapum Phumdi in sustaining ecological, economic and social processes – serving variously as seasonal cultivation platforms for fisheries, floating foundations for dwellings and fertile substrates for agriculture (Singh et alii, 2024). Other contributions investigate the compostability of Phumdi, their biomass as a renewable resource

and their broader implications for ecosystem management (Singh and Kalamdhad, 2014; Khoiyangbam, 2021). The intrinsic capacity of this landscape lies in its ability to reconcile productive, domestic and environmental functions – a synthesis emerging from forms of technical knowledge and empirical expertise transmitted through generations (Meitei and Prasad, 2015).

Resembling small atolls in plan view, the Athaphum Phumdi – conceived as the fundamental building blocks of the lake landscape – manifest as floating perimeters upon which indigenous communities have constructed lightweight structures for fishing and seasonal cultivation (Figg. 10, 11). They function as adaptive landscape systems that respond dynamically to seasonal fluctuations in water levels, exploiting the monsoon's cyclical rhythm and the accumulation of organic matter as a natural fertiliser. This spatial and ecological practice embodies the principles of water circularity, regenerating the soil through self-sustaining natural processes and offering a tangible alternative to intensive irrigation schemes and water-demanding agricultural models (Singh et alii, 2024).

Soil consolidation within the Athaphum Phumdi occurs progressively: long, regularly arranged reeds act as lightweight barriers that trap and filter semi-solid organic material suspended in the water column or deposited on the lakebed (Singh and Kalamdhad, 2014). Through this process, manual assembly and compaction take place on a minimal structural framework organised in rectangular or circular configurations, typically covering an area of approximately 1.5 hectares, with sides or diameters ranging from 100 to 150 metres (Devi, Satapathy and Kumar, 2022). Continuous maintenance involves the gradual accumulation of organic layers, which contribute to the stabilisation and progressive thickening of the floating mass (Figg. 12, 13).

The 'Loktak Model' and the SDGs | Within the international discourse on the design of water territories, if the amphibious condition is regarded as an inevitable future horizon for the habitability of extensive lacustrine, coastal and deltaic regions affected by ongoing climate change, the 'Loktak Model' represents a dimension still insufficiently explored within the disciplines of Landscape Architecture and Regional Planning. The environmental and landscape characteristics of the lake constitute an advanced laboratory for the coexistence of human and natural systems, anticipating or reaffirming many of the strategies promoted by the 2030 Agenda. In particular, with reference to SDG 6 (Clean Water and Sanitation), which recognises water as a fundamental resource and a universal right, the 'Loktak Model' offers a significant contribution to the study and redefinition of water management practices from an ecological and systemic perspective, as well as to the valorisation of wetlands as frameworks for designing adaptive and resilient water management systems (Kumar, 2024).

The re-design and interpretation of the functioning of Athaphum Phumdi – floating islands composed of organic biomass – reveal an alternative mode of inhabiting the aquatic landscape, one that transcends the conventional dichotomy between the natural and the artificial. These structures are partly self-generated, sustained by the cyclical dynamics of seasonal tides, and partly shaped through human intervention (Meitei and Prasad, 2015). They play a structural role in defining the landscape, emerging as a novel form of ecological infrastructure capable of filtering and naturally purifying water, thereby sustaining the lake's high productivity.

These characteristics support the recognition of the 'Loktak Model' as a theoretical-operational construct that may be defined as a condition of floating circularity, in explicit dialogue with SDG 6. Within an understanding of the landscape as an integrated and porous system, it becomes capable of mediating environmental, social and productive dimensions – where processes of osmosis, hybridisation and symbiosis can engender spatial conditions that foster new alliances between humans and non-humans (Rizzi, 2025).

The rural economy of Loktak Lake, closely linked to the Phumdi system, is predominantly sustained by fisheries, which meet approximately 60% of the state of Manipur's fishery demand and constitute a vital source of livelihood for more than 50,000 fishers and their families. Since the subsistence practices of the indigenous population actively contribute to shaping the lake's landscape – conceived as a model of ecological infrastructure capable of cyclically regenerating soil and water resources – the sustainable utilisation of its potential represents an advanced and crucial laboratory for reconciling environmental conservation with local economic development, offering a tangible alternative to intensive irrigation models (triggered after construction of the dam).

In this context, community-based fisheries management schemes, integrated aquaculture programmes and participatory governance mechanisms are essential to strengthening the resilience of fishing communities, diversifying income opportunities and ensuring the equitable use of resources, in accordance with SDG 8 of the 2030 Agenda, which seeks to foster inclusive and sustainable economic growth alongside full and decent employment.

Overall, analysing the Loktak case through the lens of the SDGs reveals both its potential and its limitations. Firstly, the system prevents local communities from falling into extreme poverty (SDG 1) by ensuring continuous and diversified food production – encompassing fisheries and horticultural crops – which contributes to food security and public health (SDGs 2 and 3). This model enhances community resilience without, however, generating more complex forms of economic or infrastructural development as envisaged in SDGs 8 and 9, where innovation, sustainable industrialisation and infrastructure are regarded as central drivers. In this respect, the extensive character of productive practices emerges as a critical issue: while it safeguards ecological equilibrium and cultural continuity, it does not stimulate the establishment of diversified enterprises or broader industrial growth.

The 'Loktak Model' aligns closely with the principles of urban sustainability (SDG 11), particularly in relation to targets concerning access to green spaces and sustainable waste management. In this context, organic waste and residues generated by human activities are not treated as waste but are reintegrated into the landscape, becoming nutrients and soil within a natural cycle of regeneration that resonates with the principles of the circular economy (Ingaramo et alii, 2023). From a post-growth perspective, this model illustrates how embeddedness within a traditional landscape can offer an alternative interpretation of the objectives of SDGs 13, 14, and 15. Here, actions addressing climate, life below water and life on land are not achieved through targeted technological interventions, but rather through the maintenance of a dynamic equilibrium between humans and nature – an equilibrium governed by the temporal and ecological rhythms of the landscape itself.

The most significant point of contradiction lies in the construction of the Ithai Dam, which has severely compromised the Phumdi ecosystem, demonstrating the antithesis between an idea of progress grounded in economic growth – characterised by large-scale, high-impact infrastructure – and a vision of development more deeply rooted in local ecological practices. The most significant compromise is therefore evident in the lake's water management: while hydroelectric power generation satisfies SDG 7 (target 7.b) by improving regional energy access and efficiency, it simultaneously undermines the landscape's adaptive capacity, weakening the ecological processes that historically sustained the traditional resilience of the Loktak system.

Landscape scales and strategies | The case of Loktak Lake enables the identification of a set of strategic and design elements that serve to define a theoretical-applicative model: a conceptual and operational framework which, while acknowledging the environmental specificities of diverse contexts, can inform the design of adaptive settlement morphologies within amphibious environments — such as lagoons, lakes, river deltas and reclaimed territories (Brisotto et alii, 2023).

Accordingly, three ideal scales may be identified – territorial, sustenance, and species-based (not limited to humans only) – which collectively define a system, the so-called 'Loktak Model,' founded upon a balance between environmental sustainability and the incremental reproducibility of the landscape's fundamental materials.

The territorial dimension of the lake corresponds to the notion of an elementary environmental system: its extent could, in principle, be infinite, as it is defined by a minimal set of equally elementary materials – water, moist soil, vegetation, and dwellings (Morpurgo, 2024). The economic-productive (agricultural) dimension, in turn, is associated with another elementary material, the Athaphum Phumdi, which exhibits remarkably consistent dimensions and forms – a construction process governed by seasonal cycles and logics of replicability rooted in traditional ecological knowledge (Khoiyangbam, 2021). Finally, the dimension of inhabiting and maintaining the landscape is linked to the notion of proximity (Dessì, 2023) and can be understood at the scale of the human body. Here, the reproducibility of the landscape is determined by a 'correct distance' between the anthropic condition of dwelling and the surrounding natural environment (Fig. 14).

Conclusions | This essay forms part of a broader research framework oriented towards post-growth and nature-based approaches, offering a critical perspective for operating within vulnerable and transforming contexts (Vacanti and Leonardi, 2024). Within the wider scenario of the global climate crisis — which increasingly threatens the equilibrium of coastal zones and intertidal ecosystems – the question of the future of transitional spaces emerges with particular urgency. The Loktak case demonstrates that the territory's morphology results from processes of



Fig. 18 | Maintenance carried out by fishermen (credit: N. Satam, 2017).



Fig. 19 | Lake Inle, Myanmar (credit: R.-A. Lettau, 2005).



Fig. 20 | The floating system in Lake Inle, Myanmar (credit: R.-A. Lettau, 2005).

slow sedimentation and continuous adaptation, and that, through the conscious construction of sustainable landscapes, it is possible to respond effectively to environmental transformations that may initially appear adverse or detrimental to human habitation. From this perspective, the project does not assume the character of a formal imposition but instead functions as an epistemic and operative tool, capable of systematising multiple levels of action: interpretation, maintenance and mediation between ecological processes and human needs (Figg. 15-18).

One of the most significant elements shaping this landscape-territory concerns the use of organic materials as a design resource. In intertidal contexts, resources such as reeds, woody debris, spongy soils and mollusc exoskeletons constitute available and regenerable materials, offering a palette of elements that are both locally sourced and ecologically responsive. Comparable examples to the Loktak Lake case can be found in several significant experiences.

The Life Vimine project (2013-2017) in the Venice Lagoon demonstrates the efficacy of low-impact interventions based on biodegradable fascines, groynes, and wave barriers, alongside the reuse of local sediments for the morphological reconstruction of eroded salt marshes. Similarly, the Ecological Citizens project (2018) by SCAPE Studio reintegrates exhibition materials to activate ecological restoration processes and to establish tangible spaces for civic engagement within the Venetian lagoon.

The seabed as a resource represents another principle emerging from the 'Loktak Model'. The lake substrate is not a passive entity but rather a living and active double soil capable of sustaining and regenerating life on the surface. Recent applications of integrated offshore multitrophic aquaculture (Buck et alii, 2018; Chopin et alii, 2008) illustrate how organic waste from fish production can be reused within the lower strata of the water column to support the algal biomass growth. Analogous systems, on a smaller scale, can be implemented in rural contexts as biomitigation devices (Zhang et alii, 2019), advancing a logic of interspecies symbiosis and material circularity. A comparable example that substantiates this feasibility is the floating agricultural system of Inle Lake in Myanmar (Watson, 2025; Figg. 19, 20).

The reflections developed thus far reaffirm the centrality of maintenance as an essential phase within regenerative processes – understood not as static conservation, but as a design-oriented practice capable of sustaining the coexistence between developmental models and fragile environments. The objective is not to render the territory 'sustainable at all costs', but rather to mitigate the impacts of land consumption through governance frameworks and regulatory instruments able to anticipate thresholds of environmental degradation and irreversibility. The Athaphum Phumdi floating islands of Loktak thus emerge as a form of spatial resistance to extractive paradigms. Here, the project assumes a curative role, employing maintenance as a systemic mechanism for territorial regeneration.

One of the factors that underscores the potential of the Athaphum Phumdi is its replicability, which enables highly economical resource use and remarkably short construction times. The local availability of materials for both construction and maintenance of the islands ensures a short and easily monitored supply chain, thereby enhancing overall efficiency.

The basic conditions for effectively reproducing this type of landscape begin with the identification of extensive lake or brackish areas accompanied by a high availability of organic construction materials – such as reeds, algae, roots, peat, rushes, straw, natural fibres, residues of submerged aquatic vegetation and organic sediments. In many lake environments, these materials can be supplemented with locally sourced mineral components such as silt, sand, fine gravel and clay, which contribute to the cohesion and stability of floating or semi-submerged platforms and structures. In addition, the presence of spontaneous or cultivated biomass, such as bamboo, lightweight timber, or woven fibres, offers further construction potential, enabling the integration of highly adaptable structural systems.

Furthermore, an examination of the islands' dimensions reveals recurring measurements and proportions, suggesting a limited scale for each Athaphum Phumdi. This can be deduced from both the labour required for their construction and the functional and productive needs characteristic of a family-based local economy. In this respect, one can discern an implicit design rationale emerging from practical necessities rather than from formal intent – where the 'natural limits' of production are not surpassed through technological imposition but are addressed through collaborative, community-based principles. These processes constitute adaptive responses to environmental and climatic constraints – such as the seasonal dynamics of the monsoon – as well as to anthropogenic influences, notably those linked to the construction of the Ithai Dam.

The exportability of the 'Loktak Model' has considerable potential for application in other geographical contexts. However, within international frameworks – particularly in Europe and Italy – the prevailing socio-economic and regulatory conditions would necessitate specific adaptations to render the model operational. Existing forms of collaboration between institutions and local stakeholders, such as river or wetland contracts, constitute appropriate platforms for engaging with and amplifying the exemplary potential of this case study.

What most constrains such processes, however, is the excessive bureaucratic and regulatory complexity that hinders not so much the physical construction of the landscape as the collective definition of its management. In this regard, the 'Loktak Model' can be interpreted as a synthesis of processual dynamics, wherein the beauty of the landscape emerges both as a result and as a foundational value, consistent with the principles of the European Landscape Convention (Council of Europe, 2000), which recognises landscape itself as a form of cultural heritage.

Acknowledgements

This contribution is the result of a shared reflection by the Authors. Nevertheless, the sections 'Fragile balance of the Loktak Lake ecosystem' and 'Loktak Lake in the scientific literature' are to be attributed to S. Tornieri; the sections 'Understanding Loktak Lake' and 'Landscape scales and strategies' to M. D'Ambros; while the introductory section, 'The Loktak Model and the SDGs', and 'Conclusions' are to be attributed to both Authors. The authors acknowledge the financial support for this publication provided by Jade University of Applied Science and the Department of Engineering and Architecture at the University of Trieste.

References

Ahern, J. (2013), "Urban landscape sustainability and resilience – The promise and challenges of integrating ecology with urban planning and design", in *Landscape Ecology*, vol. 28, issue 6, pp. 1203-1212. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10980-012-9799-z [Accessed 20 September 2025].

Alami, I., Copley, J. and Moraitis, A. (2024), "The wicked trinity of late capitalism – Governing in an era of stagnation, surplus humanity, and environmental breakdown", in *Geoforum*, vol. 153, article 103691, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.geoforum.2023.103691 [Accessed 20 September 2025].

Bensús Talavera, V. (2024), "Lessons on urban planning post-growth", in *Nature Cities*, vol. 1, pp. 14-15. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s44284-023-00006-4 [Accessed 15 September 2025].

Brisotto, C., Carney, J., Macaione, I. and Raffa, A. (2023), "Cambiamenti climatici nei paesaggi di bonifica – Adattamento tra modulo e modularità | Climate change in reclamation landscapes – Adaptation between module and modularity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 62-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1442023 [Accessed 18 September 2025].

Buck, B. H., Troell, M. F., Krause, G., Angel, D. L., Grote, B. and Chopin, T. (2018), "State of the Art and Challenges for Offshore Integrated Multi-Trophic Aquaculture (IMTA)", in *Frontiers in Marine Science*, vol. 5, article 165, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fmars.2018.00165 [Accessed 18 September 2025].

Burke, M., Hsiang, S. M. and Miguel, E. (2015), "Global non-linear effect of temperature on economic production", in *Nature*, vol. 527, pp. 235-239. [Online] Available at: doi.org/10.1038/nature15725 [Accessed 18 September 2025].

Chopin, T., Robinson, S. M. C., Troell, M., Neori, A., Buschmann, A. H. and Fang, J. (2008), "Multitrophic Integration for Sustainable Marine Aquaculture", in Jorgensen, S. E. and Fath, B. D. (eds), *Encyclopedia of Ecology*, Elsevier, Amsterdam, pp. 2463-2475. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00065-3 [Accessed 18 September 2025].

Costanza, R., de Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., Farber, S. and Grasso, M. (2017), "Twenty years of ecosystem services – How far have we come and how far do we still need to go?", in *Ecosystem Services*, vol. 28, part A, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008 [Accessed 20 September 2025].

Council of Europe (2016), *Council of Europe Landscape Convention, as amended by the 2016 Protocol*. [Online] Available at: rm.coe.int/16807b6bc7 [Accessed 20 September 2025].

Dessì, A. (2023), "Camminare nel selvatico – Per una transizione verso un paesaggio coevolutivo | Walking into the wild – A transition to a co-evolutionary landscape", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 131-140. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13112023 [Accessed 20 October 2025].

Devarani, L. and Basu, D. (2009), "Participatory wetland management in Loktak Lake – A road to sustainable development", in *Journal of Crop and Weed*, vol. 5, issue 1, pp. 178-190. [Online] Available at: cropandweed.com/archives/2009/vol5issue1/37.pdf [Accessed 18 September 2025].

Devi, L. A. (2022), "The Study on Sociological Environment in Manipur", in *International Journal of Inclusive Development*, vol. 8, issue 2, pp. 173-175. [Online] Available at: doi.org/10.30954/2454-4132.2.2022.9 [Accessed 18 September 2025].

Devi, R. S., Satapathy, K. B. and Kumar, S. (2024), "Loktak Lake of The State Manipur – A Review to Educate the Intellectuals and Awareness on Its Bio Wealth", in *Educational Administration – Theory and Practice*, vol. 30, issue 5, pp. 6936-6947. [Online] Available at: doi.org/10.53555/kuey.v30i5.4064 [Accessed 20 October 2025].

Devi, R. S., Satapathy, K. B. and Kumar, S. (2022), "Ethnobotanical Plants of Phumdi, Loktak Lake, Manipur, India", in *Asian Pacific Journal of Health Sciences*, vol. 9, issue 4, pp. 77-80. [Online] Available at: doi.org/10.21276/apjhs.2022.9.4.16 [Accessed 20 October 2025].

Durrant, D., Lamker, C. and Rydin, Y. (2023), "The Potential of Post-Growth Planning – Re-Tooling the Planning Profession for Moving beyond Growth", in *Planning Theory & Practice*, vol. 24, issue 2, pp. 287-295. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14649357.2023.2198876 [Accessed 18 September 2025].

Fioramonti, L. (2024), "Post-growth theories in a global world – A comparative analysis", in *Review of International Studies*, vol. 50, issue 5, pp. 866-876. [Online] Available at: doi.org/10.1017/S0260210524000214 [Accessed 20 October 2025].

Ingaramo, R., Negrello, M., Khachatourian Saradehi, l. and Khachatourian Saradhi, A. (2023), "Il progetto transcalare delle nature-based solutions per l'Agenda 2030 – Innovazioni e interconnessioni | Transcalar project of nature-based solutions for the 2030 Agenda – Innovations and interconnections", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 97-108. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1382023 [Accessed 20 October 2025].

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), *Climate Change 2023 – Synthesis Report – Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva. [Online] Available at: doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647 [Accessed 18 September 2025].

Irom, L. M., Ngasepam, P. S., Panmei, R. L. and Soiremi, V. S. (2025), "Ithai Barrage and Environmental Sustainability – A Case Study of Loktak Lake", in *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, vol. 51, issue 2, pp. 181-190. [Online] Available at: doi.org/10.55863/ijees.2025.0609 [Accessed 11 September 2025].

Jackson, T. (2021), *Post Growth – Life after Capitalism,* Polity, Cambridge (UK).

Kallis, G., Hickel, J., O'Neill, D. W., Jackson, T., Victor, P. A., Raworth, K., Schor, J. B., Steinberger, J. K. and Ürge-Vorsatz, D. (2025), "Post-growth – The science of well-being within planetary boundaries", in *Lancet Planetary Health*, vol. 9, issue 1, pp. e62-e78. [Online] Available at: doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00310-3 [Accessed 10 September 2025].

Khoiyangbam, R. S. (2021), "Wetlands in Loktak – Issues and challenges of merging Wildlife conservation and Hydropower generation", in *International Journal of Lakes and Rivers*, vol. 14, issue 2, pp. 223-236. [Online] Available at: ripublication.com/ijlr21/ijlrv14n2_07.pdf [Accessed 10 September 2025].

Koolhaas, R. (2020), *Countryside – A Report*, Taschen, Köln.

Kumar, S. (2024), "Navigating Sustainability in Loktak Lake – Socio-ecological changes and its impact on Wetland Ecosystem and Native Fishers", in *Journal of North East India Studies*, vol. 14, issue 1, pp. 27-44. [Online] Available at: jneis.com/wp-content/uploads/2024/12/14.1.3.pdf [Accessed 10 September 2025].

Laishram, J. (2021), "A Study on the Bioresources of the Loktak Lake, Manipur (India) for Livelihood by the People Living in Five Villages Located in and Around the Lake", in *Current World Environment | An International Research Journal of Environmental Science*, vol. 16, issue 3, pp. 928-941. [Online] Available at: dx.doi.org/10.12944/CWE.16.3.23 [Accessed 24 September 2025].

McNeill, J. R. and Engelke, P. (2016), *The Great Acceleration – An Environmental History of the Anthropocene since 1945*, The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge.

Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J. and Behrens, W. W. (1972), *The Limits to Growth – A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*, Universe Books, New York.

Meitei, M. D. and Prasad, M. N. V. (2015), "Phoomdi – A unique plant biosystem of Loktak Lake – Traditional and ecological knowledge", in *Plant Biosystems | An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, vol. 149, issue 4, pp. 777-787. [Online] Available at: doi.org/10.1080/11263504.2013.870250 [Accessed 24 September 2025].

Morpurgo, E. (2024), "Biomateriali e zone umide – Filiere per l'edilizia e il tessile dalla valorizzazione di ecosistemi locali | Biomaterials and wetlands – Supply chains for construction and textiles through the enhancement of local ecosystems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 314-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16262024 [Accessed 20 September 2025].

Musacchio, L. R. (2009), "The scientific basis for the design of landscape sustainability – A conceptual framework for translational landscape research and practice of designed landscapes and the six Es of landscape sustainability", in *Landscape Ecology*, vol. 24, issue 8, pp. 993-1013. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10980-009-9396-y [Accessed 20 September 2025].

Paonam, J. and Chatterjee, S. (2023), "Evaluating the Land Use Land Cover Dynamics of Loktak Lake – A Ramsar Wetland of International Importance in North East India", in *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, vol. 49, issue 5, pp. 459-470. [Online] Available at: researchgate.net/publication/371491286_Evaluating_the_Land_Use_Land_Cover_Dynamics_of_Loktak_Lake_A_Ramsar_Wetland_of_International_Importance_in_North_East_India [Accessed 24 September 2025].

Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Donges, J. F., Gerten, D., Hoff, H., Lade, S. J., Rockström, J., Carpenter, S. R. and Folke, C. (2023), "Earth beyond six of nine planetary boundaries", in *Science Advances*, vol. 9, issue 37, article eadh2458, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1126/sciadv.adh2458 [Accessed 20 October 2025].

Rizzi, C. (2025), "Osmosi, ibridazione, simbiosi – Dalla biofilia alla progettazione rigenerativa interspecifica | Osmosis, hybridisation, symbiosis – From biophilia to interspecies regenerative design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 146-155. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1792025 [Accessed 20 October 2025].

Shannon, K., De Meulder, B. E. J., d'Auria, V. and Gosseye, J. (eds) (2008), *Water Urbanisms*, SUN, Amsterdam.

Singh, C. R., Thompson, J. R., Kingston, D. G. and French, J. R. (2011), "Modelling water-level options for ecosystem services and assessment of climate change – Loktak Lake, northeast India | Modélisation des choix de niveau d'eau pour les services écosystémiques et l'évaluation du changement climatique – lac Loktak, Inde du nord", in *Hydrological Sciences Journal*, vol. 56, issue 8, pp. 1518-1542. [Online] Available at: doi.org/10.1080/02626667.2011.631012 [Accessed 20 October 2025].

Singh, K. D., Yi, X., Shagolsem, L. S. and Toijam, J. (2024), "Assessing Green Features of Phumdi as a Sustainable Material – A comparative analysis with bamboo, wood, metal, and plastic", in *Sustainability*, vol. 16, issue 2, article 637, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su16020637 [Accessed 20 October 2025].

Singh, K. J. (2017), "The Loktak Hydro Electricity Power Project in Manipur and its Impact on the Socio-Economic Conditions to the Catchment Areas", in *IOSR | Journal of Humanities and Social Science*, vol. 22, issue 11, pp. 11-17. [Online] Available at: researchgate.net/publication/366657537_Wetlands_in_Loktak_Issues_and_challenges_of_merging_Wildlife_conservation_and_Hydropower_generation_-_An_Overview [Accessed 20 October 2025].

Singh, M. R. and Singh, K. T. (2023), "Environmental and socio-economic impacts of hydro power project – A case study of the Loktak hydroelectric project in Manipur", in *EPRA | International Journal of Socio-Economic and Environmental Outlook*, vol. 10, issue 7, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.36713/epra13794 [Accessed 20 October 2025].

Singh, W. R. and Kalamdhad, A. S. (2014), "Potential for composting of green phumdi biomass in Loktak Lake", in *Ecological Engineering*, vol. 67, pp. 119-126. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.086 [Accessed 20 October 2025].

Soper, K. (2020), *Post-Growth Living – For an Alternative Hedonism*, Verso Books, London/New York.

Spanier, J. and Feola, G. (2022), "Nurturing the post-growth city – Bringing the rural back in", in Savini F., Ferreira, A. and von Schönfeld, K. C. (eds), *Post-Growth Planning – Cities Beyond the Market Economy*, Routledge, New York, pp. 159-172.

Steiner, F. (2011), "Landscape ecological urbanism – Origins and trajectories", in *Landscape and Urban Planning*, vol. 100, issue 4, pp. 333-337. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.01.020 [Accessed 20 October 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=viewandtype=111andnr=8496andmenu=35 [Accessed 20 October 2025].

Vacanti, A. and Lonardi, C. (2024), "Tecnologia, energia e tempo – Percorsi sperimentali per il design di tecnologie appropriate | Technology, energy, and time – Experimental paths for the design of appropriate technology", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 316-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15262024 [Accessed 20 October 2025].

Waldheim, C. (2016), *Landscape as Urbanism – A General Theory*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

Watson, J. (2025), *Lo-TEK – Water – A Field Guide for TEKnology*, Taschen, Köln.

Weller, R. J., Hoch, C. and Huang, C. (2017), *Atlas for the End of the World*. [Online] Available at: atlas-for-the-end-of-the-world.com [Accessed 20 October 2025].

Zhang, J., Zhang, S., Kitazawa, D., Zhou, J., Park, S., Gao, S. and Shen, Y. (2019), "Bio-mitigation based on integrated multi-trophic aquaculture in temperate coastal waters – Practice, assessment, and challenges", in *Latin American Journal of Aquatic Research*, vol. 47, issue 2, pp. 212-223. [Online] Available at: lajar.cl/index.php/rlajar/article/view/vol47-issue2-fulltext-1/1043 [Accessed 20 October 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 114-129
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1852025

Article Info

Received	10 September 2025
Revised	18 October 2025
Accepted	19 October 2025
Published	30 December 2025

PROGETTARE CON L'ACQUA IN AMBITO URBANO
L'esperienza dello studio Felixx

DESIGNING WITH WATER IN URBAN CONTEXTS
The experience of Felixx

Elan Redekop van der Meulen, Emanuela Cammarata, Ina Macaione, Bianca Andaloro, Alessandro Raffa

Abstract

Il contributo introduce una prospettiva originale sul tema dell'adattamento climatico attraverso le lenti del Water Urbanism e del Water-Sensitive Design, ridefinendolo non soltanto come una questione tecnica o ecologica, ma come un paradigma spaziale trasformativo. Sebbene la nozione di 'living with water' sia sempre più presente nella programmazione politica e nel dibattito scientifico, pochi studi ne esplorano le implicazioni pratiche e spaziali attraverso strategie progettuali realistiche e multiscalari. In tale ottica l'articolo si avvale dell'indagine metodologica e progettuale sviluppata dallo studio olandese Felixx, il cui lavoro allinea rigenerazione ambientale, inclusione sociale e giustizia spaziale. Concentrandosi sul recente Piano strategico per Oude Landen, il contributo mette in luce come l'integrazione di nuovi strumenti progettuali possa offrire dispositivi innovativi per guidare trasformazioni adattive attraverso tempo, scala e livelli di governance.

The contribution introduces an original perspective by addressing the theme of climate adaptation through the lens of Water Urbanism and Water-sensitive Design, reframing it not merely as a technical or ecological matter, but as a transformative spatial paradigm. While the notion of 'living with water' is increasingly present in policy and research discourse, few studies explore its practical and spatial implications through concrete, multiscalar design strategies. To this end, the paper benefits from the in-depth investigation of the design methodology developed by the Dutch office Felixx, whose work aligns environmental regeneration with social inclusion and spatial justice. Focusing on the recent strategic Plan for Oude Landen, the contribution highlights how integrating new design tools can provide innovative instruments for guiding adaptive transformations across time, scale, and governance levels.

Keywords

rigenerazione urbana, architettura adattiva al clima, soluzioni basate sulla natura, Anversa, Oude Landen

urban regeneration, climate-adaptive architecture, nature-based solutions, Antwerp, Oude Landen

Elan Redekop van der Meulen, Landscape Architect, is an Associate Partner at Felixx Landscape Architects and Planners (The Netherlands). He leads projects focused on climate change, biodiversity, and water management. E-mail: elan@felixx.nl

Emanuela Cammarata, Architect, is a Business Developer at Felixx Landscape Architects and Planners (The Netherlands). She combines project expertise with strategic storytelling to boost visibility and new collaborations through creativity and vision. E-mail: emanuela@felixx.nl

Ina Macaione, Architect, is an Associate Professor at the DIUSS Department, University of Basilicata (Italy). Scientific She conducts research on urban regeneration, landscape, and public space design from an eco-sustainable perspective. E-mail: ina.macaione@unibas.it

Bianca Andaloro, Architect PhD, is a Researcher at the Zuyd University of Applied Sciences (The Netherlands). She has conducted (post)doctoral research on climate-adaptive resilient architecture within ecological and climate transitions. E-mail: bianca.andaloro@zuyd.nl

Alessandro Raffa, Architect PhD, is an Associate Researcher at the Fondazione ENI 'Enrico Mattei' (Italy), investigating urban and architectural design for nature-based regenerative processes. E-mail: alessandro.raffa@unibas.it



Il contributo indaga gli approcci progettuali contemporanei legati al tema della rigenerazione urbana adattiva al clima e basata sulla natura, ponendo in evidenza il ruolo dell'acqua come risorsa vitale ed elemento progettuale. Sebbene l'argomento stia gradualmente raccogliendo un crescente consenso e interesse tra la comunità scientifica e la scena politica urbana globale, la sua dimensione spaziale rimane in larga parte trascurata, sia nei processi analitici che nelle applicazioni. Attraverso il continuo confronto della ricerca con la sperimentazione progettuale in contesti attuali e reali, il contributo intende promuovere studi maggiormente orientati alle pratiche spaziali e progettuali e sostenere lo sviluppo di esempi di rigenerazione efficaci e reattivi.

Il contributo si inserisce nel quadro di una ricerca sviluppata dal gruppo del NatureCityLAB dell'Università della Basilicata che affronta, attraverso un approccio interdisciplinare e multiscalare[1], il complesso rapporto tra clima e città, con un focus su alluvioni, siccità e qualità delle acque (EEA, 2024). L'obiettivo della ricerca consiste nell'esplorare il potenziale dell'architettura nel creare streetscapes adattivi al clima e nello sviluppare strumenti e tecniche per promuovere la sperimentazione climatica e la salute urbana, implementando così le infrastrutture verdi e blu come servizi ecosistemici.

L'articolo inquadra il progetto urbano dell'acqua all'interno del dibattito teorico e operativo riconducibile al tema del Water Urbanism, evidenziando paradigmi e strategie integrative che assumono l'acqua come agente spaziale, ecologico e sociale; successivamente mette in risalto la mancanza di strumenti integrativi e multi-scalari capaci di allineare resilienza ecologica, gestione idrologica e progetto spaziale per poi presentare la metodologia di ricerca sviluppata nell'ambito del progetto di ricerca europeo Tech4You e i suoi strumenti progettuali e metodologici.[2]

Pertanto il contributo introduce e discute il lavoro dello studio olandese di architettura e paesaggio Felixx, attraverso il progetto strategico Oude Landen[3], presentato come esempio di integrazione di infrastrutture verdi e blu e di gestione idrica e biodiversità nelle trasformazioni urbane adattive. Infine l'articolo restituisce delle riflessioni su come l'approccio di Felixx ridefinisca il ruolo del progetto nella costruzione di ambienti orientati al futuro mediante strumenti progettuali adattivi.

Water Urbanism: l'acqua come agente creativo nell'era dell'incertezza climatica | Nel XXI secolo, sotto la pressione crescente del cambiamento climatico, l'acqua è riemersa come forza generativa nell'immaginazione e nella costruzione di città e territori. L'innalzamento del mare, l'intensificarsi delle tempeste, l'imprevedibilità delle precipitazioni e dei periodi prolungati di siccità stanno destabilizzando sistemi urbani costruiti a lungo sulla rigida logica del controllo e della separazione dell'acqua dalla vita urbana.

Il paradigma modernista del controllo e della difesa (Brisotto et alii, 2023) dall'acqua si rivela sempre più inadeguato di fronte all'incertezza climatica. In risposta è maturato nel tempo un approccio teorico e operativo, spesso indicato come Water Urbanism, che riconosce l'acqua non soltanto come rischio, ma come agente vivo, dinamico e creativo attraverso cui le città possono adattarsi, evolvere e re-immaginarsi verso futuri sostenibili, resilienti ed equi.

Progetti sperimentali e realizzazioni, fondati sulle teorie del Landscape Urbanism (Corner, 2006; Waldheim, 2016) e dell'Ecological Urbanism (Mostafavi, Doherty, Harvard University Graduate School of Design, 2010), ripensano l'acqua come infrastruttura vivente, capace di ridefinire ecologie, economie, interazioni sociali e morfologie nella città contemporanea. Approcci come il Water Sensitive Urban Design (Hoban, 2019; Rashetnia et alii, 2022), insieme a concetti quali Blue-Green Infrastructure (Benedict and McMahon, 2006; Dell'Acqua, 2020; Moscatelli and Raffa, 2023) e Nature-based Solutions (Bologna and Hasanaj, 2023; Ingaramo et alii, 2023; Olivieri, 2022; Perini, Mosca and Giachetta, 2021), sottolineano il ruolo dell'acqua come sistema connettivo, agente di flessibilità e resilienza, nonché generatore di spazi multifunzionali e adattivi all'incertezza climatica. I progettisti oggi mappano bacini idrografici, flussi di marea e falde acquifere come reti viventi, ridefiniscono i margini urbani come spazi ibridi tra soluzioni grigie e blu-verdi; i vuoti urbani, come spazi per nuove ecologie ispirate alla natura che gestiscono l'acqua, offrono opportunità ricreative e migliorano la qualità dello spazio.

È possibile individuare paradigmi progettuali e casi studio in tutto il mondo che rendono evidente la necessità di riconcettualizzare e rimodellare la relazione con l'acqua di fronte ai cambiamenti climatici ed ambientali attuali e attesi. In questo senso, il paradigma Room for the River, trasformato in programma nazionale nei Paesi Bassi (2007), ha prefigurato molte di queste idee, restituendo spazio ai fiumi affinché possano esondare in sicurezza mediante arretramento degli argini, ripristinando le pianure alluvionali e modellando paesaggi molteplici che integrano sicurezza idraulica, ecologia e spazio per il tempo libero (Meyer, Bobbink and Nijhuis, 2017). Parallelamente, la Città di Rotterdam è divenuta prototipo di questo approccio, con interventi quali il River Tidal Park[4], dove un sistema lineare di spazi blu-verdi pubblici lungo la Mosa consente di sperimentare le dinamiche di marea all'interno dell'ambiente urbano.

In linea con questo mutamento d'approccio, dopo l'uragano Katrina (2005), il Greater New Orleans Urban Water Plan (Waggonner and Ball Architects, 2013) ha segnato un punto di svolta, favorito da uno scambio transatlantico con progettisti olandesi attraverso il paradigma del 'living with water': piuttosto che resistere all'acqua con argini più alti, il Piano ha proposto una strategia diffusa e multi-scalare composta da canali, strade che si lasciano attraversare dall'acqua, giardini pluviali e parchi per rallentare, trattenere e riutilizzare le acque meteoriche, riconnettendo le comunità al loro paesaggio deltizio e trasformando l'acqua in una risorsa civica. Allo stesso tempo, in Cina il programma nazionale Sponge City è stato sviluppato esplicitamente a partire dal lavoro pionieristico di Kongjian Yu[5]. I contributi teorici di Yu (2021a) – e i progetti sperimentali di Turenscape come lo Zhongguancun Life Science Park[6] e il Qunli Stormwater Park (Yu, 2021b) – hanno dimostrato come i paesaggi urbani possano assorbire, filtrare e celebrare l'acqua. Queste realizzazioni testimoniano come zone umide, piantumazioni adattive e spazi pubblici multifunzionali possono simultaneamente gestire le inondazioni, ripristinare ecologie e ispirare nuove morfologie e identità urbane. Il paradigma della Sponge City ha scalato queste soluzioni a livello nazionale e internazionale, integrando pavimentazioni permeabili, piazze pluviali e corridoi di bio-ritenzione nel tessuto urbano (Li et alii, 2017).

La Città di Copenaghen offre un altro caso esemplare attraverso il suo Cloudburst Management Plan (City of Copenhagen, 2012), sviluppato in risposta all'alluvione del 2011: nel quartiere di Østerbro, il primo distretto resiliente al clima della città, progettisti come TredjeNatur e SLA hanno reinterpretato parchi, strade e cortili (Raffa, 2023, 2024) come infrastrutture multifunzionali che impiegano soluzioni basate sulla natura per migliorare il comportamento di quella zona di città alle piogge concentrate e violente[7]. Complessivamente tutti questi progetti dimostrano come il progetto adattivo al clima possa trasformare l'acqua da rischio latente a presenza 'visibile' e generativa. Il dibattito più recente sul Water Urbanism mostra una crescente attenzione anche al tema dell'equità, nel tentativo di mitigare gli effetti della gentrificazione e prevenire nel post-intervento processi di allontanamento delle comunità vulnerabili insediate.

Traendo spunto dalle scienze sociali – come l'Urban Political Ecology (Hädrich Silva et alii, 2024) – e alimentati da sperimentazioni progettuali in corso, studiosi e professionisti, soprattutto negli Stati Uniti, stanno indagando come il Water Urbanism possa promuovere una comprensione multidimensionale dell'equità. Iniziative come il McCoys Creek Recreation and Restoration Plan[8] a Jacksonville, il progetto di Moakley Park[9] a Boston e i Green Alleys[10] di Los Angeles dimostrano come il design rigenerativo basato sull'acqua possa affrontare contemporaneamente sfide climatiche urgenti, incorporando equità sociale, culturale, economica e ambientale su diverse scale, dai corridoi fluviali ai parchi costieri fino agli streetscape urbani.

Infine, nell'ambito della 19ma edizione della Mostra Internazionale di Architettura – La Biennale di Venezia (2025), il Padiglione Italia, dal titolo TERRÆ AQUÆ – L'Italia e l'Intelligenza del Mare[11], ha offerto una piattaforma di riflessione condivisa sul Water Urbanism e sulle sfide mediterranee, attraverso ricerche e progetti che interpretano l'acqua come risorsa strategica e agente di rigenerazione urbana e territoriale.

Considerati nel loro insieme questi paradigmi e progetti indicano un rilevante cambiamento epistemologico: l'acqua non è più intesa come pericolo da controllare o risorsa da gestire, essa viene ridefinita come agente progettuale attivo, capace di plasmare nuove forme spaziali e di promuovere gli obiettivi interconnessi di economia, equità e ambiente (Rossano, 2021). Le città vengono sempre più concepite come paesaggi anfibi, porosi e idro-sociali, in cui canali, zone umide, piazze e strade sono progettati per immagazzinare, filtrare, rivelare e avere cura del bene acqua, arricchendo così la qualità spaziale, rafforzando l'identità culturale e favorendo il benessere collettivo di fronte all'incertezza climatica. I progettisti stanno imparando a confrontarsi con i ritmi e i cicli dell'acqua, creando ambienti urbani non solo protetti dagli estremi idrici, ma anche strutturati e ispirati dall'acqua stessa, contribuendo agli obiettivi di sviluppo sostenibile nell'urbano.

Nonostante si moltiplichino le esperienze legate al Water Urbanism come campo teorico e operativo, permangono criticità e barriere significative che ne limitano l'efficacia e la piena trasferibilità. Una prima barriera riguarda la discontinuità tra visione strategica e attuazione operativa; progetti come Room for the River o il Cloudburst Management Plan di

Copenaghen hanno mostrato un'elevata capacità di integrare infrastrutture ecologiche e pianificazione urbana, ma richiedono condizioni istituzionali e finanziarie complesse, elevati livelli di coordinamento intersettoriale, continuità politica e capacità tecnica, difficilmente replicabili in contesti meno strutturati, soprattutto dell'area mediterranea. La gestione a lungo termine, i costi di manutenzione e le specifiche competenze amministrative rappresentano ostacoli frequenti alla scalabilità di questi modelli.

Un ulteriore limite è legato alla tecnicizzazione eccessiva dell'approccio che in alcuni casi rischia di ridurre la complessità del Water Urbanism a un insieme di dispositivi ingegneristici o di soluzioni tecno-naturali standardizzate. Il programma cinese Sponge City, pur straordinario per scala e ambizione, ha incontrato difficoltà nell'adattamento delle soluzioni alle specificità locali, mostrando come la dimensione socio-culturale e morfologica dei contesti urbani resti spesso marginale rispetto agli obiettivi di prestazione idrologica.

Infine anche nei contesti più avanzati permane la fragilità della governance integrata; l'interdipendenza tra infrastrutture idriche, pianificazione territoriale e progettazione architettonica e urbana e obiettivi di resilienza richiede strumenti istituzionali innovativi e processi decisionali flessibili, che solo parzialmente sono stati sviluppati. La mancanza di modelli stabili di cooperazione tra Enti pubblici, Università, progettisti e cittadini limita la capacità di mantenere nel tempo l'efficacia adattiva dei progetti.

In tale ottica progetti e sperimentazioni riconducibili al di Water Urbanism evidenziano un paradosso operativo: la loro forza risiede nella capacità di proporre visioni integrate e interscalari, ma la loro debolezza emerge nella traduzione concreta di tali visioni in sistemi durevoli, equi e accessibili. L'analisi critica di questi limiti non riduce la portata innovativa del paradigma, ma ne amplia la comprensione, suggerendo la necessità di nuovi approcci progettuali orientati all'apprendimento continuo e alla costruzione di resilienza situata.

Progettare la rigenerazione: strumenti metodologici per trasformazioni urbane orientate alle NbS | Nel più ampio dibattito accademico e politico il Water Urbanism si afferma sempre più come ambito centrale nella ricerca sull'adattamento climatico e sulla rigenerazione urbana basata sulla natura, in quanto pone la gestione dell'acqua – intesa come infrastruttura tanto ecologica quanto sociale – al centro di strategie spaziali mirate ad affrontare le complesse sfide poste dal cambiamento climatico. In questo modo l'elemento dell'acqua non viene visto come isolato nell'ecosistema naturale, né semplicemente come un rischio da mitigare, ma come parte cruciale di un dialogo complesso tra ecosistemi. Diverse città in tutto il mondo stanno sperimentando l'impatto di eventi meteorologici estremi e rischi idrologici: tuttavia la capacità e le opportunità di programmare, implementare e realizzare strategie adattive non si riscontrano in maniera uniforme. Si assiste infatti a una marcata disparità geografica: mentre i contesti dell'Europa settentrionale e centrale, insieme agli Stati Uniti, enfatizzano l'integrazione delle infrastrutture verdi e blu nelle agende urbane, le città dell'area euro-mediterranea – soprattutto quelle di piccola e media scala – risultano spesso manchevoli di strumenti strutturali e operativi necessari per beneficiare dall'implementazione di processi rigenerativi e adattivi al clima.

Questa condizione costituisce il punto di partenza di una ricerca sviluppata dal NatureCityLAB, che indaga il potenziale trasformativo della rigenerazione urbana adattiva al clima attraverso approcci basati sulla natura. Centrale è la ridefinizione della dimensione urbana – e in particolare del paesaggio urbano – non solo come infrastruttura tecnica o di mobilità, ma come sistema spaziale collettivo, un'interfaccia socio-ecologica su cui convergono questioni climatiche, ecologiche e sociali (Macaione, Raffa and Andaloro, 2024). In questo quadro, le Nature-based Solutions (NbS) non sono più viste come meri elementi tecnologici, bensì come componenti attivi di un processo progettuale multiscalare che genera benefici in ambiti ecologici, sociali, economici e culturali (Corradi et alii, 2024).

All'interno di questo percorso di ricerca il NatureCityLAB ha sviluppato una metodologia incentrata sull'indagine di progetti internazionali rilevanti, condotta attraverso un approccio sistemico e critico-comparativo per definire una tassonomia degli elementi tangibili e intangibili che costituiscono la Climate-Adaptive Nature-Based Urban Regeneration (CANBUR) negli streetscape. In questo modo, sono stati elaborati tre strumenti per la lettura critica dei progetti selezionati: a) il Diagramma circolare dei parametri che organizza i temi chiave in otto categorie principali; b) l'Abaco dei Dispositivi Spaziali e delle Azioni Trasformative che descrive le trasformazioni spaziali urbane attraverso le NbS; c) il Diagramma circolare dei caratteri architettonici invarianti che evidenzia gli elementi invarianti dei progetti.

Questi strumenti sono da intendersi non tanto come matrici statiche, piuttosto come dispositivi dinamici per la pratica progettuale futura: essi supportano infatti la scomposizione e la ricomposizione dei progetti dei paesaggi urbani attraverso una lente progettuale interdisciplinare, offrendo anche un quadro che abilita la formulazione di strumenti progettuali adattabili, trasferibili e applicabili in diversi contesti geografici e a scale differenti.

In questo quadro il progetto di Oude Landen, elaborato dallo studio Felixx, rappresenta un caso emblematico che affronta molte delle criticità sopra richiamate; esso nasce infatti come risposta alle difficoltà operative e istituzionali evidenziate in altri modelli di Water Urbanism, proponendo un approccio che integra visione strategica e implementazione progressiva, strumenti di governance partecipativa e strategie progettuali basate sulla natura. Attraverso la pianificazione per fasi, la cooperazione tra attori pubblici e privati e la costruzione di una base conoscitiva condivisa il progetto mira a garantire continuità nel tempo e adattabilità alle diverse scale di intervento. Pur inserendosi in un contesto – quello fiammingo – caratterizzato da una consolidata cultura idrica e da un forte supporto istituzionale, Oude Landen contribuisce a superare la tecnicizzazione dell'approccio tipica di molti casi precedenti, restituendo all'acqua una dimensione spaziale, ecologica e culturale. L'acqua diviene così non solo infrastruttura di sicurezza, ma motore di rigenerazione urbana e di qualità dello spazio pubblico, riconnettendo sistemi naturali e comunità locali.

In questo senso Oude Landen non rappresenta tanto una soluzione definitiva, quanto un laboratorio operativo che traduce i principi teorici del Water Urbanism in pratiche adattive e sperimentali, offrendo un contributo concreto all'evoluzione del paradigma.

Il Water Masterplan di Oude Landen: un modello per città basate sulla natura | Il cambiamento climatico sta indubbiamente rimodellando le città, intensificando fenomeni come alluvioni, siccità, on-

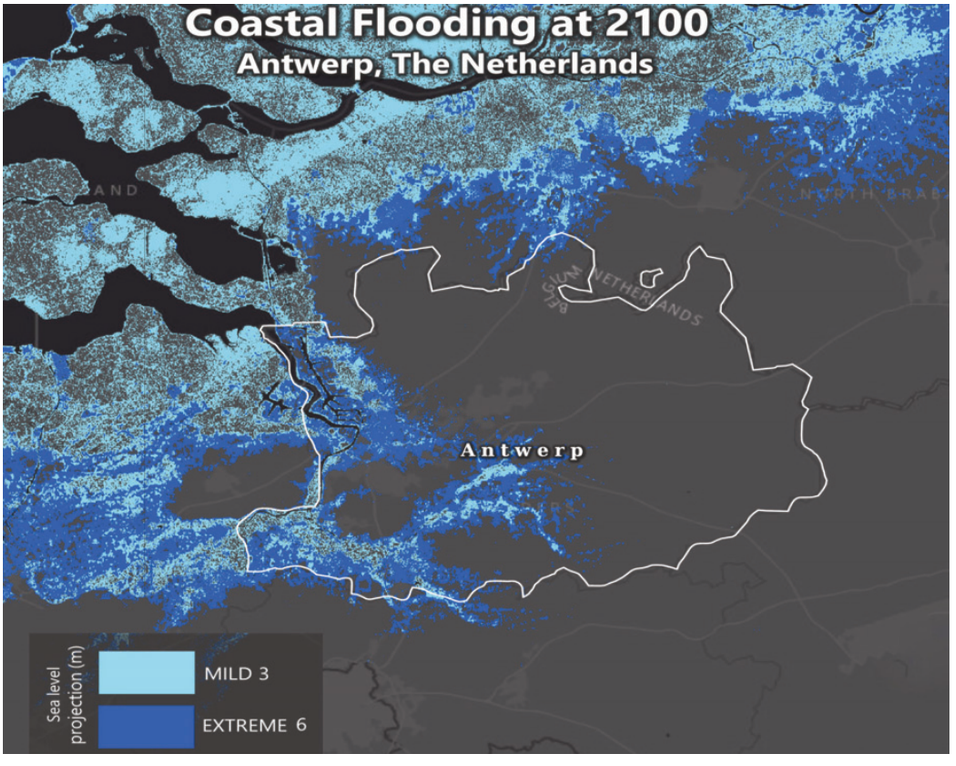


Fig. 1 | Sea level rise projections by 2100 for two scenarios: mild = 3m; extreme = 6m (source: earth.org, 2020).

date di calore e subsidenza, mentre le infrastrutture urbane tradizionali si rivelano inadeguate ad affrontare tali sfide. Il territorio delle Fiandre presenta chiaramente questo problema: nella Città di Anversa i paesaggi di polder situati in aree depresse risultano allo stato attuale idrologicamente frammentati e vulnerabili, richiamando la necessità di considerare la resilienza ecologica come una componente centrale della progettazione urbana.

Per questa ragione nel 2019 la Città di Anversa ha avviato lo sviluppo dell'ambizioso Waterplan per reintrodurre l'acqua come elemento caratterizzante del tessuto urbano. Il Piano-Programma ha perseguito l'obiettivo di sensibilizzare l'opinione pubblica e affrontare le sfide legate ad alluvioni, siccità e qualità delle acque (Fig. 1); al suo interno è stato concepito il Water Masterplan per Oude Landen, nella località di Ekeren e in parte del 'superparco' cittadino Noorderpark.

Sulla base di precedenti iniziative strategiche il Water Masterplan vuole rispondere alla condizione peculiare di Oude Landen, quale area ricca di biodiversità, ma idrologicamente compromessa. Storicamente ambito di palude tidale trasformato attraverso il polder e successivamente destinato a usi militari, il sito ha visto i propri corsi d'acqua (Donkse Beek, Oudelandse Beek e Laarse Beek) rettificati, deviati o in parte interrati, con conseguenti rischi crescenti di alluvione, ridotta ricarica delle falde e perdita di biodiversità. Oltre il caso specifico, il Water Masterplan offre un modello replicabile di Nature-based Urbanism europeo, mostrando come interventi a scala di quartiere possano contribuire a costruire un sistema metropolitano resiliente.

Proprio al cuore del Water Masterplan si legge un approccio basato sulla natura che mira a riconciliare la vita urbana con i processi ecologici, in linea con la filosofia progettuale dello studio Felixx[12]. Piuttosto che considerare l'acqua esclusivamente come problema tecnico, il Piano la intreccia con reti di spazi pubblici, Patrimonio culturale e biodiversità.

Strategie simili sono già state esplorate da Felixx a livello internazionale[13] attraverso l'uso di soluzioni basate sulla natura (come ad esempio zone umide artificiali, corsi d'acqua rinaturalizzati, aree di infiltrazione e corridoi ecologici) quali elementi cardine del progetto[14]. Questi interventi permettono una gestione dinamica delle acque, fornendo al contempo servizi ecosistemici più ampi come il raffrescamento dei microclimi urbani, il filtraggio delle acque meteoriche, l'aumento della connettività ecologica e il miglioramento della salute e del benessere collettivo; inoltre le strutture ricreative rafforzano il legame dei cittadini con il paesaggio (Fig. 2).

Il quadro metodologico alla base del processo progettuale è articolato in tre fasi: Ricerca, Strategia e Implementazione. La fase di Ricerca ha prodotto un Atlante che individua il sistema idrico esistente, le vulnerabilità idrologiche e la sovrapposizione tra i progetti; strutturato in sei livelli tematici – acqua, suolo, natura, paesaggio, clima e iniziative in corso – l'Atlante fornisce una base di conoscenze condivisa per il processo decisionale (Figg. 3-8).

La seconda fase di Strategia si basa invece sulla metodologia research-by-design per la formulazione di scenari di adattamento climatico che, attraverso l'integrazione delle NbS con gli obiettivi di qualità spaziale ed ecologica, si articolano intorno a cinque strategie idriche (Fig. 9): 1) connettere i corsi d'acqua frammentati; 2) ampliare i corsi d'acqua e le aree depresse; 3) trattenere le acque meteoriche attraverso grandi aree di ritenzione, come il previsto Water Park; 4) riportare alla luce i canali interrati; 5) infiltrare il deflusso urbano tramite retrofit verdi. Queste strategie applicate a diverse zone permettono di affrontare le problematiche locali in maniera situata. Inoltre, facendo leva sulla dimensione chiave della multifunzionalità, il progetto assicura che ciascuna misura produca co-benefici – come il miglioramento della biodiversità e il raffrescamento urbano – oltre alla prestazione idrologica (Fig. 10).

La fase finale di Implementazione definisce precondizioni e principi per un programma ventennale di sottoprogetti modulari. A tale scopo una Roadmap dinamica (Fig. 11) illustra come i progetti interagiscono e si succedono nel tempo, bilanciando interventi rapidi con azioni strutturali di più ampia portata: assume così centralità il carattere progettuale della flessibilità, che mostra come i progetti siano pensati per adattarsi all'evoluzione delle proiezioni climatiche e delle priorità comunitarie.

Per tradurre le ambizioni in azioni il Water Masterplan individua cinque sottozone (Fig. 12): Rozemaai, Riserva Naturale di Oude Landen, Water Park, Laarse Beek ed Ekeren-Donk. Rozemaai sarà riqualificato con zone di infiltrazione e streetscape riprogettati; la Riserva Naturale di Oude Landen, con i suoi 100 ettari, fungerà da bacino per le esondazioni stagionali preservando al contempo l'ecologia; il Water Park, un'area di ritenzione capace di contenere 200 mila metri cubi di acqua, avrà anche funzione ricreativa, collegando i quartieri con le aree naturali circostanti; Laarse Beek sarà oggetto di interventi di rinaturalizzazione del corso d'acqua e creazione di zone cuscinetto agricole per gestire le inondazioni e migliorare l'habitat; infine Ekeren-Donk sarà potenziato con bioswale, giardini di infiltrazione e verde urbano per alleggerire i sistemi fognari.

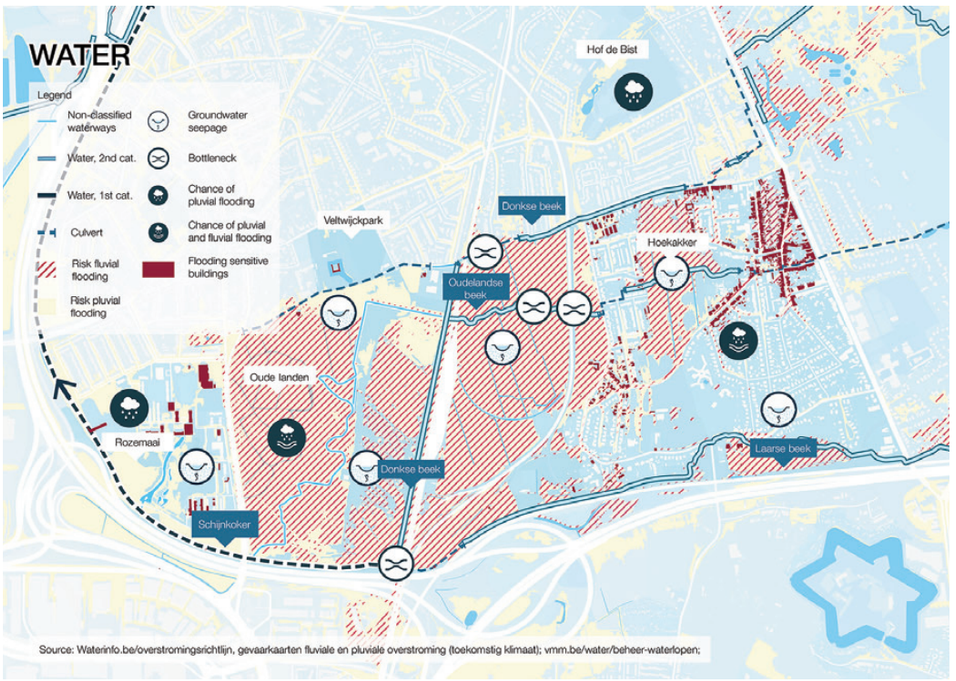
Le sottozone non sono concepite come interventi isolati in quanto la connettività tra di esse è essenziale: nuovi percorsi pedonali e ciclabili attraverseranno i corridoi idrici, collegando quartieri e spazi verdi e ridefinendo le infrastrutture idriche come infrastrutture civiche; al contempo questi corridoi svolgono funzione di mitigazione delle inondazioni e di spazio pubblico, radicando il sistema idrico nella vita quotidiana.

In aggiunta ai processi spaziali, la Città di Anversa ha adottato un percorso di progettazione partecipata che ha coinvolto stakeholder istituzionali, ONG e comunità locali: workshop e visite sul campo (Fig. 13) hanno permesso di far emergere conoscenze locali, identificare criticità e costruire consenso. La gestione a lungo termine è stata integrata nel modello di governance attraverso partenariati tra autorità municipali, organizzazioni ambientali e associazioni comunitarie. Con questo approccio olistico il Water Masterplan di Oude Landen evidenzia che la resilienza non consiste semplicemente nel resistere al cambiamento, ma nel prosperare attraverso di esso: investendo nelle connessioni tra corsi d'acqua e strade, natura e quartieri, passato e futuro il Piano delinea un paesaggio urbano adattivo, inclusivo e di qualità. Questa visione di città 'sensibile all'acqua' va oltre le difese idrauliche tradizionali, offrendo un modello olistico di resilienza ecologica e sociale.

S-comporre Oude Landen: strumenti analitici per un design sensibile all'acqua e basato sulla natura | Il Water Masterplan di Oude Landen – sviluppato dallo studio Felixx in collaborazione con la Città di Anversa, l'Istituto di ricerca Deltares e la società di consulenza Delbaere Consulting – emerge come caso emblematico all'interno del panorama contemporaneo della rigenerazione urbana. Es-



Fig. 2 | The water challenge as a driving force for a healthy environment (credit: Felixx, 2024).



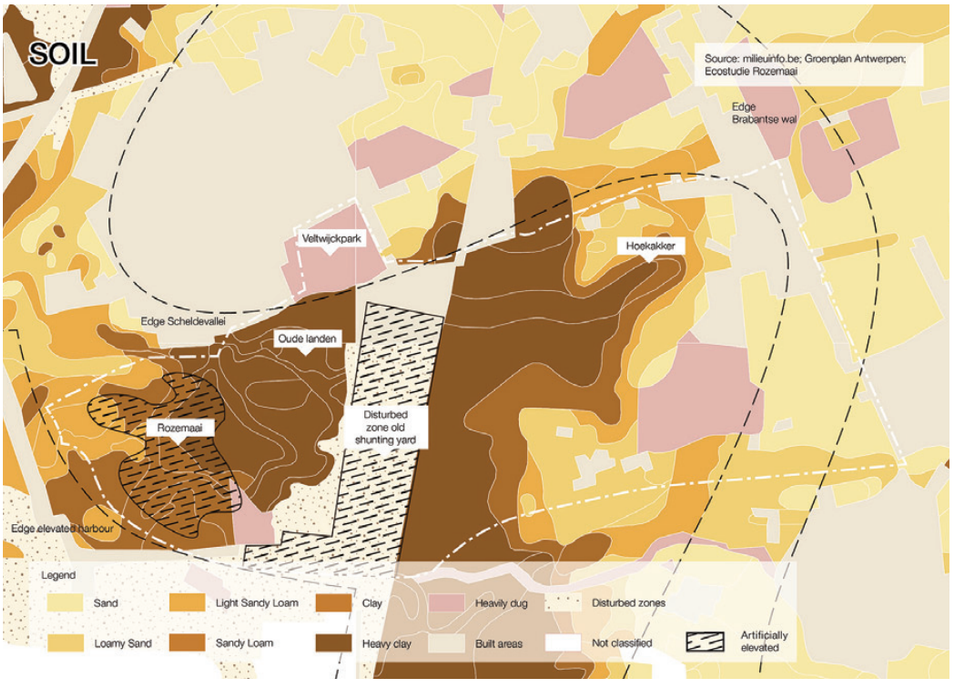


Fig. 3 | Overview of the water system and main challenges related to water management in the Oude Landen area (credit: Felixx, 2024).

Fig. 4 | Analysis of soil and subsoil conditions in the Oude Landen area (credit: Felixx, 2024).

so rappresenta una sintesi paradigmatica tra progettazione adattiva al clima e 'sensibile all'acqua' e strategie sociali inclusive alla scala di quartiere. Rivolto a un contesto periurbano in trasformazione, il progetto di rigenerazione di Oude Landen affronta sfide ecologiche, infrastrutturali e sociali complesse, tipiche delle aree di (ri)costruzione del dopoguerra nell'Europa settentrionale. Il Masterplan risponde principalmente a urgenti necessità di adattamento climatico impegnandosi al contempo in modo proattivo in più ampie agende di sostenibilità e vivibilità urbana attraverso un approccio basato sulla natura e guidato dalla comunità.[15]

Da questa prospettiva la rilevanza di Oude Landen all'interno della ricerca operativa sopra menzionata risiede nella sua capacità di esplorare la trasformazione dei tessuti urbani e dello spazio pubblico da dominio mono-funzionale e infrastrutturale a interfaccia socio-ecologica complessa: in questo quadro i paesaggi urbani costituiscono sia l'interfaccia che l'elemento attivatore di un processo rigenerativo sfaccettato. Inoltre, essendo stato sviluppato a valle del Piano-Programma Waterplan di Anversa (De Urbanisten, Witteveen+Bos and Common Ground, 2019), il progetto Oude Landen esplora e sviluppa temi progettuali cruciali quali l'integrazione interscalare delle NbS, la centralità del coinvolgimento comunitario nei processi adattivi e l'uso del progetto spaziale come strumento per ricomporre ecologie urbane frammentate. Per questi motivi Oude Landen è considerato un terreno di sperimentazione critico per il quadro CANBUR, all'interno dei temi di ricerca del NatureCityLAB (Macaione et alii, 2025).

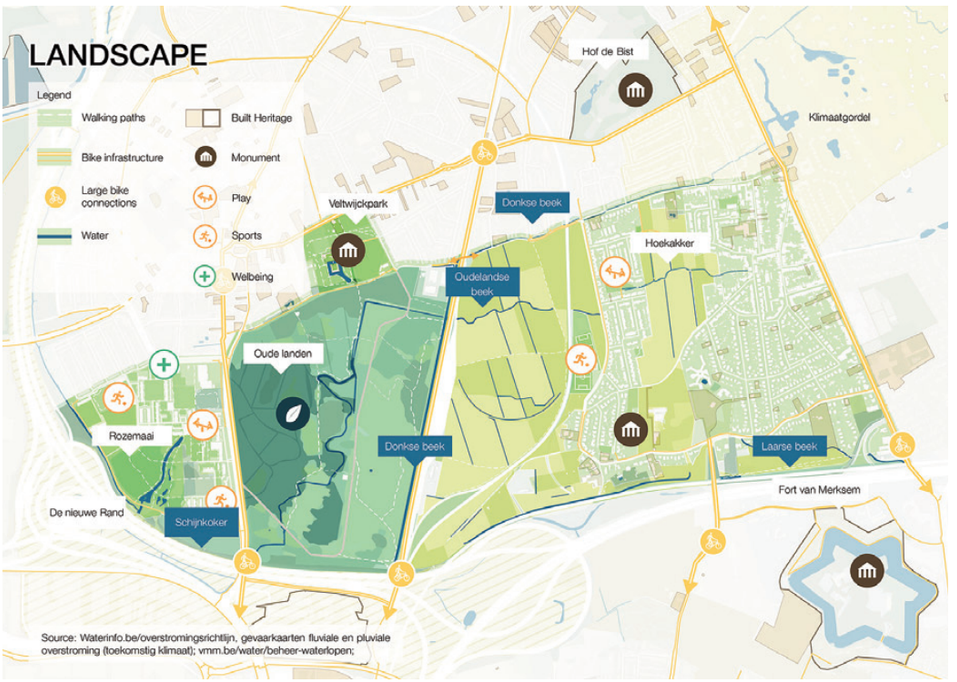
Come parte dell'Atlante dei casi progettuali emblematici che testimoniano la rilevanza di tali questioni nel dibattito internazionale, il progetto è analizzato attraverso i tre strumenti della metodologia di ricerca. Il Diagramma circolare dei parametri esplora il progetto attraverso otto parametri tematici e quarantadue sotto-parametri[16], che costituiscono una matrice per valutarne ambizioni e prestazioni: ciò avviene sovrapponendo una valutazione qualitativa dello stato dell'arte e una valutazione prospettica in cui vengono considerate le ricadute future del progetto.

La Figura 14 mostra come il progetto preveda di sviluppare una risposta concreta per un'area segnata da vulnerabilità ecologiche e sociali, in cui l'accesso ai servizi e alle infrastrutture di mobilità, l'attenzione per l'uso sostenibile delle risorse e l'integrazione di aree verdi nel contesto urbano risultano ancora molto limitati. L'impatto del progetto sullo stato attuale dei luoghi si traduce nello sviluppo di servizi infrastrutturali in grado di incidere positivamente sul benessere umano e ambientale, insieme ad azioni finalizzate a rafforzare l'ecologia locale, la biodiversità e le condizioni climatiche: ciò avviene attraverso interventi spaziali e sociali, promuovendo al contempo la creazione di nuovi valori e opportunità di esperienza.

Il secondo strumento, l'Abaco dei Dispositivi Spaziali e delle Azioni Trasformative, offre una lettura spaziale e progettuale delle NbS, classificandole in base alla loro forma geometrica, funzione spaziale e azione trasformativa. S-comporre Oude Landen attraverso l'Abaco dei Dispositivi Spaziali consente di articolare ulteriormente il funzionamento delle NbS all'interno del processo compositivo del progetto.

La Figura 15 mostra un esempio di s-composizione di due sottozone, Rozemaai ed Ekeren-Donk, scelte per la loro scala prevalentemente urbana e per gli interventi di quartiere. Le NbS adottate hanno un forte impatto spaziale riconducibile a elementi geometrici bi- o tridimensionali, che operano nello spazio attraverso azioni trasformative. Dalla combinazione di queste sequenze di azioni si può intuire come ciascuna NbS funzioni come un dispositivo spaziale autonomo e peculiare, capace di esprimere specifiche relazioni contestuali con il territorio e caratteri propri. Il vocabolario spaziale così generato consente di delineare un tratto di autonomia compositiva di ogni NbS, che aggiunge alla comprensione tecnico-naturale una componente spazio-relazionale.

Infine il Diagramma circolare dei caratteri architettonici invarianti estrae i caratteri architettonici del progetto, organizzandoli in quattro gruppi ricorrenti: Transdisciplinarità, Interscalarità, Multi-temporalità e Multi-soggetto. Come mostrato in Figura 16 elementi centrali quali la partecipazione equa degli stakeholder, la collaborazione trasversale e la cono-



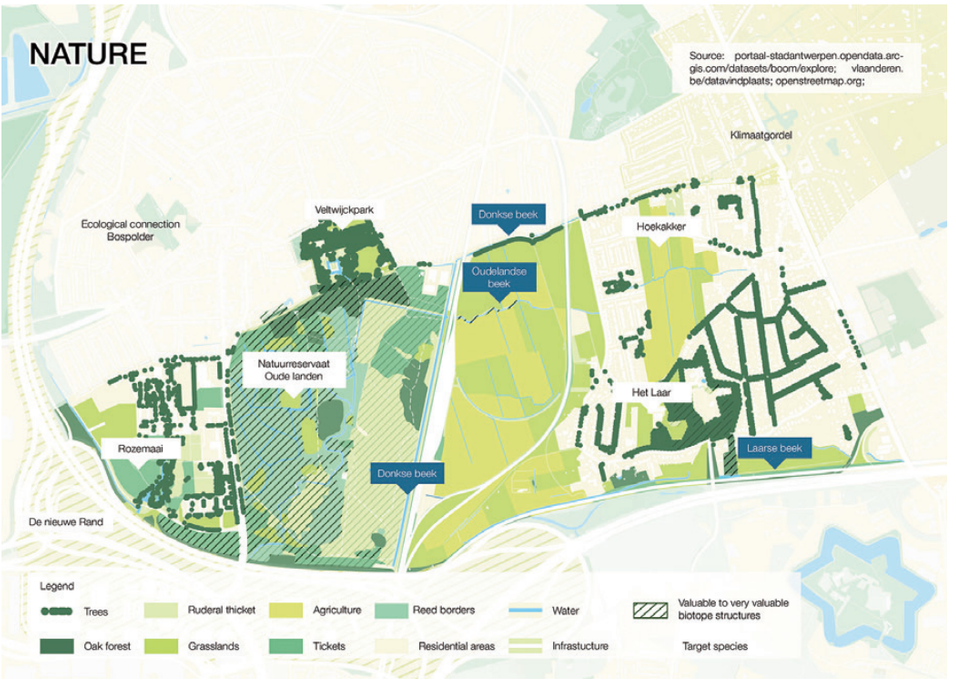


Fig. 5 | Spatial structure and key landscape identity elements characterising the Oude Landen area (credit: Felixx, 2024).

Fig. 6 | Distribution of natural areas and ecological networks within the Oude Landen area (credit: Felixx, 2024).

scenza integrata emergono come principali motori del progetto, in particolare rispetto alle dimensioni transdisciplinare e multi-soggetto. Considerando i caratteri specifici Oude Landen evidenzia una forte transdisciplinarità, fondendo ingegneria idrologica, architettura del paesaggio, progettazione urbana e pianificazione sociale.

Il progetto opera inoltre attraverso l'interscalarità, affrontando simultaneamente i bacini idrografici, l'identità di quartiere e i singoli streetscape rafforzando così la replicabilità del modello in contesti (sub)urbani con caratteristiche simili. La multi-temporalità è messa in evidenza dallo strumento metodologico della pianificazione per fasi, che fin dalle prime fasi progettuali definisce l'evoluzione progressiva delle trasformazioni spaziali basate sulle NbS nelle cinque sottozone, integrando transizioni graduali, variazioni stagionali e gestione adattiva nel tempo; infine istituzionalizza la collaborazione multi-stakeholder, coinvolgendo residenti, progettisti e attori municipali nella co-produzione del progetto e delle sue narrazioni di cura.

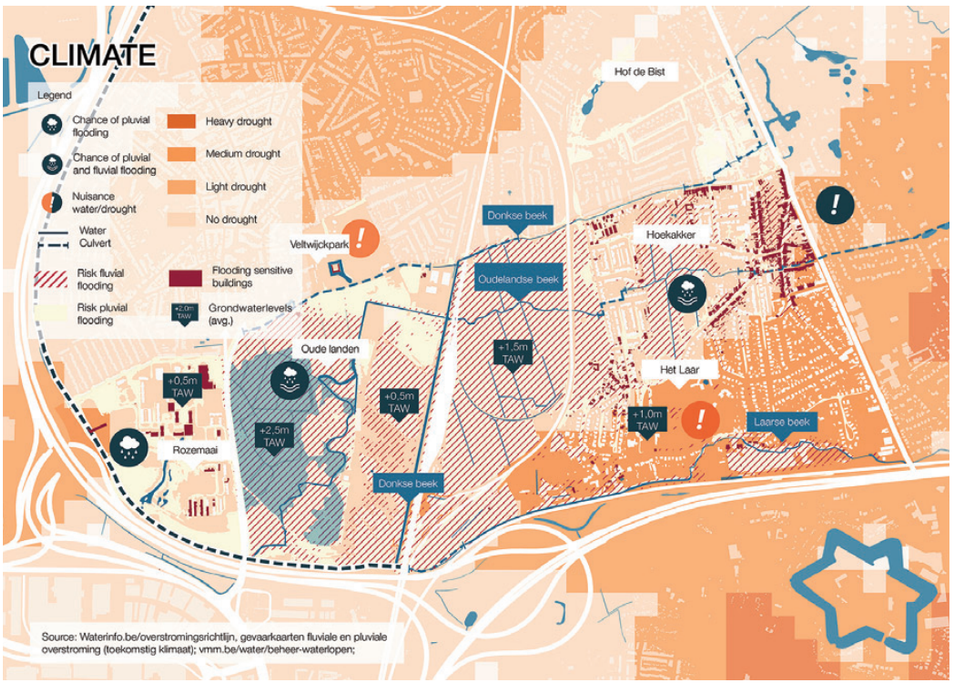
Questa lettura critica di Oude Landen in tre fasi permette di leggere il progetto non solo come buona pratica di rigenerazione urbana, ma anche come un modello operativo di Water-Sensitive Design' che promuove una forte innovazione sia dal punto di vista del risultato spaziale che del suo processo. Anche l'integrazione delle NbS, legata sia nella composizione spaziale che nella logica ecologica, ne conferma la rilevanza come caso esemplare per future trasformazioni urbane, capace di sollecitare gli aspetti culturali della rigenerazione urbana.

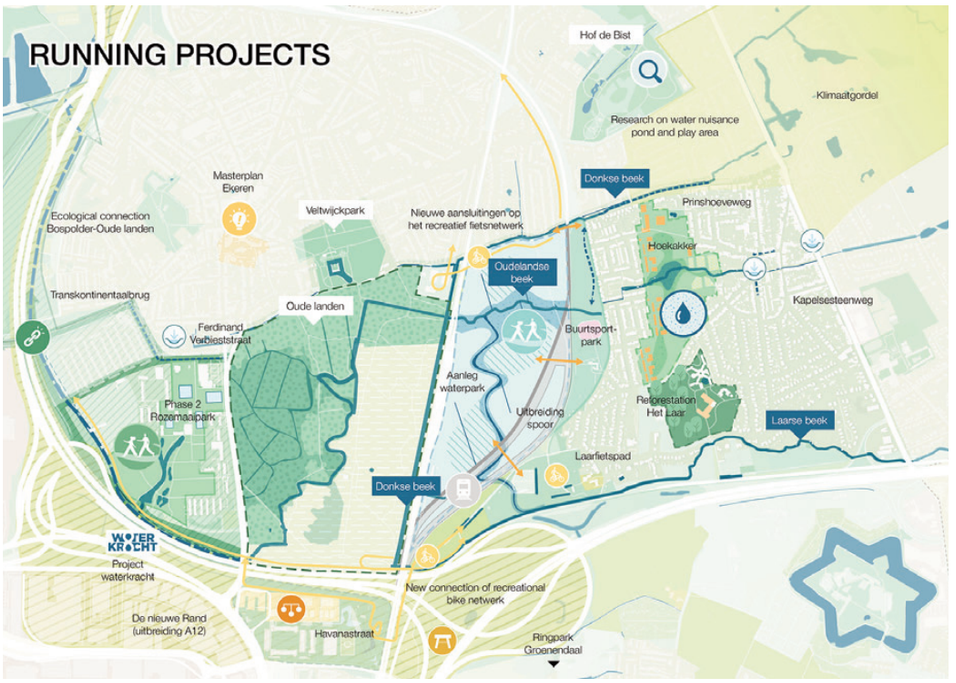
Acqua, energia e lavoro: un metabolismo urbano per la sostenibilità | Nel progetto Oude Landen gli SDG 6, 7 e 8 vengono interpretati in chiave integrata, delineando un modello di progetto urbano che coniuga sostenibilità ecologica, innovazione energetica e sviluppo socio-economico locale.

In particolare l'SDG 6 'Acqua pulita e servizi igienico-sanitari' costituisce il nucleo del progetto, sviluppato attorno a una visione 'water-sensitive' che considera l'acqua non solo come risorsa da gestire, ma come infrastruttura generativa. Le strategie di rinaturalizzazione dei corsi d'acqua, le aree di infiltrazione e il Water Park da 200.000 mc di capacità contribuiscono infatti alla depurazione naturale delle acque meteoriche, alla riduzione del rischio di allagamento e alla ricarica delle falde: in questo modo la logica del ciclo chiuso dell'acqua (trattenere, filtrare, riutilizzare) viene integrata nel progetto, promuovendo una gestione resiliente e multifunzionale della risorsa idrica in coerenza con i target 6.3, 6.4 e 6.6. Inoltre, seppur in maniera indiretta, il progetto contribuisce anche agli SDG 7 'Energia pulita e accessibile' e 8 'Lavoro dignitoso e crescita economica'. L'integrazione delle infrastrutture ecologiche progettate puó infatti contribuire alla riduzione dei consumi energetici urbani, così come le zone umide e le aree verdi possono migliorare la ventilazione naturale e mitigare le isole di calore urbane, riducendo la domanda di raffrescamento negli edifici; inoltre le NbS costituiscono dispositivi passivi di efficienza energetica ambientale.

Per quanto riguarda invece l'aspetto della crescita economica, questa è fortemente interessata dalle nuove economie territoriali legate alla manutenzione, alla gestione idrica e alla cura degli ecosistemi che il progetto sollecita. Le diverse azioni di rinaturalizzazione, monitoraggio ambientale e gestione partecipata possono infatti creare occupazione locale, valorizzando competenze professionali specifiche. Inoltre la pianificazione per fasi garantisce continuità nel tempo e distribuzione equa delle risorse, mentre la collaborazione tra Enti pubblici, imprese e cittadini promuove un modello di crescita qualitativa, che concilia sostenibilità ambientale ed equità economica; in questo senso il progetto contribuisce a una nuova economia della rigenerazione, basata su servizi ecosistemici, innovazione sociale e formazione di competenze 'verdi'.

Le tre dimensioni – acqua, energia, lavoro – si intrecciano quindi nel progetto in una logica metabolica e circolare, dove il miglioramento della gestione idrica (SDG 6) produce benefici energetici (SDG 7) e opportunità occupazionali (SDG 8). Ma le sinergie emergono anche in relazione ad altri SDG, tra cui l'SDG 11 'Città e comunità sostenibili' attraverso la rigenerazione degli spazi pubblici e l'inclusione sociale, l'SDG 13 'Azione per il clima' mediante strategie di adattamento e mitigazione integrate e l'SDG 15 'Vita sulla Terra' con la rigenera-





zione di ecosistemi fluviali e habitat naturali. Tale approccio sistemico riflette l'ambizione del progetto di Oude Landen di superare la visione settoriale dell'acqua, estendendo la sua capacità generativa alle dimensioni energetiche, economiche e sociali della città, in un quadro coerente con gli obiettivi dell'Agenda 2030.

Conclusioni | Il caso di Oude Landen mostra come la progettazione sensibile all'acqua possa costituire un dispositivo operativo capace di tradurre la complessità del cambiamento climatico in strategie spaziali e sociali integrate. L'approccio adottato dallo studio Felixx, fondato sull'interazione fra conoscenze idrologiche, progettazione paesaggistica e processi partecipativi, dimostra che l'acqua può diventare una risorsa trasformativa, non solo tecnica ma anche culturale, in grado di rigenerare paesaggi urbani fragili e di ridefinire i rapporti tra infrastrutture, natura e società.

Oltre la dimensione locale, Oude Landen suggerisce la possibilità di costruire un modello processuale operativo trasferibile per le città europee ed extraeuropee, in particolare nei contesti euro-mediterranei dove la scarsità di strumenti di gestione e la frammentazione istituzionale rendono difficile l'implementazione di strategie di adattamento climatico. La metodologia sperimentata – basata su fasi progressive, su un impianto multiscalare e sulla coproduzione del progetto con le comunità – costituisce un repertorio di principi adattabili, più che di soluzioni predefinite, capace di orientare nuovi processi di rigenerazione urbana basata sulla natura. In questo senso la trasferibilità non risiede nella riproduzione formale dei dispositivi, bensì nella capacità di innescare processi situati che reinterpretano le relazioni idro-sociali proprie di ciascun territorio.

Fig. 7 | Climate-related vulnerabilities and adaptation challenges identified in the Oude Landen area (credit: Felixx, 2024).

Fig. 8 | Ongoing and planned spatial development projects across the Oude Landen area (credit: Felixx, 2024).

L'esperienza di Oude Landen contribuisce così a consolidare il Water Urbanism come campo di ricerca e di azione progettuale, offrendo strumenti concettuali e operativi per superare la separazione tra infrastruttura idraulica, paesaggio e spazio pubblico. Essa invita a riconoscere il progetto come piattaforma di mediazione tra discipline – dall'ecologia urbana alla pianificazione, dall'ingegneria ambientale alla sociologia – e come pratica politica in grado di costruire alleanze socio-tecno-naturali intorno all'acqua.

Dal punto di vista della ricerca scientifica il contributo apre a futuri sviluppi su tre fronti principali: primo la necessità di approfondire la dimensione spaziale degli estremi idrici in contesto urbano – alluvioni, siccità e ondate di calore – non come eventi eccezionali da contenere, ma come opportunità di rigenerazione e di miglioramento della qualità ambientale e sociale degli spazi pubblici; secondo la costruzione di quadri comparativi internazionali in grado di misurare la trasferibilità delle strategie 'water-sensitive' tra differenti contesti geografici e climatici, individuando invarianti progettuali e variabili di adattamento; terzo la sperimentazione di nuovi strumenti di governance adattiva, capaci di integrare progettazione, gestione e monitoraggio delle trasformazioni nel tempo, includendo attivamente cittadini e Istituzioni in processi di apprendimento collettivo. Per concludere l'esperienza olandese analizzata rafforza il dibattito sull'urgenza di un paradigma anfibio dell'urbanità, nel quale le città imparano a convivere con l'acqua come condizione costitutiva, non come minaccia (Watson and Adams, 2011). Tale paradigma chiama in causa il ruolo della progettazione urbana alle diverse scale come pratica riflessiva e anticipatoria, orientata non solo alla mitigazione del rischio, ma anche alla costruzione di nuove forme di abitabilità. In questo senso 'progettare con l'acqua' diviene una chiave per rigenerare il rapporto tra ambiente e società, un laboratorio per ripensare la cultura del progetto in epoca di transizione ecologica e un contributo rilevante alla ridefinizione del ruolo dell'architettura e dell'urbanistica nel costruire futuri climaticamente e socialmente giusti.

This paper investigates contemporary design approaches related to climate-adaptive, nature-based urban regeneration, highlighting the role of water as a vital resource and design element. Although the topic is gradually gaining consensus and interest among the scientific community and the global urban policy scene, its spatial dimension remains largely neglected in both analytical processes and ap-

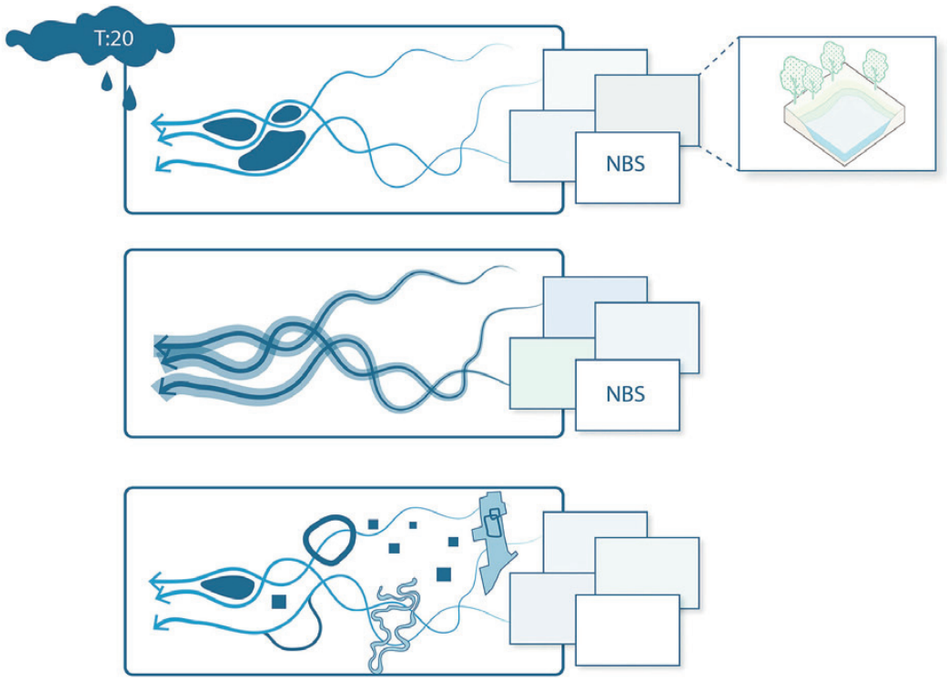


Fig. 9 | The strategy based on three key scenarios: Concentrated Flooding, Maximised Flow, and Distributed Flooding (credit: Felixx, 2024).

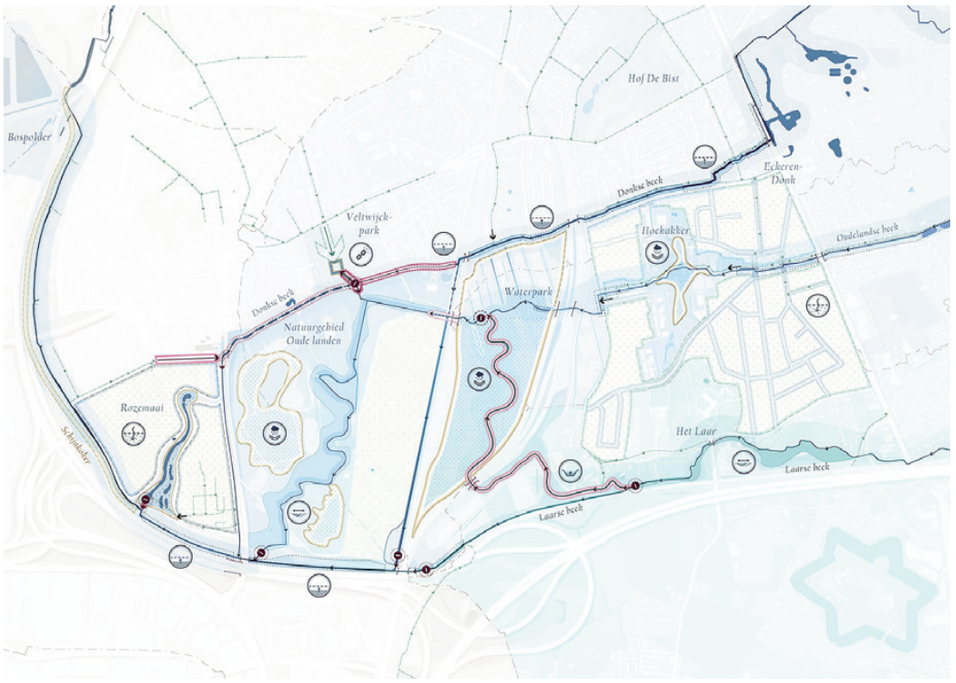


Fig. 10 | Implementing the basic principles overview map (credit: Felixx, 2024).

plications. By continuously comparing research with design experimentation in current and real contexts, the contribution aims to promote studies more oriented towards spatial and design practices and to support the development of effective and regenerative examples.

The contribution is part of a research project developed by the NatureCityLAB group at the University of Basilicata, which uses an interdisciplinary and multiscalar approach[1] to address the complex relationship between climate and cities, with a focus on floods, droughts and water quality (EEA, 2024). The research aims to explore the potential of architecture to create climate-adaptive streetscapes and develop tools and techniques to promote climate experimentation and urban health, thereby implementing green and blue infrastructure as ecosystem services.

The article frames the urban water project within the theoretical and operational debate on Water Urbanism, highlighting paradigms and integrative strategies that consider water as a spatial, ecological, and social agent. It then highlights the lack of integrative and multiscalar tools capable of aligning ecological resilience, hydrological management, and spatial design, before presenting the research methodology developed as part of the European research project Tech4You, along with its design and methodological tools.[2]

The article, therefore, introduces and discusses the work of the Dutch architecture and landscape studio Felixx, through the Oude Landen[3] strategic project, presented as an example of the integration of green and blue infrastructure, water management and biodiversity in adaptive urban transformations. Finally, the article reflects on how Felixx's approach redefines the role of design in building future-oriented environments through adaptive design tools.

Water Urbanism: water as a creative agent in the age of climate uncertainty | In the twenty-first century, under the accelerating pressures of climate change, water has re-emerged as a generative force in the imagination and construction of cities and territories. Rising sea levels, intensifying storms, unpredictable rainfall patterns, and prolonged droughts are destabilising urban systems that have long been built on the rigid control and segregation of water from urban life.

The modernist paradigm of water control and defences (Brisotto et alii, 2023) proves increasingly inadequate in the face of planetary uncertainty. In response, an expanding body of theory and practice – often referred to as Water Urbanism – has emerged. Water Urbanism recognises water not only as a risk but also as a living, dynamic, and creative agent through which cities can adapt, evolve, and reimagine themselves toward sustainable, resilient, and equitable futures.

Speculative and real-life projects grounded on the theories of Landscape Urbanism (Corner, 2006; Waldheim, 2016) and Ecological Urbanism (Mostafavi, Doherty, Harvard University Graduate School of Design, 2010) reframe water as living infrastructure, capable of reshaping ecologies, economies, social interactions and morphologies in the contemporary city. Approaches like Water Sensitive Urban Design (Hoban, 2019; Rashetnia et alii, 2022), together with concept like Blue-Green Infrastructure (Benedict and McMahon, 2006; Dell'Acqua 2020; Moscatelli and Raffa, 2023), Nature-based Solutions (Bologna and Hasanaj, 2023; Ingaramo et alii, 2023; Olivieri, 2022; Perini, Mosca and Giacchetta, 2021), emphasise the role of water as connective system, as an agent of flexibility and resilience, and as the generator of multifunctional adaptive spaces in the face of climatic uncertainty. Designers now map watersheds, tidal flows, and aquifers as living networks, reimagining the urban edges as a hybrid of hard engineering and soft ecologies; urban voids as spaces for brand-new nature-inspired ecologies that manage water, providing recreational opportunities and improving spatial quality.

It is possible to find design paradigms and real-life projects around the world which make evident the need to reconceptualise and reshape the relationship with water(s) in the face of the upcoming and forecasted environmental and climate changes. For example, the Room for the River paradigm, turned into a national program in the Netherlands (2007), prefigured many of these ideas, giving rivers more space to flood safely through setback levees and restoring multiple floodplain landscapes that

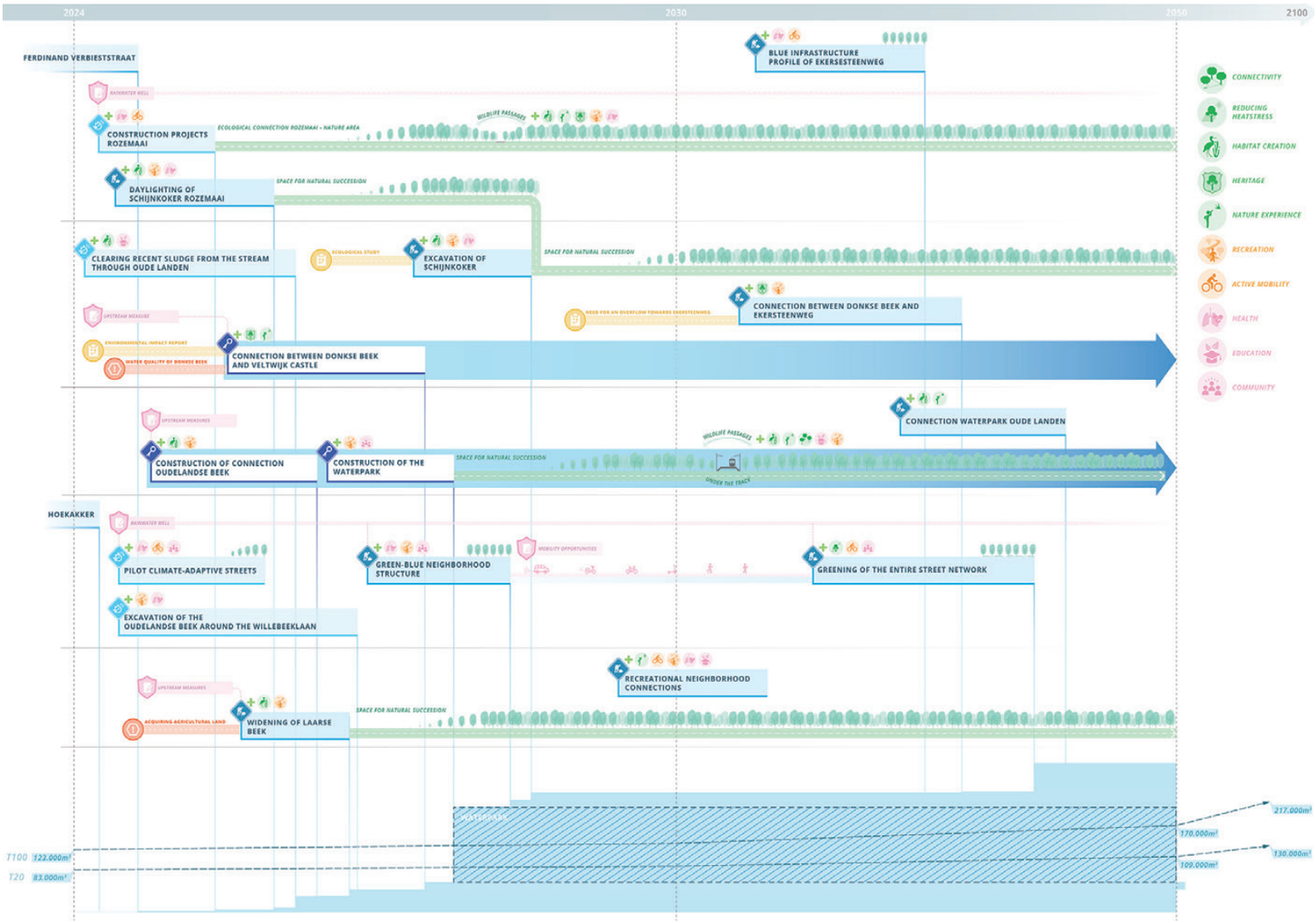


Fig. 11 | NbS Roadmap (credit: Felixx, 2024).

integrate hydraulic safety with ecology and leisure (Meyer, Bobbink and Nijhuis, 2017). Furthermore, the city of Rotterdam has become a showcase for this approach, with interventions and projects such as the River Tidal Park[4], where a linear system of public blue-green spaces along the Meuse River allows people to experience tidal dynamics inside the urban.

In line with this shift in design transformations, after Hurricane Katrina (2005), the Greater New Orleans Urban Water Plan (Waggonner and Ball architects, 2013) marked a turning point, catalysed by a transatlantic exchange with Dutch designers, through the Living with Water paradigm. Rather than attempting to resist water with higher levees, the Plan proposed a diffuse multiscalar strategy comprising canals, infiltration streets, rain gardens, and parks to slow, store, and reuse stormwater, reconnecting communities with their deltaic landscape and making water a civic resource.

At the same time, in China, the national Sponge City Program was explicitly developed after and deeply informed by the pioneering work of Kongjian Yu[5]. Yu's theoretical contributions (Yu, 2021a) – and Turenscape's experimental projects, such as Zhongguancun Life Science Park[6] and Qunli Stormwater Park (Yu, 2021b) – demonstrated how urban landscapes could absorb, filter, and celebrate water. These built works became proof-of-concepts, showing that wetlands, adaptive planting, and multifunctional public spaces could simultaneously manage floods, restore ecologies, and inspire new morphologies and urban identities. The Sponge City paradigm scaled these solutions nationwide and worldwide, integrating permeable pavements, rain plazas, and bio-retention corridors into the urban fabric (Li et alii, 2017).

In addition, the city of Copenhagen provides another exemplary case through its Cloudburst Management Plan (City of Copenhagen, 2012), developed in response to the 2011 flood. In Østerbro, the city's first climate-resilient neighbourhood, designers such as TredjeNatur, SLA, and others reimagine parks, streets, and courtyards (Raffa, 2023, 2024) as multifunctional infrastructures which use NbS to enhance the response of the urban fragment to concentrated and intense rainfall[7]. Collectively, these projects demonstrate how climate-adaptive design can transform water from a latent risk into a visible and generative presence. The most recent debate on Water Urbanism reveals a growing focus on equity, seeking to mitigate the effects of gentrification and prevent post-intervention displacement processes affecting vulnerable communities already settled in these areas. Drawing on insights from social sciences – such as Urban Political Ecology (Hädrich Silva et alii, 2024) – and informed by ongoing design experimentation, scholars and practitioners, especially in the United States, are investigating how Water Urbanism can advance a multidimensional understanding of equity. Initiatives such as the McCoys Creek Recreation and Restoration Plan[8] in Jacksonville, the Moakley Park project[9] in Boston, and Los Angeles' Green Alleys[10] demonstrate how water-based regenerative design can simultaneously address urgent climate challenges while embedding social, cultural, economic, and environmental equity across scales – from river corridors and coastal parks to urban streetscapes.

Finally, within the framework of the 19th International Architecture Exhibition – La Biennale di Venezia (2025), the Italian Pavilion, entitled TERRÆ AQUÆ. Italy and the Intelligence of the Sea[11], offered a shared platform for reflection on Water Urbanism and Mediterranean challenges, showcasing research and projects that interpret water as a strategic resource and as an agent of urban and territorial regeneration.

Taken together, these paradigms and projects point to a significant epistemological shift. Water is no longer merely understood as a hazard to be controlled or a resource to be managed; it is reframed as an active design agent capable of shaping new spatial forms and advancing the interconnected



Fig. 12 | Map of the five sub-zones (credit: Felixx, 2024).

goals of economy, equity, and environment (Rossano, 2021). Cities are increasingly envisioned as amphibious, porous, and hydro-social landscapes, in which canals, wetlands, plazas, and streets are designed to store, filter, reveal, and celebrate water, thereby enhancing spatial quality, reinforcing cultural identity, and fostering collective well-being in the face of climatic uncertainty. Designers are learning to engage with water's rhythms and cycles, creating urban environments that are not only safeguarded from water extremes but also fundamentally structured and inspired by it, thereby contributing to sustainable urban development goals.

Despite the increasing proliferation of experiences related to Water Urbanism as both a theoretical and operational field, significant criticalities and barriers persist, limiting its effectiveness and complete transferability. A first barrier concerns the discontinuity between strategic vision and operational implementation. Projects such as Room for the River or the Cloudburst Management Plan in Copenhagen have demonstrated a remarkable capacity to integrate ecological infrastructures and urban planning. Yet, they depend on complex institutional and financial conditions – high levels of intersectoral coordination, political continuity, and technical expertise – that are difficult to replicate in less-structured contexts, particularly in the Mediterranean region. Long-term management, maintenance costs, and the rigidity of administrative competencies often represent obstacles to the scalability of these models.

A further limitation is the over-technification of the approach, which, in some cases, risks reducing the complexity of Water Urbanism to a set of engineering devices or standardised techno-natural solutions. The Chinese Sponge City program, although extraordinary in scale and ambition, has faced difficulties in adapting solutions to local specificities, revealing how the socio-cultural and morphological dimensions of urban contexts often remain marginal compared to hydrological performance goals.

Finally, even in the most advanced contexts, the fragility of integrated governance persists. The interdependence among water infrastructure, territorial planning, and architectural and urban design, together with resilience objectives, requires innovative institutional tools and flexible decision-making processes that have only been partially developed. The absence of stable cooperation models among public institutions, universities, designers, and citizens limits the capacity to sustain the adaptive effectiveness of projects over time.

In light of these considerations, cases of Water Urbanism reveal an operational paradox: their strength lies in the ability to propose integrated and inter-scalar visions, yet their weakness lies in translating these visions into durable, equitable, and accessible systems. The critical analysis of these limitations does not diminish the paradigm's innovative potential; rather, it broadens its understanding, suggesting the need for new design approaches oriented towards continuous learning and the construction of situated resilience.

Designing regeneration: methodological tools for NbS-oriented urban transformations | Within the broader academic and political debate, Water Urbanism is increasingly emerging as a central field within climate adaptation and nature-based urban regeneration research. It places the management of water –understood as both an ecological and a social infrastructure – at the heart of spatial strategies that aim to address the complex challenges posed by climate change. Moreover, water is not treated as a standalone element of the natural ecosystem or merely as a risk to be mitigated, but as part of a complex dialogue between ecosystems.

Cities across the globe are experiencing the impact of extreme weather events and hydrological risks, but the responses and opportunities to implement adaptive strategies are not evenly distributed. A significant geographical disparity exists: while Northern and Central European contexts, along with the United States, are leading in integrating green



Fig. 13 | Community engagement activity: cycling excursion, kick-off meeting workshop (credit: Felixx, 2024).

and blue infrastructures into urban agendas, cities in the Euro-Mediterranean area – especially small and medium-sized urban environments – often lack the structural and operational tools to take advantage of such regenerative processes.

This condition underpins the research of the NatureCityLAB research group, which focuses on the transformative potential of climate-adaptive urban regeneration through nature-based approaches. Central to this research is the reframing of the urban dimension, specifically through the streetscape, not merely as a technical or circulatory infrastructure, but as a collective spatial system and a socio-ecological interface where climate, ecological, and social issues converge (Macaione, Raffa and Andaloro, 2024). In this framework, Nature-based Solutions (NbS) are no longer seen as purely technological elements, but rather as active elements of a multiscalar design process that generates co-benefits across ecological, social, economic, and cultural domains (Corradi et alii, 2024).

Within this research field, the NatureCityLAB developed a research methodology which engages a systematic investigation of exemplary and relevant international projects. Through critical comparative analysis, it constructs a taxonomy of the tangible and intangible features that define Climate-Adaptive Nature-Based Urban Regeneration (CANBUR) in streetscapes, thus leading to the development of three main analytical tools: (i) the Parameter Wheel, showing the key themes into eight main categories; (ii) Abacus of Spatial Devices and Transformative Actions, which describe the urban spatial transformation through the spatial impact of NbSs; and (iii) Invariant Architectural Characters Wheel, which highlight the invariant elements of the projects.

These tools are intended as dynamic instruments for future design practices, rather than static matrices, as they support the de-composition and re-composition of streetscape projects through a design-oriented, interdisciplinary lens. By doing so, they also offer a framework that enables the formulation of adaptable design tools which can be transferred and adapted across geographies and scales. Within this framework, the Oude Landen project, developed by the Felixx studio, represents an emblematic case that directly engages with many of the criticalities as mentioned above. Conceived as a response to the operational and institutional challenges identified in other models of Water Urbanism, it proposes an approach that integrates strategic vision and progressive implementation, participatory governance tools, and Nature-based design strategies. Through phased planning, cooperation between public and private actors, and the establishment of a shared knowledge base, the project aims to ensure continuity over time and adaptability across multiple intervention scales.

Although situated within the Flemish context – characterised by a well-established water culture and strong institutional support – Oude Landen contributes to overcoming the technocratic tendencies typical of many previous cases, restoring to water its spatial, ecological, and cultural dimensions. Water thus becomes not merely an infrastructure for safety, but a driver of urban regeneration and public space quality, reconnecting natural systems and local communities.

In this sense, Oude Landen does not represent a definitive solution, but rather an operative laboratory that translates the theoretical principles of Water Urbanism into adaptive and experimental practices, offering a concrete contribution to the evolution of the paradigm.

The Water Masterplan of Oude Landen: a blueprint for nature-based cities | Climate change is reshaping cities, intensifying floods, droughts, heat stress, and subsidence, while traditional urban infrastructure proves inadequate to cope: Flanders illustrates this challenge vividly. In the city of Antwerp, low-lying polder landscapes are now hydrologically fragmented and vulnerable, thus underscoring the necessity of ecological resilience as a central component of urban design . For this reason, in 2019, the City of Antwerp launched a comprehensive Waterplan to reintroduce water as a defining element of the urban fabric. The Plan aimed to raise public awareness and address flooding, drought, and water-quality challenges (Fig. 1). Within this framework, the Water Masterplan for Oude Landen in Ekeren – part of the city's Noorderpark superpark – was conceived.

Building on earlier strategic initiatives, the Masterplan responds to Oude Landen's unique position as a biodiversity-rich yet hydrologically disrupted area. Historically, a tidal marshland transformed through poldering and later military use, the site's waterways – the Donkse Beek, Oudelandse Beek, and Laarse Beek – have been straightened, diverted, and in some cases buried, contributing to increased flood risk, reduced groundwater recharge, and biodiversity loss. Beyond Oude Landen, the Water Masterplan offers a replicable template for Nature-based Urbanism in Europe, by showing how neighbourhood-level interventions can scale into a resilient metropolitan system.

At the heart of the Masterplan lies the nature-based approach that seeks to reconcile urban life with ecological processes, in line with Felixx office line of design[12]. Rather than viewing water solely as a technical challenge, the Plan weaves it into networks of public space, cultural heritage, and biodiversity.

Comparable strategies have been tested internationally, ranging from coastal resilience to reforestation and wetland restoration[13]: in these projects, NbS such as constructed wetlands, re-meandered streams, infiltration zones, and ecological corridors are always underpinned by the design[14]. These interventions manage water dynamically while providing wider ecosystem services: cooling urban microclimates, filtering stormwater, increasing habitat connectivity, and improving public health and well-being. Moreover, recreational facilities strengthen citizens' connection to the landscape (Fig. 2).

The methodological framework for the design process comprises three phases: Research, Strategy, and Implementation. The initial Research phase produced an Atlas identifying the existing water system, hydrological vulnerabilities, and overlapping projects. Structured across six thematic layers — water, soil, nature, landscape, climate, and ongoing initiatives — the Atlas created a shared evidence base for decision-making (Figg. 3-8).

The Strategy phase employs research-by-design to formulate scenarios for climate adaptation. These integrated NbS with spatial and ecological quality objectives and were structured around five water strategies (Fig. 9): 1) connecting fragmented watercourses; 2) widening streams and low-lying areas; 3) buffering stormwater through major retention areas such as the planned Water Park; 4) daylighting buried channels; and 5) infiltrating urban runoff through green retrofits. These strategies, applied to different zones, addressed localised challenges. Multi-functionality is then the key, ensuring each measure delivers co-benefits such as biodiversity enhancement and urban cooling in addition to hydrological performance (Fig. 10).

The final Implementation phase defines the preconditions and principles for a 20-year program of modular subprojects. A dynamic Roadmap (Fig. 11) illustrates how these projects interact and sequence over time, balancing quick wins with larger system-building interventions. Furthermore, flexibility was also embedded: projects are designed to adapt to evolving climate projections and community prior-

ities. To translate ambitions into action, the Masterplan organises the area into five subzones (Fig. 12): Rozemaai, Oude Landen Nature Reserve, Water Park, Laarse Beek, and Ekeren-Donk. Each subzone corresponds to a distinct typology and serves as a framework for clustered subprojects. Rozemaai will be retrofitted with infiltration zones and redesigned streetscapes. The 100-hectare Oude Landen Nature Reserve will serve as a buffer against seasonal flooding while preserving the ecology. The Water Park, a retention area capable of 200.000 m^3 of water, will double as a recreational hub linking neighbourhoods with surrounding natural areas. Laarse Beek will undergo stream restoration and creation of agricultural buffer zones to manage flooding and improve habitat. Finally, Ekeren-Donk will be enhanced with bioswales, infiltration gardens, and greener streetscapes to reduce strain on the sewer system.

The subzones are not designed as isolated interventions. Connectivity between them is essential. New pedestrian and cycling routes will traverse water corridors, bridging neighbourhoods and green spaces while reframing water infrastructure as civic infrastructure. Moreover, these corridors perform flood mitigation and function as public spaces, embedding the water system into daily life.

In addition to the spatial processes, the City of Antwerp employed a participatory design process that engaged institutional stakeholders, NGOs and local communities. Workshops and field visits (Fig. 13) surfaced local knowledge, identified concerns, and built support. Long-term stewardship has been embedded into the governance model through partnerships between municipal authorities, environmental organisations, and community associations. The Oude Landen Water Masterplan underscores that resilience is not merely about resisting change but about thriving through it. By investing in connections between streams and streets, nature and neighbourhoods, past and future, the Plan envisions an adaptive, inclusive, and beautiful urban landscape. This vision of the water-sensitive city moves beyond technical flood defences, offering a holistic model for ecological and social resilience.

De-composing Oude Landen: analytical tools for a water-sensitive and nature-based design | The Oude Landen Masterplan, developed by the Felixx in collaboration with the Belgian Municipality of Antwerp, the applied research institute Deltares, and the consultancy Delbaere Consulting, emerges as a significant case within the contemporary panorama of urban regeneration. It represents a paradigmatic synthesis of climate-adaptive and water-sensitive design, and social-inclusive strategies at the neighbourhood scale. Situated in a peri-urban context of transformation, the Oude Landen redevelopment confronts complex ecological, infrastructural, and social challenges typical of post-war (re) construction in Northern Europe. The Masterplan primarily addresses urgent climate adaptation needs, such as pluvial flooding, drought, and biodiversity loss, while also proactively engaging with broader urban sustainability and liveability agendas through a nature-based, community-driven approach.[15]

From this perspective, the relevance of Oude Landen within the above-mentioned research exploration lies in its capacity to explore both the transformation of the urban tissues and public realm from a mono-functional and infrastructural domain into a complex socio-ecological interface: streetscapes, in this framework, become both the stage and the agent of a multifaceted regeneration process. Moreover, being conceived within the Antwerp Waterplan (De Urbanisten, Witteveen+Bos and Common Ground, 2019), the Oude Landen project explores and develops crucial design-oriented themes such as the inter-scalar integration of Nature-based Solutions (NbS), the centrality of community engagement in adaptive processes, and the use of spatial design as a means to re-compose fragmented urban ecologies. As such, Oude Landen can be considered a critical testing ground for the CANBUR (Climate-Adaptive Nature-Based Urban Regeneration) framework developed within the research interests of NatureCityLAB (Macaione et alii, 2025).

As part of the Atlas of emblematic design cas-

The Parameter Wheel
Vulnerabilities and potentialities

Oude Landen, Felixx, Antwerp
(Belgium), 2022-2024

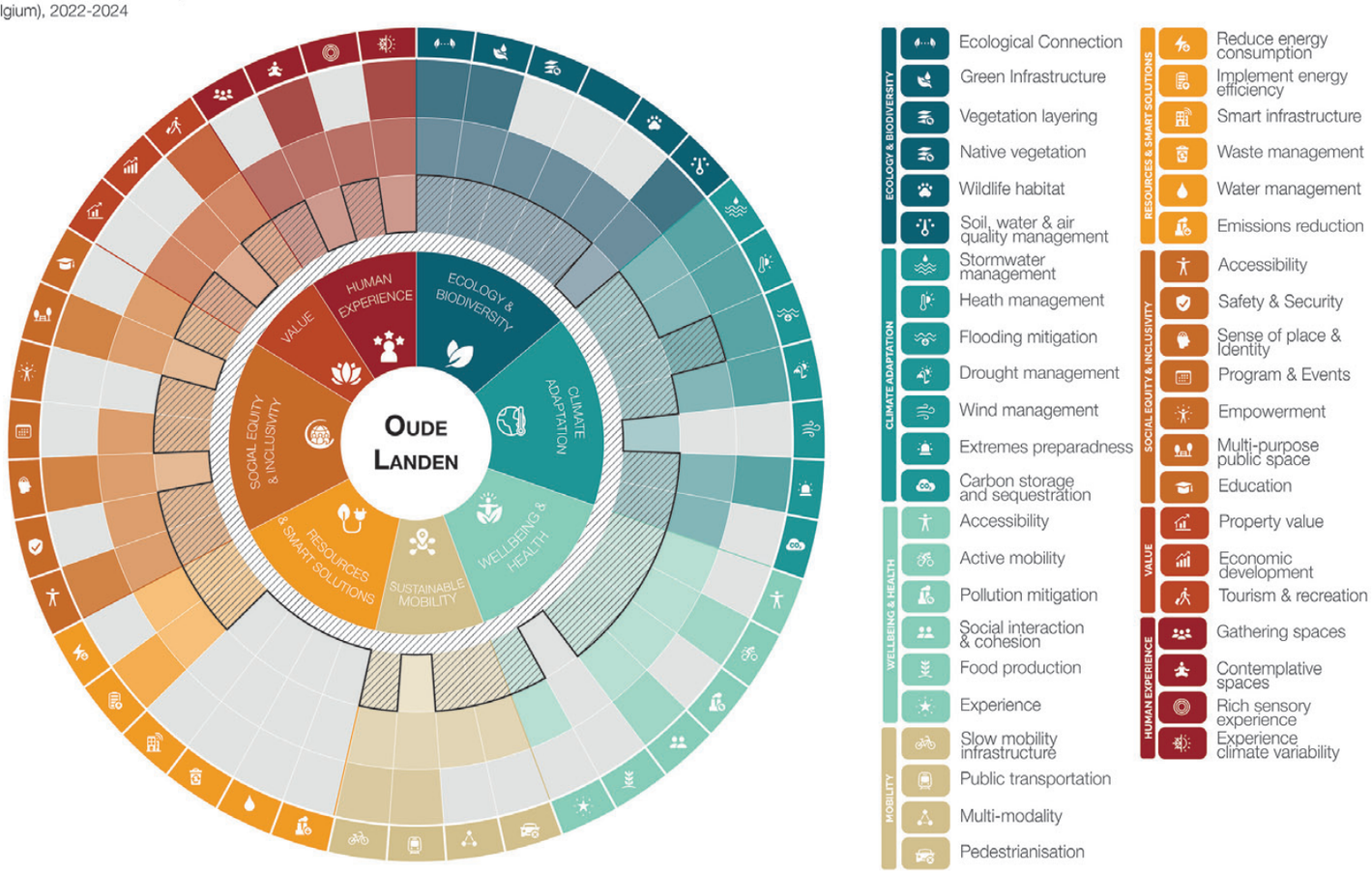


Fig. 14 | Oude Landen: the Parameter Wheel (credit: B. Andaloro, 2025).

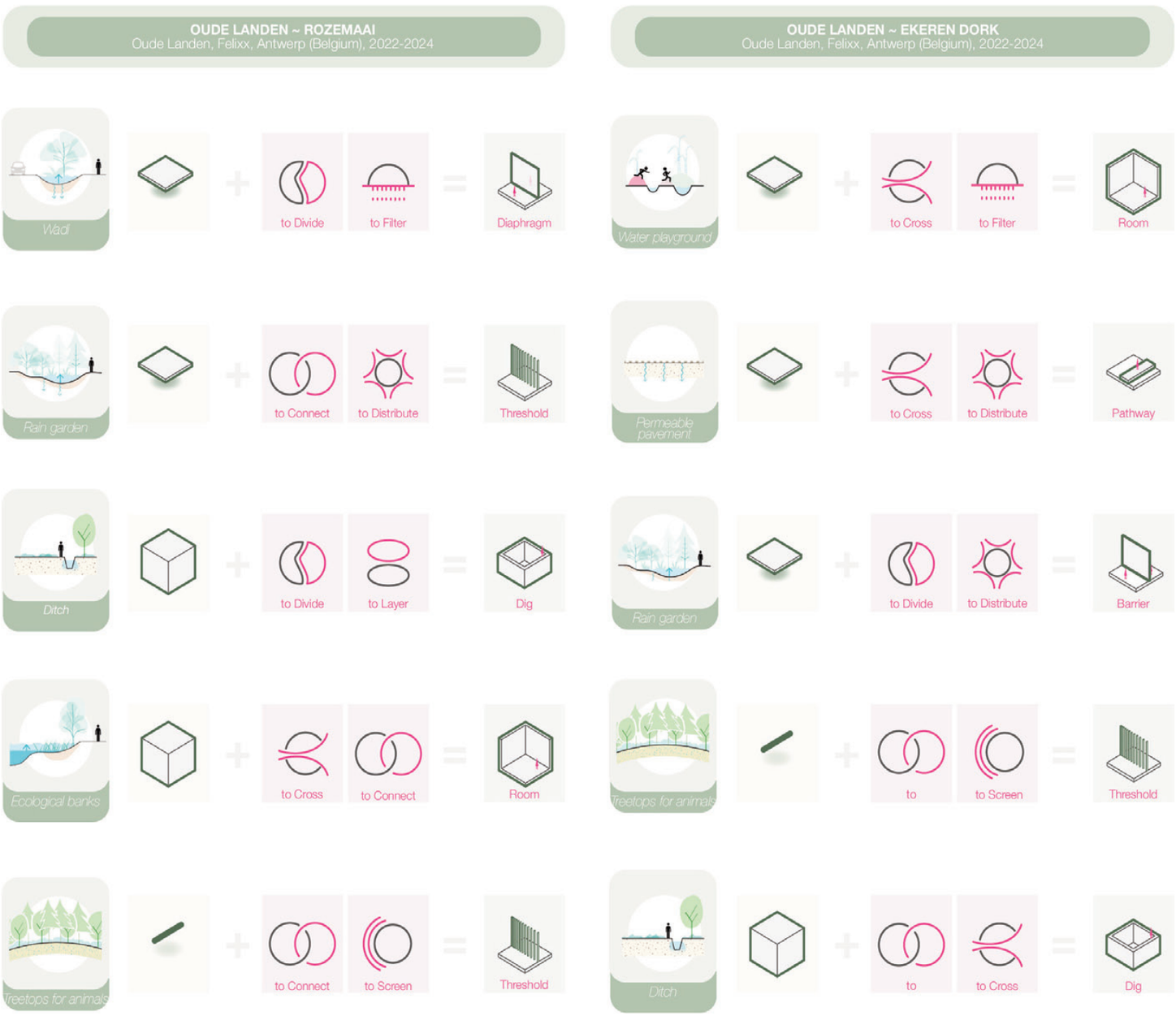
es which testify the relevance of such questions in the international debate, the project is analysed through the three analytical tools of the research methodology: (1) the Parameter Wheel, (2) the Abacus of Spatial Devices and Transformative Actions, and (3) the Invariant Architectural Characters Wheel, each of those addressing a different epistemological layer of climate-adaptive regeneration. The Parameter Wheel explores the project through eight thematic parameters and forty-two sub-parameters[16], serving as a matrix for evaluating the project's ambitions and performance. This is done by overlapping a state-of-the-art qualitative evaluation and a forecasted one, where the results of the projects are considered.

Figure 14 shows how the project aims to address an area marked by ecological and social vulnerabilities, where access to services and mobility infrastructures is very limited, as is the focus on sustainable resource use and the integration of green areas within the urban context. The project's impact on the site's current condition translates into the development of infrastructure that can positively affect both human and environmental well-being, along with actions aimed at enhancing local ecology, biodiversity, and climate. This is achieved through spatial and social interventions, while also fostering the creation of new values and opportunities for experience.

The second tool of the Abacus offers a design-oriented, spatial reading of NbS, classifying them by geometric form, spatial function, and transformative action. De-composing Oude Landen through the Abacus of Spatial Devices further articulates how NbS function within the project's compositional process.

Figure 15 shows an example of the de-composition of two subzones, the Rozemaai and the Ekeren-Donk, chosen for their predominant urban scale and neighbourhood interventions. As shown, the NbSs used here have a substantial spatial impact, which can be traced back to bi- or three-dimensional geometrical elements operating in space through transformative action. From the combination of these sequences of actions, it becomes evident how each NbS operates as an autonomous and distinctive spatial device, capable of expressing specific contextual relationships with the territory and its own spatial character. The spatial vocabulary thus generated allows one to discern a degree of compositional autonomy in each NbS, which complements its techno-natural understanding with a spatial–relational dimension.

Finally, the Invariant Architectural Characters Wheel extrapolates the project's architectural characters, organised into four recurring groups: Transdisciplinarity, Interscalarity, Multitemporality, and Multisubject. As shown in Figure 16, central elements such as equitable stakeholder participation, cross-collaboration, and integrated knowledge emerge as the primary drivers of the project, particularly in relation to its transdisciplinary and multi-subject dimensions. Looking further to the specific charac-



Previous page

Fig. 15 | Oude Landen: Abacus of NbS in Rozemaai and Ekeren Donk (credit: B. Andaloro, 2025).

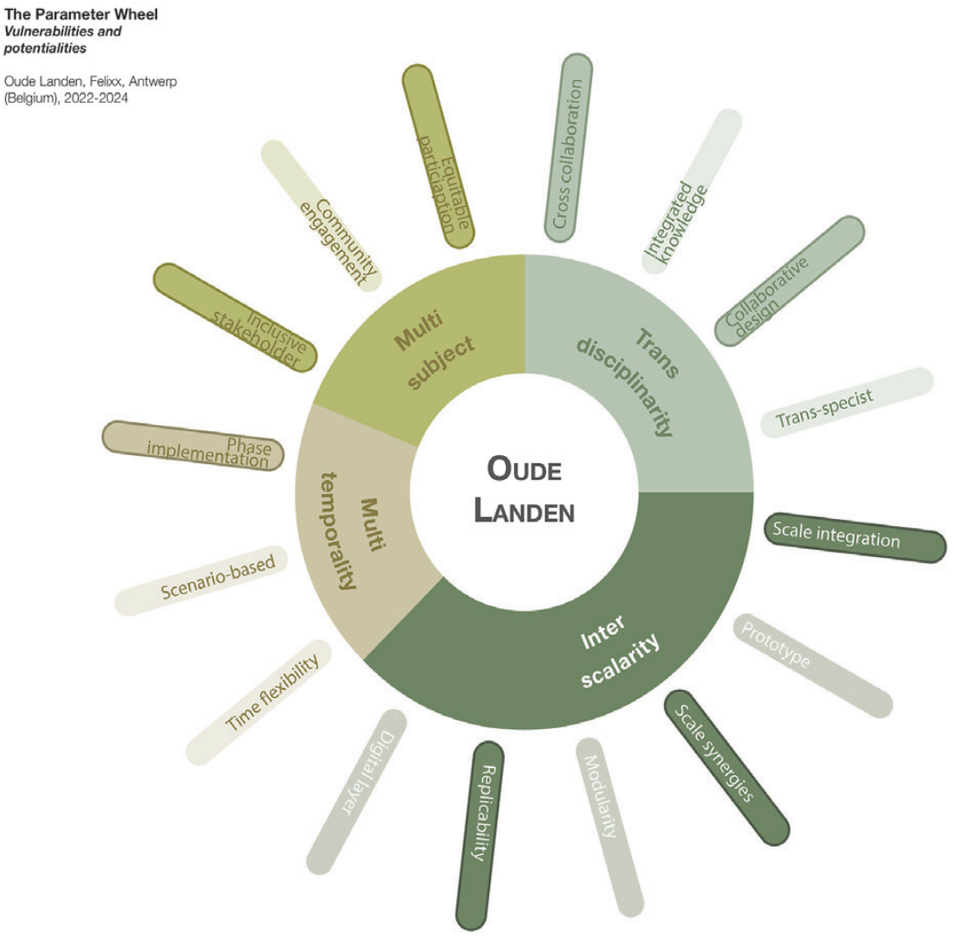


Fig. 16 | Oude Landen: Invariant Architectural Characters Wheel (credit: B. Andaloro, 2025).

ters, Oude Landen shows a strong trans-disciplinarity, merging hydrological engineering, landscape architecture, urban design, and social planning.

It also operates at multiple scales, simultaneously addressing catchment areas, neighbourhood identity, and individual streetscapes, thereby underpinning the model's replicability in (sub)urban contexts with similar features. Multi-temporality is also highlighted by the methodological tool of Phased implementation, which, from the earliest design stage, sets out the progressive evolution of NbS-based spatial transformations across the five subzones, together with accommodating gradual transitions, seasonal variations, and adaptive management over time. Finally, it institutionalises multi-stakeholder collaboration by engaging with residents, designers, and municipal actors to co-produce both the design and its narratives of care.

Through this three-stage critical analysis, it is possible to consider Oude Landen not only as a successful urban regeneration project, but also as an operational case of spatial and procedural innovation for water-sensitive design. Its integration of NbS, grounded in both spatial composition and ecological logic, confirms its relevance as a model for future urban transformations, able to address also the cultural aspects of urban regeneration.

Water, energy and work: an urban metabolism for sustainability | In the Oude Landen project, the three SDGs 6, 7, and 8 are interpreted in an integrated way, outlining a model of urban design that combines ecological sustainability, energy innovation, and local socio-economic development. In particular, SDG 6 (Clean Water and Sanitation) constitutes the core of the project, developed around a water-sensitive vision that considers water not merely as a resource to be managed, but as a generative infrastructure. Strategies such as river renaturalisation, infiltration zones, and a Water Park with a capacity of 200,000 m^3 contribute to the natural purification of stormwater, flood risk reduction, and groundwater recharge. In this way, the logic of the closed water cycle (retain, filter, reuse) is embedded in the design, promoting resilient, multifunctional management of the water resource, that is consistent with targets 6.3, 6.4, and 6.6.

Moreover, albeit indirectly, the project also contributes to SDG 7 (Affordable and Clean Energy) and SDG 8 (Decent Work and Economic Growth). The integration of designed ecological infrastructure can help reduce urban energy consumption, while wetlands and green areas improve natural ventilation and mitigate urban heat islands, thereby lowering building cooling demand. Furthermore, NbS act as passive devices for environmental energy efficiency. In terms of economic growth, the project stimulates new territorial economies related to maintenance, water management, and ecosystem care. Activities such as renaturalisation, environmental monitoring, and participatory management can generate local employment and valorise specialised professional skills. Additionally, phased planning ensures temporal continuity and equitable resource distribution. At the same time, collaboration among public bodies, businesses, and citizens – in line with SDG 17 (Partnerships for the Goals) – promotes a model of qualitative growth that reconciles environmental sustainability with economic equity. In this sense, the project contributes to a new regeneration economy, based on ecosystem services, social innovation, and the development of green skills.

The three dimensions – water, energy, and work – interweave in the project according to a metabolic and circular logic, whereby improved water management (SDG 6) generates energy benefits (SDG 7) and employment opportunities (SDG 8). Synergies also emerge with other goals, including SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), through the regeneration of public spaces and social inclusion; SDG 13 (Climate Action), via integrated adaptation and mitigation strategies; SDG 15 (Life on Land), through the restoration of river ecosystems and natural habitats; and again SDG 17 (Partnerships for the Goals), through a multi-stakeholder cooperative governance model. This systemic approach reflects the ambition of the Oude Landen project to transcend a sectoral vision of water, extending its generative capacity to the energetic, economic, and social dimensions of the city – within a framework fully aligned with the objectives of the 2030 Agenda.

Conclusions | The Oude Landen case demonstrates how water-sensitive design can serve as an operational framework for translating the complexity of climate change into integrated spatial and social strategies. The approach adopted by Felixx, grounded in the interaction among hydrological knowledge, landscape design, and participatory process-

es, shows that water can become a transformative resource— not only technical but also cultural—capable of regenerating fragile urban landscapes and redefining the relationship among infrastructure, nature, and society.

Beyond the local dimension, Oude Landen suggests developing a transferable operational model for both European and non-European cities, particularly in Euro-Mediterranean contexts, where the lack of management tools and institutional fragmentation hinders the implementation of climate adaptation strategies. The experimental methodology – based on progressive phases, a multiscalar framework, and the co-production of design with communities – constitutes a repertoire of adaptable principles rather than predefined solutions, capable of guiding new processes of nature-based urban regeneration. In this sense, transferability does not lie in the formal reproduction of design devices, but in the capacity to trigger situated processes that reinterpret the hydro-social relationships unique to each territory. The experience of Oude Landen thus contributes to consolidating Water Urbanism as a field of research and design practice, offering conceptual and operational tools to overcome the long-standing separation between hydraulic infrastructure, landscape, and public space. It invites us to recognise design as a platform of mediation between disciplines – from urban ecology to planning, from environmental engineering to sociology – and as a political practice capable of building socio-techno-natural alliances around water.

From a scientific research perspective, this contribution opens avenues for future exploration along three main directions. First, the need to deepen the spatial dimension of hydrological extremes in urban contexts – floods, droughts, and heatwaves – not as exceptional events to be contained, but as opportunities for regeneration and for improving the environmental and social quality of public spaces. Second, the development of international comparative frameworks capable of assessing the transferability of water-sensitive strategies across different geographical and climatic contexts, identifying design invariants and adaptive variables. Third, experimenting with new adaptive governance tools capable of integrating design, management, and long-term monitoring of transformations, while actively involving citizens and institutions in collective learning processes.

Finally, the Dutch experience analysed reinforces the debate on the urgency of an amphibious paradigm of urbanity, in which cities learn to coexist with water as a constitutive condition, rather than as a threat (Watson and Adams, 2011). This paradigm calls into question the role of urban design across scales as a reflective and anticipatory practice, oriented not only to risk mitigation but also to the construction of new forms of habitability. In this sense, designing with water becomes a key to regenerating the relationship between environment and society, a laboratory for rethinking the culture of design in an age of ecological transition, and a significant contribution to redefining the role of architecture and urbanism in constructing climatically and socially just futures.

Acknowledgements

NatureCityLAB would like to express its sincere gratitude to Felixx office for their valuable contribution to the writing of this article and for their willingness to share the theoretical content of their work and the graphic material published here. The contribution is the result of a common reflection of the Authors. However, the introductory paragraph has to be attributed to I. Macaione, the paragraph 'Water Urbanism: water as a creative agent in the age of climate uncertainty' to A. Raffa, the paragraphs 'Designing regeneration: methodological tools for NbS-oriented urban transformations' and 'Water, energy and work: an urban metabolism for sustainability' to B. Andaloro and A. Raffa, the paragraph 'The Water Masterplan of Oude Landen: a blueprint for nature-based to E. Redekop van der Meulen and E. Cammarata, the paragraph 'De-composing Oude Landen: analytical tools for a water-sensitive and nature-based design' to B. Andaloro, and the paragraph 'Conclusions' to all the Authors.

The contribution has been informed by the research activities from: a) the ongoing research project 'Tech4you – Technologies for climate change adaptation and quality of life improvement' through a Next Generation UE – PNRR fund assigned to University of Basilicata (PP4.3.1, PP1, Action 1 'Climate change mitigation and adaptation in urban areas: infrastructure green and blue infrastructure for the resilient city' – Scientific Referent: I. Macaione, with B. Andaloro and A. Raffa – Code ECS00000009 – CUP C43C22000400006); b) the three-year research Urban Green Shape (2022-2025), funded by PON R&I and FSE-REACT-EU – PON 'Research & Innovation' 2014-2020, Axis IV 'Education and research for recovery' – Action IV.4 'PhD programs and research contracts on innovation topics' and Action IV.6 'Research contracts on green topics' and FSE-REACT-EU; Research Contract number 38-G-14879-1 – CUP C49J2104334000, carried out by A. Raffa – Scientific Manager I. Macaione; c) the research conducted by A. Raffa as Fulbright Visiting Scholar (2023-2024) at the University of Florida (USA), College of Design, Construction and Planning and the Florida Institute for Built Environment Resilience.

Notes

1) Since 2020, design explorations of urban regeneration have been carried out in collaboration with several Italian municipalities, such as Altamura (AsVis, 2021), Sannicandro (AsVis, 2022), Santeramo, Potenza, and Matera, as a response to climate vulnerability.

2) The design explorations are carried out through two phases: 1) the first analyses projects and actions developed in significant European experiences of climate change adaptation and mitigation cases, through methodological design tools, explored later in the paper, to assess the replicability of the solutions analysed in Mediterranean climate contexts, within an Atlas; the case of Oude Landen here introduced and discussed is part of this phase; 2) the second one focuses on design experiments, by selecting design examples that are easier to replicate and less dependent on their original context, so as to test them in new territorial settings (Macaione, Raffa and Andaloro, 2025).

3) For more information on the Oude Landen project by Felixx, see the webpage: felixx.nl/projects/oude-landen-antwerpen.html [Accessed 25 September 2025].

4) For more information on the project River Tidal Park by De Urbanisten studio, see the webpage: urbanisten.nl/work/river-as-tidal-park-rotterdam [Accessed 25 September 2025].

5) For more information about the Kongjian Yu project by Turenscape, see the webpage: turenscape.com/topic/en/spongecity/index.html [Accessed 25 September 2025].

6) For more information about the Zhongguancun Life Science Park by Turenscape, see the webpage: turenscape.com/en/project/detail/35.html [Accessed 25 September 2025].

7) During heavy rainfall, these spaces channel and retain stormwater; in fair weather, they function as vibrant public realms, embedding hydrological resilience into the fabric of everyday urban life.

8) For more information about the McCoys Creek Recreation and Restoration Plan in Jacksonville, see the webpage: scapestudio.com/projects/mccoys-creek-restoration-plan/ [Accessed 25 September 2025].

9) For more information about the Moakley Park project by STOSS in Boston, see the webpage: stoss.net/projects/resiliency-waterfronts/moakley-park-resiliency-waterfronts [Accessed 25 September 2025].

10) For more information about the Green Alleys project in Los Angeles, see the webpage: salt-la.com/Green-Alleyways [Accessed 25 September 2025].

11) The Italian Pavilion TERRÆ AQUÆ– Italy and the Intelligence of the Sea at the 19th International Architecture Exhibition – La Biennale di Venezia 2025 has been curated by G. Salimei.

12) Felixx, the Rotterdam-based landscape architecture office founded in 2014, explores natural processes as active components of the urban environment rather than passive ones, integrating ecological systems into urban design to manage water, support biodiversity, and create spaces that meet both environmental and social needs.

13) Among them, it is possible to recall: Shenzhen Coastal Resilience Masterplan (China), a layered coastal system combining mangroves, dunes, reefs, and engineered infrastructure to mitigate flood and wave risks while maintaining ecological connectivity and public access; Cartagena Water as Leverage (Colombia), a constructed wetlands and coastal defenses that improve water quality, reduce flood risks, and support local livelihoods by integrating ecological and social functions.

14) Felixx has also developed the Catalogue of Nature-Based Solutions (World Bank, 2021), the main compendium of strategies for resilient urban design, documenting how ecological processes can be integrated to manage water, reduce climate risks, and enhance biodiversity.

15) The project is part of a broader regeneration project activated and developed by the Municipality of Antwerp in the last decade. Among the tools that constituted a relevant key point for Oude Landen are certainly the Waterplan Antwerp, which resonates with the relation between the city and water; Levendig Landschap (lit. Living Landscape; Stad Antwerpen, n.d.), which defines the relevant 'superparks', Groenplan Antwerpen (Stad Antwerpen, 2023), and Ekeren-centre Masterplan (Stad Antwerp and Ontwerpbureau uapS, 2016).

16) The eight Parameters are: Ecology and biodiversity; Climate adaptation; Well-being and health; Sustainable mobility; Resources and smart solutions; Social equity and inclusivity; Values; and Human experience. They have been selected by intertwining different research and operational frameworks on the topic.

References

AsVis – Alleanza Italiana per lo Sviluppo Sostenibile (2022), *Climate change – Watersquare dispositivi di rigenerazione urbana – Sperimentazioni a Sannicandro*. [Online] Available at: 2022.festivalsviluppososteniBile.it/cal/199/climate-change-watersquare-dispositivi-di-rigenerazione-urbana-sperimentazioni-a-sannicandro [Accessed 25 September 2025].

AsVis – Alleanza Italiana per lo Sviluppo Sostenibile (2021), *Climate Change – Watersquare come dispositivo di rigenerazione urbana – Sperimentazioni ad Altamura (BA)*. [Online] Available at: 2021.festivalsviluppososteni bile.it/cal/522/climate-change-watersquare-come-dispositivo-di-rigenerazione-urbana-sperimentazioni-ad-altamura-ba [Accessed 25 September 2025].

Benedict, M. A., and McMahon, E. T. (2006), *Green Infrastructures – Linking Landscapes and Communities*, Island Press, Washington (DC).

Brisotto, C., Carney, J., Macaione, I. and Raffa, A. (2023) "Cambiamenti climatici nei paesaggi di bonifica – Adattamento tra modulo e modularità | Climate change in reclamation landscapes – Adaptation between module and modularity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 62-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1442023 [Accessed 25 September 2025].

De Urbanisten, Witteveen+Bos and Common Ground (2019), *Waterplan Antwerpen – Samenvatting.* [Online] Available at: static1.squarespace.com/static/5f082078d610926644d22e00/t/5fdb212b33c6977cf5b176bf/1608196428480/Waterplan_Samenvatting.pdf [Accessed 21 September 2025].

Bologna, R. and Hasanaj, G. (2023), "Modelli evoluti per la costruzione di un catalogo NbS per la resilienza e la biodiversità | Advanced models for the construction of an NbS catalogue for resilience and biodiversity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 179-190. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13152023 [Accessed 25 September 2025].

City of Copenhagen (2012), *Cloudburst Management Plan 2012*. [Online] Available at: international.kk.dk/sites/default/files/2021-09/Cloudburst%20Management%20plan%202010.pdf [Accessed 25 September 2025].

Corner, J. (2006), "Terra Fluxus", in Waldheim, C. (ed.), *The Landscape Urbanism Reader*, Princeton Architectural Press, New York, pp. 21-34. [Online] Available at: cdland4.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/06/corner_terrafluxus1.pdf [Accessed 25 September 2025].

Corradi, M., Stevens, T., Macaione, I., Raffa, A. and Andaloro, B. (2024), "Rigenerazione climatica green degli streetscapes – L'esperienza di De Urbanisten ad Anversa | Green climate-adaptive streetscapes regeneration – The De Urbanisten Experience in Antwerp", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 60-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/165 2024 [Accessed 25 September 2025].

Dell'Acqua, F. (2020), "Città ed emergenze ambientali – Le Infrastrutture Verdi e il progetto urbano | Cities and environmental emergencies – Green Infrastructures for the urban project", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 74-81. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/872020 [Accessed 25 September 2025].

EEA – European Environment Agency (2024), *Responding to climate change impacts on human health in Europe – Focus on floods, droughts and water quality*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2800/4810 [Accessed 25 September 2025].

Hädrich Silva, R., Zwarteveen, M., Stead, D. and Kuzniecow Bacchin, T. (2024), "Bringing Ecological Urbanism and Urban Political Ecology to transformative visions of water sensitivity in cities", in *Cities*, vol. 145, article 104685, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cities.2023.104685 [Accessed 25 September 2025].

Hoban, A. (2019), "Water Sensitive Urban Design Approaches and Their Description", in Sharma, A. K., Gardner, T. and Begbie, D. (eds), *Approaches to Water Sensitive Urban Design – Potential, Design, Ecological Health, Urban Greening, Economics, Policies and Community Perceptions*, Elsevier, Duxford, pp. 25-47. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-812843-5.00002-2 [Accessed 25 September 2025].

Ingaramo, R., Negrello, M., Khachatourian Saradehi, L. and Khachatourian Saradehi, A. (2023), "Il progetto transcalare delle nature-based solutions per l'Agenda 2030 – Innovazioni e interconnessioni | Transcalar project of nature-based solutions for the 2030 Agenda – Innovations and interconnections", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 97-108. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1382023 [Accessed 25 September 2025].

Li, H., Ding, L., Ren, M., Li, C. and Wang, H. (2017), "Sponge City construction in China – A Survey of the Challenges and Opportunities", in *Water*, vol. 9, issue 9, article 594, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/w909 0594 [Accessed 25 September 2025].

Macaione, I., Raffa, A. and Andaloro, B. (2025), "Integrating transitions in climate-adaptive design – A Nature-based approach towards next resilient amphibious urban environments along Med coasts", in Sayigh, A., Trombadore, A. and Calcagno, C. (2025), *Getting to Zero - Beyond Energy Transition Towards Carbon-Neutral Mediterranean Cities – Selected Papers from the World Renewable Energy Congress Med Green Forum 2024*, Springer, Cham, pp. 109-126. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-82323-7_9 [Accessed 20 September 2025].

Macaione, I., Raffa, A. and Andaloro, B. (2024), "Climate-Adaptive Nature-Based Regenerative Urban Green Streetscapes – Design Exploration from the City of Matera", in *Sustainability*, vol. 16, issue 16, article 6811, pp. 1-29. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su16166811 [Accessed 20 September 2025].

Macaione, I., Trapani, F., Raffa, A., Andaloro, B. and Disclafani, R. (2025), "Integrating Climate Adaptation into Green Urban Regeneration a Research-by-Design Approach for Transforming Infrastructural Spaces into New Commons with NbSs", in Bibri, S. E., Resta, G., Papa, D. and Magnaye, D. (eds), *Sustainable Cities – Pioneering Approaches to Green Urbanism and Climate Resilience – GU 2023,* Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham, pp. 79-112. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-86095-9_7 [Accessed 20 September 2025].

Meyer, H., Bobbink, I. and Nijhuis, S. (eds) (2017), *Delta Urbanism – The Netherlands*, American Planning Association, Chicago.

Moscatelli, M. and Raffa, A. (2023), "Infrastrutture verdi in contesti urbani aridi – Ecologie in transizione oltre il Green Riyadh | Green infrastructure in arid urban contexts – Transitioning ecologies beyond Green Riyadh", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 75-86. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1362023 [Accessed 25 September 2025].

Mostafavi, M., Doherty, G. and Harvard University Graduate School of Design (eds) (2010), *Ecological Urbanism*, Lars Müller Publishers, Baden.

Olivieri, F. (2022), "Progettazione simbiotica per un ecosistema urbano resiliente | Symbiotic design for a resilient urban ecosystem", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 40-49. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1132022 [Accessed 25 September 2025].

Perini, K., Mosca, F. and Giachetta, A. (2021), "Rigenerazione urbana – Benefici delle Nature-based Solutions | Urban regeneration – Benefits of Nature-based Solutions", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 9, pp. 166-173. [Online] Available at: doi org/10.19229/2464-9309/9162021 [Accessed 25 September 2025].

Raffa, A. (2024), "Rigenerare con la natura in un clima che cambia – Interni urbani come giardini climatici", in Allegretti, G., Brunazzi, P., Diatta, A. L. and Ghirardini, S. (eds), *Crossroad | Incroci – IV Convegno internazionale di architettura degli interni e allestimento | International Conference On Interiors And Exhibit Design*, *Politecnico di Torino, Lingotto, Italy, September 27-29, 2023*, Accademia Adrianea Edizioni, Roma, pp. 119-130. [Online] Available at: researchgate.net/publication/394417795_RIGENERARE_CON_LA_NATURA_IN_UN_CLIMA_CHE_CAMBIA_Interni_urbani_come_giardini_climatici [Accessed 25 September 2025].

Raffa, A. (2023), "Disseny de la resiliència climàtica urbana amb solucions basades en la natura i infraestructures verdes – Reptes, problemes i bones pràctiques per a la regeneració a escala de barri", in *ANUARI d'Arquitectura i Societat Research Journal*, vol. 3, pp. 234-266. [Online] Available at: doi.org/10.4995/anuari.2023.20056 [Accessed 25 September 2025].

Rashetnia, S., Sharma, A. K., Ladson, A. R., Browne, D. and Yaghoubi, E. (2022), "A scoping review on Water Sensitive Urban Design aims and achievements", in *Urban Water Journal*, vol. 19, issue 5, pp. 453-467. [Online] Available at: doi.org/10.1080/1573062X.2022.2044494 [Accessed 25 September 2025].

Rossano, F. (2021), *Floodscapes – Contemporary Landscape Strategies in Times of Climate Change*, Nai010, Rotterdam.

Stad Antwerpen (2023), *Groenplan Antwerpen – Visienota*. [Online] Available at: www2.businessinantwerp.eu/l/480611/2023-12-19/n6y78d/480611/1702977600NRRIJwKY/00_VISIENOTA_districtsgroenplan_antwerpen__1_.pdf [Accessed 21 September 2024].

Stad Antwerpen (n.d.), *Levendig landschap – Groenplan stad Antwerpen.* [Online] Available at: antwerpen.be/nl/docs/stad/stadsvernieuwing/bestemmingsplannen/SPR_11002_221_10014_00001/SPR_11002_221_10014_00001_GROENPLAN.pdf [Accessed 21 September 2025].

Stad Antwerpen and Ontwerpbureau uapS (2016), *Masterplan Ekeren-centrum*. [Online] Available at: antwerpen.be/nl/docs/stad/stadsvernieuwing/bestemmingsplannen/SPR_11002_221_50002_00001/SPR_11002_221_50002_00001_MPc.pdf [Accessed 25 September 2025].

Waggonner and Ball Architects (2013), *Greater New Orleans – Urban Water Plan – Urban Design.* [Online] Available at: wbae.com/wp-content/uploads/2021/11/GNO-Urban-Water-Plan_Urban-Design_23Oct2013_compressed.pdf [Accessed 25 September 2025].

Waldheim, C. (2016), *Landscape as Urbanism – A General Theory*, Princeton Architectural Press, Princeton, New Jersey.

Watson, D. and Adams, M. (2011), *Design for Flooding – Architecture, Landscape, and Urban Design for Resilience to Climate Change*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. [Online] Available at: doi.org/10.1002/978 1118259870 [Accessed 21 September 2024].

World Bank Group (2021), *A Catalogue of Nature-Based Solutions for Urban Resilience*, World Bank Group, Washington (DC). [Online] Available at: hdl.handle.net/10986/36507 [Accessed 21 September 2025].

Yu, K. (2021a), "The Sponge City – Planning, Design and Political Design", in Pelsmakers, S., Newman, N. (eds), *Everything Needs to Change – Design Studio – Vol. 1*, RIBA Publishing, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781003164838 [Accessed 25 September 2025].

Yu, K. (2021b), "Qunli Stormwater Park", in Klanten, R., Stuhler, E., Ingels, B., Wade, S., Michon, D., Southgate, A. and Bastida, X. (eds), *The Ideal City – Exploring Urban Futures*, Die Gestalten Verlag, Berlin, pp. 182-185. [Online] Available at: turenscape.com/paper/detail/504.html [Accessed 25 September 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 130-143
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1862025

Article Info

Received 15 September 2025
Revised 16 October 2025
Accepted 17 October 2025
Published 30 December 2025

INVESTIRE NELLE RESIDENZE PER ANZIANI
Verso una tassonomia ESG per la rigenerazione immobiliare

INVESTING IN HOUSING FOR THE ELDERLY
Towards an ESG taxonomy for building regeneration

Anna Mangiatordi

Abstract

La crescente attenzione alle residenze per anziani sta cambiando il paradigma del mercato immobiliare, concentrando l'interesse di operatori finanziari e investitori verso la valorizzazione del comparto nella direzione della sostenibilità ESG (ambientale, sociale e di governance). Le misure introdotte dall'Unione Europea in materia di neutralità carbonica e di finanza sostenibile richiedono l'implementazione di modelli di gestione e di processi rigenerativi, articolati entro scenari integrati di decarbonizzazione e di verifica degli obiettivi dell'Agenda 2030, tali da ridurre l'impronta ambientale, generando benefici all'economia e alla società. La ricerca definisce uno strumento a supporto del progetto di pratiche abitative per anziani in chiave ESG, proponendo una tassonomia a impatto sociale positivo, tale da compensare un know-how ancora poco adeguato a sostenere questa transizione.

The growing focus on senior housing is shifting the real estate market paradigm, attracting the attention of financial operators and investors to the sector's ESG (environmental, social, and governance) sustainability. Measures introduced by the European Union on carbon neutrality and sustainable finance require implementing regenerative processes and management models within integrated decarbonisation scenarios and verifying the 2030 Agenda objectives, such as reducing the environmental footprint and generating economic and social benefits. The research defines a tool to support the design of senior housing practices from an ESG perspective, proposing a positive social impact taxonomy designed to bridge the current knowledge gap and support this transition.

Keywords

abitare inclusivo, residenze per anziani, tassonomia sociale, protocolli di certificazione, sostenibilità

inclusive living, senior housing, social taxonomy, certification protocols, sustainability



Anna Mangiatordi, Architect and PhD, is a Research Fellow and Contract Lecturer at the DiAP Department, 'Sapienza' University of Rome (Italy); she researches smart typological and technological innovation of buildings for weak users, on green technologies and low environmental impact materials, on the use of methodologies and tools for digital project control and management, also from an ESG perspective. E-mail: anna.mangiatordi@uniroma1.it

Le residenze per anziani rappresentano un ambito strategico di sviluppo nel settore delle costruzioni per il quale si prevede una crescita incrementale nei prossimi anni (SHHA, 2024). A differenza di quanto accade in altri Paesi europei, dove questa particolare tipologia edilizia ha raggiunto da tempo un'ampia diffusione (Nomisma, 2020), in Italia l'interesse per questo comparto immobiliare è in fase di avvio, con un progressivo aumento degli investimenti che si prevede si espanda ulteriormente (Savills, 2019). Gli investitori sono particolarmente attratti da questo settore, che mostra una stabilità e una redditività più elevata nel lungo periodo rispetto ad altri comparti, grazie alla sua natura anticiclica, resiliente alle fluttuazioni e alle recessioni economiche, alimentata da un aumento della popolazione anziana costante nel tempo (Colliers, 2022), tale da coniugare le istanze di decarbonizzazione dell'ambiente costruito (Harrison Street and Gensler, 2024) con il potenziale di produttività economica, unitamente ai benefici sociali ottenibili per i singoli individui e per la collettività.

La maggiore sfida riguarda l'impegno di risorse economiche e l'istituzione di fondi specifici[1] per la realizzazione di soluzioni abitative rivolte agli anziani totalmente o parzialmente autosufficienti, caratterizzate da «[…] alloggi indipendenti organizzati intorno a servizi comuni dotati di funzioni private e collettive in grado di coniugare le esigenze di autonomia della persona con quelle di socialità e di prima assistenza, privilegiando la presenza di aree di interazione per lo svolgimento di attività ricreative e la connessione con aree verdi, attrezzature sociali e sanitarie, poli culturali e infrastrutture urbane» (Arbizzani et alii, 2022, p. 223).

A questo scenario si aggiunge la necessità di far leva su un ambiente costruito digitalizzato ed energeticamente efficiente, mirando ad offrire al contempo standard elevati di qualità abitativa e di riduzione dell'impronta ambientale e delle emissioni inquinanti, anche attraverso l'adozione di protocolli di prestazione certificabili.

Le misure introdotte dall'Unione Europea in materia di finanza sostenibile[2] richiedono, anche in questo ambito, l'implementazione di modelli innovativi e di processi rigenerativi e di gestione del Patrimonio edilizio, articolati entro uno scenario integrato di decarbonizzazione (European Commission, 2019) e di verifica degli obiettivi SDGs (Sustainable Development Goals) dell'Agenda 2030 (UN, 2015), tale da ridurre gli impatti energetico-ambientali, generando al contempo effetti benefici positivi sull'economia e sulla società, attraverso Programmi di investimento e progetti di valorizzazione immobiliare orientati al raggiungimento di traguardi di sostenibilità.

In tale contesto le Istituzioni e gli operatori del settore possono intervenire mobilitando risorse finanziarie adeguate e fornendo supporto alla programmazione degli interventi e alla gestione dei processi di rigenerazione e di valorizzazione immobiliare (Nobili, 2019), con l'adozione di strumenti di governance e la definizione di metriche per il monitoraggio e la valutazione dell'impatto di sostenibilità ambientale e sociale degli interventi sostenuti (Ciaramella, Invernale and Gornati, 2023). L'innovazione di sistema che ne deriva trova il suo driver fondamentale nella spinta proveniente dalle recenti politiche comunitarie orientate al raggiungimento di standard Ambientali, Sociali e di Governance (ESG – Environmental, Social, Governance)[3], la cui finalità dovrebbe essere valutare il livello di esposizione ai rischi di impatti avversi degli investimenti, in considerazione della sostenibilità nella sua globalità (Paganin, 2021).

Tale approccio abbraccia dimensioni finora considerate intangibili che superano l'aspetto meramente economico-finanziario, fungendo da moltiplicatore di valore di qualità nei progetti, negli interventi e nella gestione dei processi di valorizzazione immobiliare (Tajani et alii, 2024), favorendo l'interesse degli investimenti nel comparto delle residenze per anziani, con evidenti implicazioni sulla rigenerazione urbana e sullo sviluppo sostenibile delle nostre città (Fig. 1).

La ricerca di seguito illustrata[4] contribuisce a questo dibattito disciplinare ponendosi come obiettivo lo sviluppo di approcci innovativi al progetto e di metodologie a supporto di processi valutativi e decisionali per la realizzazione, riqualificazione e valorizzazione di residenze per anziani in chiave ESG. A partire dalla ricostruzione del quadro regolamentare comunitario in materia di neutralità carbonica e di finanza sostenibile e dalla lettura della Tassonomia UE Ambientale e Sociale (European Union, 2021, 2022c), il contributo restituisce lo stato dell'arte sugli avanzamenti di ricerca e sui progressi operativi nel settore delle costruzioni in materia ESG, da cui emerge la necessità di una classificazione delle 'attività socio-economiche', in cui ricomprendere il comparto delle residenze per gli anziani, e sulla dimensione sociale (S) degli investimenti, che appare attualmente meno sistematica e più frammentaria di quella ambientale (E) e di governance (G), a causa della sua natura e della complessità propria delle dinamiche umane.

Lo studio si concentra quindi, con una chiave originale, sulla definizione di indicatori di performance (KPIs – Key Performance Indicators) di sostenibilità sociale, mirando a colmare il gap esistente in questo ambito e a superare incertezze e lacune nei criteri di valutazione attualmente presenti, assecondando prospettive in divenire e scenari ancora aperti della ricerca scientifica e operativa in questa direzione.

Mediante l'adozione di una metodologia comparativa viene sondata l'attitudine dei protocolli di certificazione volontari più diffusi nel mercato immobiliare a intercettare gli standard ESG, individuando criteri progettuali, evidenziandone potenzialità e limiti. Il contributo si conclude con la definizione di una Tassonomia Sociale per le residenze per anziani e di KPI di sostenibilità, coerenti con gli SDG dell'Agenda 2030.

La ricerca mira alla costruzione di uno strumento replicabile, utilizzabile come guida e supporto decisionale per investitori e progettisti che operano nel settore delle residenze per anziani, con ricadute positive anche sulla comunità scientifica, impegnata a supportare la cultura teorica della rendicontazione ESG. L'adozione dell'approccio ESG nella valutazione degli investimenti e nella determinazione delle soluzioni di progetto potrà avere importanti ricadute nello sviluppo di mercati immobiliari coerenti con le politiche europee in materia di finanza sostenibile, inclusione sociale, riduzione dell'impronta ambientale e digitalizzazione dell'ambiente costruito, con esiti rilevanti sulla produzione edilizia, in un ambito, quale quello delle residenze per anziani, potenzialmente in espansione.

Quadro di riferimento | Con il Green Deal (European Commission, 2019) l'Unione Europea ha avviato un percorso di transizione energetico-ambientale che offre opportunità significative di crescita economica e di sviluppo tecnologico per l'industria delle costruzioni, nel rispetto di alcuni obiettivi prioritari: ridurre le emissioni di gas serra entro il 2030 e raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 (European Commission, 2024); rafforzare la capacità di adattamento e resilienza ai cambiamenti climatici; accelerare la transizione verso un'economia circolare; perseguire l'obiettivo 'inquinamento zero'; proteggere, preservare e ripristinare la biodiversità e il capitale naturale; ridurre le pressioni ambientali e climatiche connesse alla produzione e al consumo (European Parliament and Council of the European Union, 2019).

Sul piano degli investimenti questo si traduce nella creazione di un sistema produttivo orientato ad attuare gli obiettivi dell'Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici e dell'Agenda 2030 (UNEP, 2024), in linea con l'SDG 8 (Lavoro dignitoso e crescita economica), orientando i flussi di capitali verso investimenti tali da integrare fattori di sostenibilità di diversa natura nella gestione e nella valutazione dei rischi finanziari, promuovendo e rafforzando la trasparenza nella misurazione e nella comunicazione delle performance di sostenibilità, attraverso la rendicontazione ESG nel rispetto di tassonomie predefinite (European Union, 2024b). Con riferimento alla Tassonomia Ambientale il Regolamento UE 2021/2139 (European Union, 2021), che integra il Regolamento UE 2020/852 (European Union, 2020), fornisce una definizione delle 'attività economiche ecocompatibili', tali da non arrecare danni significativi all'ambiente, secondo i principi DNSH (Do Not Significant Harm), ovvero in grado di contribuire a uno o più dei seguenti obiettivi: la mitigazione dei cambiamenti climatici; l'adattamento ai cambiamenti climatici; l'uso sostenibile e la protezione delle acque e delle risorse marine; la transizione verso un'economia circolare; la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento; la protezione e il ripristino della biodiversità e degli ecosistemi (European Union, 2022c).

Con la Tassonomia Sociale vengono perimetrate invece le 'attività socio-economiche', ovvero quelle in grado di consentire una 'crescita intelligente, sostenibile e inclusiva', con il perseguimento di uno o più obiettivi tra lavoro dignitoso, standard di vita e benessere adeguati per gli utenti finali e infine comunità e società inclusive e sostenibili (European Union, 2022b), tali cioè da indirizzare i flussi di capitale verso attività che comportino 'contributi sociali sostanziali' come l'istruzione, l'edilizia sociale, l'assistenza sanitaria rivolte a utenze deboli come gli anziani e alle persone maggiormente svantaggiate (IISD, 2022). In tal modo si pone la necessità di investire in asset immobiliari che valorizzino il benessere individuale e collettivo essendo accessibili e confortevoli e che offrano standard di sicurezza e salute contemplando l'implementazione di progetti nel campo dell'edilizia a vocazione sociale, con la finalità di rivitalizzare intere aree urbane e favorire la creazione di infrastrutture di comunità. Sostenibilità ambientale e inclusione sociale rappresentano quindi i principi guida per la crescita comunitaria e per lo sviluppo economico (Cangelli, 2025), considerati essenziali nelle operazioni finanziarie e valutabili concretamente nei processi di investimento che interessano l'industria delle costruzioni, essendo ormai fortemente radicati nella domanda di settore.

Stato dell'arte e finalità dello studio | Il concetto di sostenibilità ESG ha assunto nell'ultimo periodo

un'importanza estremamente rilevante per il settore delle costruzioni e nel campo degli investimenti e della valorizzazione immobiliare.

A livello globale, oltre al CRREM (Carbon Risk Real Estate Monitor)[5] volto a valutare il potenziale di decarbonizzazione dell'ambiente costruito, sono stati introdotti diversi standard per misurare le performance di interi portafogli immobiliari, tra cui il GRI (Global Reporting Initiative)[6], utile a redigere i report di sostenibilità necessari per la rendicontazione ESG, e il GRESB (Global Real Estate Sustainability Benchmark)[7], il quale ne riconosce una valutazione full points con specifiche premialità, affidando ai protocolli di certificazione volontari la misurazione della sostenibilità energetico-ambientale degli edifici interessati, in base a una serie di fattori qualificanti tra cui l'abbassamento dei consumi energetici, la riduzione delle emissioni di gas serra, la corretta gestione dell'acqua e dei rifiuti, la garanzia di ambienti salubri e sicuri, positivi per il benessere e la salute degli occupanti.

L'integrazione tra standard GRESB e protocolli di certificazione energetico-ambientale ha acquisito un'influenza sempre maggiore sugli operatori finanziari, orientati a investire su asset sostenibili ed economicamente resilienti, e a certificare i propri edifici nell'ottica di un'effettiva trasparenza e minimizzazione dei rischi, in allineamento con le istanze comunitarie di rendicontazione ESG. La certificazione secondo protocolli volontari riconosciuti consente infatti di posizionare sul mercato asset immobiliari – cui è possibile attribuire premi di locazione, tassi di occupazione e valutazioni economiche più elevate – giustificando la sostenibilità dei propri investimenti attraverso dati verificabili e comparabili, tali da facilitare le decisioni, le attività di due diligence e di gestione, l'accesso alla finanza verde e la trasparenza ESG (Confindustria Assoimmobiliare, 2022).

A completamento del GRESB iniziano ad essere disponibili strumenti[8] e standard di performance[9] per supportare l'approvvigionamento, la misurazione, la gestione e la rendicontazione del 'valore sociale' degli immobili, che contemplano fattori come il coinvolgimento degli utenti, la salute e il benessere, l'impatto sulla comunità, i diritti umani, le condizioni di lavoro e così via, secondo politiche DEI (Diversità, Equità e Inclusione) nella filiera produttiva (WGBC, 2023).

Nel settore delle costruzioni le metodologie di determinazione di criteri progettuali e di valutazione delle performance di sostenibilità sociale, correlate a quelle ambientali e di governance di programmi e progetti di investimento in ottica ESG sono ancora in fase di definizione. A scala nazionale gli avanzamenti di ricerca portati avanti in questa direzione riguardano prevalentemente il terziario direzionale, per il quale si intravedono effettive potenzialità di efficientamento energetico e decarbonizzazione (Ferrante et alii, 2024) e attività economiche o di investimento legate al terzo settore o a Enti pubblici e Istituzioni private che stanno adottando la metrica ESG come strumento per la promozione e il controllo della qualità del progetto (Tartaglia et alii, 2024), oltre che per la valutazione e la rendicontazione della sostenibilità ambientale delle proprie attività di valorizzazione e di gestione immobiliare (Alini and Martino, 2023).

Mentre per la dimensione ambientale risulta più semplice ricondurre gli indicatori di sostenibilità a una tassonomia e a una normativa tecnica più strutturata allineata agli standard europei (Dodd, Donatello and Cordella, 2021), per gli aspetti sociali tale percorso risulta essere ancora poco delineato, seppure tematiche come benessere, inclusività e accessibilità stanno portando a individuare aree di miglioramento nella misurazione dell'impatto sociale degli investimenti (Confindustria Assoimmobiliare, 2024), richiedendo tuttavia un lavoro ulteriore di affinamento dei parametri di valutazione, in relazione alle specificità del settore; gli aspetti di governance sono invece spesso legati alla peculiarità del contesto produttivo o aziendale.

In questo quadro regolamentare e produttivo in evoluzione, il comparto delle residenze per anziani può avere un impatto sociale positivo, sebbene non sia sempre semplice misurarlo mediante la definizione di KPI che possono contribuire a determinare adeguati livelli di benessere individuale e collettivo, di accessibilità e di inclusività, di qualità di vita e di relazione negli ambienti domestici, come nei contesti urbani, incidendo in modo significativo sulla rendicontazione ESG, attraverso fattori come il miglioramento della qualità abitativa, la valorizzazione della componente sociale nelle abitazioni e delle infrastrutture urbane di comunità, l'inserimento di dispositivi digitali negli edifici, l'informatizzazione dei servizi di cura e assistenza, l'abbassamento dei consumi energetici e la riduzione delle emissioni inquinanti.

In linea con la Tassonomia EU la ricerca mira a definire uno strumento a supporto delle decisioni che possa guidare la progettazione di pratiche abitative innovative per anziani in direzione ESG. Trascurando gli aspetti ambientali e di governance, il contributo si concentra sulla dimensione sociale (S) della sostenibilità. La dimensione ambientale (E) presenta infatti caratteristiche molto simili ad altri comparti e una struttura già pressoché definita, grazie all'ampia presenza di normative nazionali e tecniche di settore (CAM, DNSH, ecc.), di metodologie (LCA, LCC, etc.) e dinamiche produttive (EPD, REACH, Ecolabel, etc.) ormai consolidate; viceversa la dimensione della governance (G) può dipendere da condizioni variabili, come la natura dell'operazione immobiliare, la tipologia di finanzia-



Fig. 1 | Ederly people, social relations and urban space (credit: A. Mangiatordi, 2025).

Next page

Figg. 2, 3 | Cooperative Housing Complex wagnisART in Munich, Germany (2012-2016), PassivHaus certified, designed by Bogevischs buero architekten stadtplaner GmbH + SHAG Schindler Hable (credits: M. Heinrich, 2015).

Figg. 4, 5 | Nursing Home Passivhaus in Zamora, Spain (2019), PassivHaus certified, designed by CSO arquitectura (source: archdaily, 2015).

mento, la specificità del fondo o del gestore immobiliare, le caratteristiche di locazione e così via, per cui risulta complesso effettuarne una generalizzazione.

Approccio metodologico e indicatori di prestazione | L'assenza di una classificazione chiara e condivisa delle 'attività socio-sostenibili' rappresenta una delle principali lacune nelle politiche di sostenibilità europee. Sebbene siano state avanzate recenti proposte a livello comunitario (Platform on Sustainable Finance, 2022), queste non hanno ancora trovato attuazione concreta a causa di divergenze nei criteri di valutazione e nella definizione degli ambiti di applicazione: tale mancanza ha generato incertezze per investitori e portatori di interesse, rendendo la Tassonomia Sociale ancora frammentaria.

La Tassonomia Sociale proposta per le residenze per anziani si fonda dunque sul framework degli SDG, riconosciuto a livello internazionale come una base solida per promuovere una sostenibilità 'inclusiva', quale riferimento per l'identificazione di criteri standard e condivisi, secondo un approccio coerente con le politiche abitative e sociali di settore. A partire dal confronto con la letteratura scientifica sul tema dell'abitare inclusivo e digitale per anziani (Angelucci et alii, 2015; Arquilla and Paracolli, 2023; Attainese and Di Dario, 2024; Chaza Chimeno, Revellini and Cellucci, 2024; Villani and Romagnoli, 2023) e dall'approfondimento di casi studio efficaci che hanno ottenuto certificazioni energetico-ambientali (Figg. 2-10) sono stati individuati KPI e criteri progettuali, mediante la comparazione tra criteri derivanti dai protocolli volontari ed SDG, nel rispetto delle tassonomie comunitarie precedentemente descritte.

Ai fini della ricerca sono stati presi in considerazione i protocolli BREEAM[10], LEED[11] e WELL[12], essendo quelli più utilizzati nel settore degli investimenti immobiliari a scala nazionale. Essi differiscono tra loro per processo di certificazione, requisiti minimi obbligatori, prerequisiti e caratteristiche di attribuzione e pesatura dei crediti o punteggi in relazione a differenti aree tematiche (acqua, energia, trasporti, rifiuti, ecc.), durata e costo di implementazione. I tre protocolli presentano inoltre differenti sistemi di rating e versioni di aggiornamento che, pur mantenendo lo schema generale in relazione alle specifiche aree tematiche, adattano di volta in volta i prerequisiti e i crediti o punteggi alle peculiarità delle tipologie edilizie o degli interventi da effettuare, contemplando, seppure con pesature differenti, il perseguimento di valori E, S e G.

Le categorie e gli indicatori individuati nell'ambito di ciascun protocollo sono stati, quindi, riorganizzati definendo una Tassonomia Sociale utilizzabile come linea guida nella progettazione e come strumento di valutazione, nell'ambito di progetti di residenze e di abitazioni per anziani. Nella Tabella 1 si riporta la Tassonomia Sociale proposta, secondo cinque aree di interesse ('Access for all', 'Connectivity', 'Mobility', 'Safety', 'Sense of Community', 'Well-being'), tali da soddisfare uno o più protocolli di certificazione, ciascuna associata a criteri verificabili per contribuire agli obiettivi SDGs e più in generale alla tassonomia introdotta dalla regolamentazione comunitaria in materia ESG.

L'area di interesse 'Access for All' fa riferimento al grado in cui un ambiente, un servizio o un prodotto consente l'accessibilità per tutti, attraverso la progettazione di spazi, arredi, tecnologie e sistemi utilizzabili da tutti gli utenti senza necessità di adattamento futuro, alla scala dello spazio domestico, dell'edificio e dello spazio urbano. In tale ambito è contemplata anche la disponibilità di alloggi economicamente accessibili, per superare la condizione di povertà economica, ma anche energetica, a cui spesso gli anziani sono soggetti. L'area di progetto legata alla 'Connectivity' risponde alle istanze di informatizzazione e digitalizzazione dell'ambiente costruito, dall'uso di metodologie di modellazione informata nei progetti e nei processi all'introduzione di dispositivi ICT / IoT in grado di offrire nuovi servizi digitali, dal monitoraggio dello stato di salute al controllo dei parametri vitali, dall'attivazione di servizi di assistenza e di cura anche a distanza fino alla promozione della comunicazione attraverso i social network per lo sviluppo di nuove forme di inclusione e di partecipazione sociale.

L'area di interesse 'Mobility' riguarda tutto ciò che afferisce alla sfera della mobilità individuale e attraverso mezzi di trasporto pubblico, incidendo sul benessere individuale, migliorando il senso di autonomia e di sicurezza dell'anziano, facilitando gli spostamenti pedonali e incentivando il movimento, contribuendo alla creazione di infrastrutture di relazione nel tessuto urbano di riferimento.

La categoria 'Safety' fa riferimento da un lato alla sicurezza individuale nello spazio domestico o in ambiente urbano, supportando l'anziano nello svolgimento delle attività quotidiane, limitando le situazioni di rischio e proteggendo l'utente dall'insorgere di eventi pericolosi, dall'altro alla sicurezza collettiva, in riferimento alla gestione delle emergenze o all'intrusione da parte di terzi.

L'ultima area di progetto legata al 'Sense of Community' comprende tutti quei criteri che contribuiscono a ridurre le disuguaglianze sociali, a migliorare il senso di partecipazione e di appartenenza degli anziani all'interno della comunità, secondo valori ed esigenze condivise, migliorando il benessere, la qualità della vita e le relazioni e consentendo alle persone di interagire e sostenersi reciprocamente nello svolgimento delle attività quotidiane, nell'ot-









tica del massimo sviluppo delle proprie potenzialità.

La categoria 'Well-being' riguarda tutti quei criteri che consentono il raggiungimento di uno stato di completo benessere fisico e mentale, non necessariamente legato all'assenza di malattie o di condizioni patologiche, per favorire un invecchiamento sano e attivo e contribuire al mantenimento delle capacità funzionali durante l'intero corso di vita, riferendosi alle caratteristiche di spazi, tecnologie e arredi tali da offrire adeguate condizioni di igieniche e di comfort indoor.

Le categorie di progetto individuate possono dunque contribuire, in modo specifico e interrelato, al raggiungimento di 12 dei 17 SDG e nello specifico di:
– SDG 1 'sconfiggere la povertà' con un più facile accesso alla casa a prezzi contenuti e un adeguato supporto alle famiglie e ai caregivers, mediante la fruizione a basso costo di servizi legati alla socialità, oltre che all'assistenza e alla salute, attraverso la disponibilità di spazi e di tecnologie, anche digitali, negli ambienti domestici, negli edifici e nei contesti urbani;
– SDG 2 'sconfiggere la fame', garantendo una corretta alimentazione e promuovendo stili di vita sani e in salute;
– SDG 3 'salute e benessere', favorendo il mantenimento di un buono stato di salute attraverso la costruzione di spazi di vita adeguati tali da assicurare condizioni di comfort e benessere per gli anziani, anche con azioni preventive o riabilitative mirate al potenziamento delle capacità funzionali dell'utente, incentivando salute mentale e movimento;
– SDG 4 'istruzione di qualità', assicurando che le persone anziane possano continuare ad essere parte attiva della società, con il costante apprendimento e l'acquisizione di nuove competenze, ad esempio digitali, per gestire il proprio stato di salute e mantenere al contempo la propria identità e connessione sociale, anche prevedendo forme di condivisione intergenerazionale;
– SDG 5 'equità di genere', aumentando la partecipazione delle donne alla vita pubblica:
– SDG 6 'acqua pulita e servizi igienico-sanitari', favorendo l'accesso all'acqua potabile, risorsa vitale per garantire salute e benessere;
– SDG 7 'energia pulita e accessibile', consentendo l'approvvigionamento energetico con un più facile accesso a servizi convenienti e affidabili, che fanno uso di fonti rinnovabili, l'utilizzo di tecnologie avanzate e di impianti orientati all'efficienza energetica, alla riduzione dei consumi e al potenziamento delle risorse esistenti, aumentando la consapevolezza e incentivando comportamenti responsabili da parte di utenti e gestori;
– SDG 9 'industria, innovazione and infrastrutture', agevolando i processi di digitalizzazione dell'ambiente costruito e le innovazioni tecnologiche proprie delle infrastrutture digitali e della produzione industriale 4.0 (es. dispositivi indossabili, robotica assistiva, realtà virtuale e aumentata, veicoli elettrici, case intelligenti, ecc.) al fine di aumentare l'interoperabilità dei dati raccolti, includendo servizi digitali per la salute da attivare per il mantenimento dell'autonomia degli anziani a casa e nel contesto di quartiere, evitando l'ospedalizzazione;
– SDG 10 'ridurre le disuguaglianze', superando le disuguaglianze sociali con l'offerta di servizi accessibili a tutti, contenendo il fenomeno del digital divide, per consentire l'utilizzo di nuove funzioni digitali alla scala dell'ambiente domestico, dell'edificio e dello spazio urbano e migliorando l'indipendenza attraverso l'uso di nuove tecnologie per aumentare le opportunità di partecipazione attiva alla vita di comunità;
– SDG 11 'città e comunità sostenibili', accelerando l'efficienza energetico-ambientale degli insediamenti mediante l'ottimizzazione della logistica dei sistemi di trasporto pubblico e per la mobilità, la progettazione di aree verdi e spazi pubblici sicuri e inclusivi, la disponibilità di servizi di prossimità, la costruzione di abitazioni di qualità e la disponibilità di attrezzature per la cura, la protezione e la partecipazione sociale; l'adozione di sistemi digitali per la gestione della salute e l'approvvigionamento energetico possono contribuire ulteriormente alla realizzazione di uno sviluppo maggiormente inclusivo, sicuro, resiliente e sostenibile;
– SDG 12 'consumo e produzione responsabili', garantendo il benessere degli anziani con l'accesso all'acqua, all'energia pulita e al cibo, riducendo allo stesso tempo il consumo eccessivo delle risorse naturali;
– SDG 13 'lotta contro il cambiamento climatico', favorendo le azioni progettuali necessarie a combattere i cambiamenti climatici e i loro impatti, rafforzando la resilienza, integrando le misure di mitigazione e di adattamento nei progetti e migliorando l'educazione e la consapevolezza di gestori e utenti finali.

Nella Tabella 2 sono riportate le interrelazioni tra Tassonomia Sociale, indicatori di progetto, protocolli di certificazione e SDG: dalla tabella si evince come le singole categorie di progetto riescono a intercettare più protocolli e più SDG, viceversa non tutti i protocolli permettono di cogliere tutte le voci sociali; infatti, mentre la certificazione WELL intercetta il 98% degli indicatori, per le certificazioni BREEAM e LEED tale percentuale è pari al 39%, seppure in quest'ultimo caso essi acquisiscono una valenza prevalentemente ambientale (Figg. 11-13).

Dalla valutazione restano scoperti gli SDG 14 (vita sott'acqua), e 15 (vita sulla terra), sui quali le categorie e gli indicatori progettuali individuati (in particolare gli SDG 6, 7, 11, 12, 13) possono avere ricadute indirette e possibili sinergie; gli SDG 8 (lavoro dignitoso e crescita economica), 16 (pace, giustizia e istituzioni solide) e 17 (partnerships per gli obiettivi) hanno invece a che fare con gli aspetti di governance, e dunque di gestione e di crescita economica, sottendendo tutti gli altri.

Potenzialità e limiti dello studio | I protocolli di certificazione considerati nella comparazione presentano notevoli differenze qualitative e quantitative, in quanto utilizzano metodologie di calcolo e indicatori diversi, con pesi e punteggi variabili, non sempre confrontabili. Per quanto riguarda la dimensione ambientale, essa trova un notevole riscontro nell'adozione delle certificazioni BREEAM e LEED, sempre più orientate a favorire la decarbonizzazione di pari passo all'efficientamento energetico degli edifici.

Per quanto riguarda la dimensione sociale l'attenzione si concentra sulla definizione delle variabili spaziali e tecnologiche chiave con cui è possibile produrre 'valore sociale' – dalle relazioni con lo spazio pubblico alla vicinanza di aree verdi e pedonali, al contributo offerto dalla mobilità sostenibile, alla presenza di attrezzature e servizi per lo svolgimento di attività condivise, alla digitalizzazione di spazi e servizi e così via – e dunque essa fa riferimento a tutte quelle soluzioni rivolte ai singoli individui e alle comunità interessate; di questo si trova riscontro anche nella certificazione WELL, sebbene essa non contempli alcune categorie relazionali fondamentali per il comparto.

Alcune tematiche e indicatori individuati non sono pienamente affrontati dai protocolli di certificazione: ad esempio nessuno di essi affronta il tema della digitalizzazione attraverso l'uso del BIM quale







Figg. 6-8 | Housing for senior citizens in Barcelona, Spain (2011-2017), PassivHaus certified, designed by Pere Joan Ravetllat, Carme Ribas, and Nicolás Markuerkiaga (source: premiosdearquitectura.es, 2017).





Figg. 9, 10 | Elderly Care Skärvet in Vaxyo, Sweden (2017-2019), LEED certified, designed by Kjellander Sjöberg (credits: Kjellander Sjöberg, 2017).

metodologia ormai imprescindibile per la gestione di progetti e processi (Mangiatordi, 2022); il tema dell'accessibilità per tutti e del benessere fisico e mentale è affrontato solo nella certificazione WELL, come quello della sicurezza individuale e collettiva nell'area di intervento, trattato comunque parzialmente per i soli aspetti di gestione delle emergenze. Anche quando più strumenti contemplano la presenza dello stesso indicatore, le aree di incidenza – ambientale o sociale – e i metodi di valutazione sono molto diversi tra loro, come ad esempio per la vicinanza ai mezzi di trasporto pubblico, per la gestione della qualità ambientale indoor e così via.

In previsione di avanzamenti futuri della ricerca, risulta opportuno evidenziare come sia necessario verificare la rispondenza degli indicatori alle normative nazionali, regionali, locali, tecniche e tipologiche di settore, che nel caso delle residenze per anziani è abbastanza eterogenea su tutto il territorio nazionale e ancora in fase di perimetrazione. Questo anche al fine di raccogliere dati comparabili e aggregabili per migliorare la struttura del modello proposto, nonché le attività di monitoraggio e l'efficacia della rendicontazione ESG.

Tra i limiti dello studio si segnala la necessità di estendere la metodologia adottata ad altri protocolli internazionali – come ad esempio il Wired Score[13], rivolto maggiormente alla connettività digitale, o il LEED Sites[14], riferito specificatamente agli spazi aperti – nonché di aggiornare i criteri contestualmente all'aggiornamento dei protocolli, come nel caso della certificazione LEED, da poco giunta alla versione V5. Si rende necessaria inoltre l'estensione della ricerca ai protocolli nazionali GBC Quartieri[15], GBC Historic Buildings[16] e GBC Home[17], tenuto conto della peculiarità dei modelli urbani e residenziali e delle caratteristiche storico-costruttive degli edifici e delle abitazioni, propri della realtà italiana, escludendo altri standard (come ad esempio il DGNB[18], per la specificità al contesto tedesco) non riferibili al comparto edilizio nazionale. Infine, con riferimento alla scelta di soluzioni tecnologiche, di prodotti e servizi, si ravvisa la possibilità di integrare la ricerca con valutazioni Social-LCA[19] lungo l'intero ciclo di vita di progetti e investimenti.

In linea di principio si può affermare che molti aspetti richiesti dalla Tassonomia UE fanno già parte delle certificazioni analizzate e dunque che i criteri individuati nell'ambito dei protocolli esaminati costituiscono una base di successo per soddisfare i principi della Tassonomia Sociale. Tuttavia tali requisiti dovranno essere aggiornati e soggetti a nuova verifica nel caso di future estensioni della Tassonomia EU, in particolare per le dimensioni della sostenibilità e della governance, ancora in fase di sviluppo.

Negli aspetti di governance potrebbero essere incluse, ad esempio, procedure per la pulizia e la sanificazione degli ambienti, piani per la preparazione alle emergenze, programmi di assistenza e salute che prevedono il coinvolgimento degli utenti e di figure esterne, politiche per la salute mentale, mentre per gli aspetti ambientali potrebbero essere introdotte campagne per il controllo della qualità ambientale indoor attraverso test e monitoraggi in loco, con la finalità di migliorare il benessere e le condizioni di salute degli utenti finali; in ogni caso la Tassonomia definita non si considera conclusa ma soggetta ad ulteriori aggiustamenti futuri.

In una fase successiva della ricerca, di carattere maggiormente sperimentale, si prevede la costruzione di uno strumento interattivo, a partire dalla Tassonomia Sociale, integrata a indicatori di sostenibilità ambientale (E) e di governance (G), basato su fogli KPI strutturati su piattaforma parametrica BIM, utilizzabile per il controllo della qualità tipologico-prestazionale ed economico-gestionale dei progetti. Seguirà l'applicazione a casi studio reali, selezionati tra asset immobiliari specifici, nonché la verifica e la valutazione d'impatto ulteriore dei risultati in termini di obiettivi di intervento – in relazione alla suscettività spaziale e tecnologico-impiantistica degli immobili interessati, alla caratterizzazione degli spazi aperti e alle relazioni con il tessuto insediativo – e la definizione delle priorità d'investimento, prevedendo il coinvolgimento di società di gestione immobiliare e portatori di interesse, per consentire la transazione verso attività di Ricerca e Sviluppo.

Il consolidamento della Tassonomia Sociale, delle metodologie e dello strumento implementato passerà anche attraverso l'estensione ad altre tipologie edilizie a connotazione sanitario-assistenziale (ospedali, case di cura e case di comunità, ecc.), sociale (nelle forme di coabitazione, alloggi intergenerazionali e multi-living) e per utenze speciali (tra cui disabili, immigrati, studenti fuori sede), secondo criteri di replicabilità e adattabilità.

Riflessioni conclusive e impatti futuri | Le recenti politiche internazionali e gli impegni assunti dall'Unione Europea in materia di neutralità carbonica e di finanza sostenibile stanno imponendo nuovi approcci alla progettazione e alla gestione dell'ambiente costruito, con importanti ricadute sugli investimenti in direzione ESG. Nel mercato immobiliare la scelta dell'investimento 'verde' continua a rappresentare un vettore trainante, cui è possibile attribuire un 'valore ambientale' quale fattore premiante, giustificato dalla presenza di edifici a elevata efficienza energetica e a basse emissioni di carbonio in linea con gli obiettivi climatici comunitari, comprovato dall'ottenimento di certificazioni energetico-ambientali e dal soddisfacimento di indicatori effettivamente misurabili.

Per contro gli investimenti in attività 'socialmente sostenibili' mostrano confini più labili, basati su principi e obiettivi non sempre quantificabili, volti cioè a produrre 'valore sociale', ovvero a valutare gli impatti positivi in termini di riduzione delle disuguaglianze, restituendo lavoro dignitoso alle persone, benessere e qualità della vita, contribuendo alla creazione di comunità intelligenti e inclusive. Gli aspetti di governance riguardano invece l'implementazione di processi, modalità e procedure volte a supportare il 'valore economico-gestionale' degli investimenti nel lungo periodo, in relazione alle specificità dell'attività finanziaria o dell'organizzazione di riferimento.

Ad oggi non esiste una tassonomia riconosciuta che consenta agli operatori del mercato delle residenze per anziani di dimostrare l'allineamento delle proprie attività di investimento e di valorizzazione immobiliare ai criteri della regolamentazione comunitaria ESG, attraverso metodologie e approcci condivisi. Parallelamente agli scenari di innovazione sociale e tecnologica (Gaspari and Busacca, 2017) che si prospettano permangono alcune barriere ostative, come la mancanza di competenze specialistiche e una tendenziale resistenza culturale al cambiamento. A scala nazionale le barriere allo sviluppo di approcci ESG nelle residenze per anziani riguardano più specificatamente: 1) aspetti normativi, per cui si riscontra una disomogeneità regolamentare sulle RSA con approcci diversi a seconda delle Regioni e un quadro incerto per le residenze per anziani, che si configurano come un comparto ancora poco consolidato rispetto ad altri Paesi Eu-

SOCIAL TAXONOMY	SOCIAL VALUE
ACCESS FOR ALL	It refers to the degree to which an environment, service, or product enables accessibility for all through the design of spaces, furnishings, technologies, and systems that can be used by all users without the need for future adaptation, at scales ranging from the domestic to the building to the urban. The concept of accessibility also includes the availability of affordable housing to address the conditions of economic and energy poverty that older people face.
CONNECTIVITY	It responds to the requests for computerization and digitalization of the built environment, from the use of Building Information Modeling methodologies in projects and processes, to the introduction of ICT / IoT devices capable of offering new digital services – from monitoring the state of health, to the control of vital parameters, to the activation of assistance and care services even remotely – up to the promotion of communication through social networks, towards the development of new forms of inclusion and social participation.
MOBILITY	It concerns everything related to individual mobility and transport. These aspects can impact individual well-being, improving the elderly person's sense of autonomy, independence and safety, facilitating pedestrian travel and encouraging movement, contributing to the creation of relational infrastructures in the urban fabric of reference.
SAFETY	It refers both to individual safety in the domestic space or in an urban environment, supporting the elderly in carrying out daily activities and limiting risk situations, protecting the user from the onset of dangerous events, and to collective safety, in reference to the management of emergencies or intrusions by third parties.
SENSE OF COMMUNITY	It includes all those criteria that contribute to reducing social inequalities, improving the sense of participation and belonging of the elderly within the community, according to shared values and needs, improving well-being, quality of life and social relationships, allowing people to interact with each other, supporting each other in carrying out daily activities, with a view to maximum development of their potential.
WELL-BEING	It relates to all those criteria that guarantee a state of complete physical and mental well-being, not necessarily linked to the absence of disease or pathological conditions, promoting healthy and active ageing and contributing to the maintenance of functional capabilities throughout the entire life course. It, therefore, refers to all those characteristics of spaces, technologies and furnishings that guarantee adequate indoor comfort and maintain adequate hygienic conditions in environments, with beneficial effects on users' health.

Tab. 1 | Social Taxonomy for Senior Residences (credit: A. Mangiatordi, 2025).

ropei; 2) fattori sociali, legati ad esempio al fenomeno del digital divide, molto diffuso tra gli over 75 (ISTAT, 2024), che possono limitare l'implementazione di soluzioni tecnologiche ICT / IoT nei programmi di investimento e nei progetti; 3) barriere economiche a causa di Capex molto alti per gli interventi di nuova costruzione o di retrofit promossi dai diversi portatori di interesse, principalmente investitori e gestori, e del costo spesso elevato di spazi, dotazioni tecnologiche e servizi offerti, con rette onerose per gli utilizzatori finali.

Gli avanzamenti proposti nel presente studio sono pertanto rivolti non solo alla comunità accademica ma anche agli operatori del settore, quale assunto teorico di raccordo tra ricerca scientifica e mercato immobiliare, entro una visione strategica a lungo termine della sostenibilità nella sua globalità. I risultati ottenuti presuppongono il consolidamento di un approccio sistemico alla misurazione dell'impatto ESG per le residenze per anziani attraverso la definizione di indicatori che non si limitano a considerare la sola componente energetico-ambientale, come già avviene per altri comparti, ma che puntano a estendere la propria efficacia anche alla dimensione sociale, quale aspetto di valutazione degli investimenti, dei progetti e degli interventi di rigenerazione non più trascurabile.

Tale sfida richiede l'impegno di risorse economiche e l'adozione di strumenti di governance adeguati per contribuire in modo decisivo a ridefinire la qualità dell'ambiente costruito, evidenziando l'importanza del benessere individuale e delle relazioni sociali, unitamente all'accrescimento del valore finanziario dell'operazione immobiliare.

I tempi sembrano essere sufficientemente maturi per collocare il comparto delle residenze per anziani al centro dei programmi di investimento e di rigenerazione immobiliare in direzione ESG, tali da valorizzarne la socialità, i servizi rivolti alle famiglie e alle fasce più deboli della popolazione, entro modalità di gestione sostenibili, fondamentali per la salvaguardia dell'ambiente. Lo studio illustrato punta a rafforzare questa direzione, mediante la diffusione di strumenti affidabili, con la finalità di accompagnare il mercato immobiliare nella comprensione delle regolamentazioni comunitarie, valorizzando la cultura teorica della rendicontazione e promuovendo nuovi significati di valore per la sostenibilità in chiave ESG – ambientale, sociale e di governance – nelle residenze per anziani, secondo un approccio realmente integrato e misurabile.

Residential senior housing represents a strategic area of development in the construction sector, with incremental growth expected in the coming years (SHHA, 2024). Unlike other European countries, where this type of building has been widespread for some time (Nomisma, 2020), in Italy, interest in this real estate sector has only recently begun, with a progressive increase in investments expected to continue expanding (Savills, 2019). Investors are particularly attracted to this sector, which shows higher long-term stability and profitability than other sectors, thanks to its anti-cyclical nature and resilience to economic fluctuations and recessions. This growth is fuelled by a steady increase in the elderly population (Colliers, 2022), allowing it to combine demands for decarbonising the built environment (Harrison Street and Gensler, 2024) with the potential for economic productivity and social benefits for individuals and the community.

The greatest challenge concerns the commitment of economic resources and the establishment of specific funds[1] for the creation of housing solutions for the totally or partially self-sufficient elderly, characterised by independent housing organised around standard services and equipped with private and collective functions capable of combining the person's needs for autonomy with those of sociability and primary care. This approach favours the presence of areas for recreational activities and for connection with green areas, social and health facilities, cultural hubs, and urban infrastructure (Arbizzani et alii, 2022).

Added to this scenario is the need to leverage a digitised, energy-efficient built environment, aiming to offer, at the same time, high standards of living quality while reducing environmental footprint and pollutant emissions, notably through the adoption of certifiable performance protocols. The measures introduced by the European Union in the field of sustainable finance[2] also require the implementation of innovative models, regenerative processes, and management of the built heritage. These must be articulated within an integrated decarbonisation scenario (European Commission, 2019) and include verification of the Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda (UN, 2015). It is intended to reduce environmental impacts while generating positive economic and societal benefits through investment programmes and real estate valorisation projects that advance sustainability goals.

In this context, institutions and operators in the sector can intervene by mobilising adequate financial resources and providing support for the planning of interventions and the management of regeneration and property valorisation processes (Nobili, 2019), with the adoption of governance tools and the definition of metrics for monitoring and assessing the environmental and social sustainability impact of the interventions supported (Ciaramella, Invernale and Gornati, 2023). The system innovation that derives from this finds its fundamental driver in the drive coming from the recent EU policies oriented towards the achievement of Environmental, Social, and Governance (ESG – Environmental, Social, Governance)[3], standards whose aim should be to assess the level of exposure to the risks of adverse impacts of investments, in consideration of sustainability as a whole (Paganin, 2021).

This approach embraces dimensions hitherto considered intangible that go beyond the merely economic-financial aspect, acting as a multiplier of quality value in projects, interventions and the management of real estate valorisation processes (Tajani et alii, 2024), consolidating the interest of investments in the senior housing sector, potentially growing, in view of its positive social impact, with obvious implications on urban regeneration and the sustainable development of our cities (Fig. 1).

The research presented below[4] contributes to this disciplinary debate by developing innovative project approaches and methodologies to support evaluation and decision-making processes for the realisation, redevelopment, and valorisation of senior housing residences from an ESG perspective. Starting from the reconstruction of the EU regulatory framework on carbon neutrality and sustainable finance and from the reading of the EU Environmental and Social Taxonomy (European Union, 2021, 2022c), the contribution provides the state of the art on research and operational progress in the construction sector on ESG, from which emerges the need for a classification on 'socio-economic activities', in which it is possible to include the industry of residences for senior housing, and on the social dimension (S) of investments, which currently appears less system-

atic and more fragmentary than the environmental (E) and governance (G) dimensions, due to its nature and the complexity inherent to human dynamics.

The study, therefore, focuses on an original key, on the definition of Key Performance Indicators (KPIs) of social sustainability, aiming to fill the existing gap in this area and to overcome uncertainties and gaps in the evaluation criteria currently in place, supporting the evolving perspectives and still open scenarios of scientific and operational research in this direction. Adopting a comparative methodology, this study examines the ability of the most widely used voluntary certification protocols in the real estate market to meet ESG standards, identifying their design criteria and highlighting their potential and limitations. The contribution concludes with the definition of a Social Taxonomy for residences for older people and sustainability KPIs, consistent with the SDGs of the 2030 Agenda.

The research aims to develop a replicable tool that serves as a guide and decision support for investors and planners operating in the residential care sector, with positive repercussions for the scientific community, which is committed to supporting the theoretical culture of ESG reporting. The adoption of the ESG approach in the assessment of investments and in the determination of project solutions may have significant repercussions in the development of real estate markets consistent with European policies on sustainable finance, social inclusion, reduction of the environmental footprint and digitisation of the built environment, with relevant outcomes on building production, in an area, such as that of residences for older people, that is potentially expanding.

Reference framework | With the Green Deal (European Commission, 2019) the European Union has launched an energy-environmental transition pathway that offers significant opportunities for economic growth and technological development for the construction industry, while respecting some priority objectives: reduce greenhouse gas emissions by 2030 and achieve climate neutrality by 2050 (European Commission, 2024); strengthen resilience and adaptive capacity to climate change; accelerate the transition to a circular economy; pursue the 'zero pollution' objective; protect, preserve and restore biodiversity and natural capital; and reduce environmental and climate pressures related to production and consumption (European Parliament and Council of the European Union, 2019). On the investment side, this translates into the creation of a production system oriented towards implementing the goals of the Paris Agreement on Climate Change and the 2030 Agenda (UNEP, 2024), in line with SDG 8 (Decent work and economic growth), directing capital flows towards investments that integrate sustainability factors of different natures in the management and assessment of financial risks, promoting and strengthening transparency in the measurement and communication of sustainability performance, through ESG reporting in compliance with pre-defined taxonomies (European Union, 2024b).

With reference to the Environmental Taxonomy, the EU Regulation 2021/2139 (European Union, 2021), which complements the EU Regulation 2020/852 (European Union, 2020), defines 'environmentally friendly economic activities' such that they do not cause significant damage to the environment, according to the Do Not Significantly Harm (DNSH) principles. That is, they contribute to one or more of the following objectives: climate change mitigation; adaptation to climate change; sustainable use and protection of water and marine resources; transition to a circular economy; prevention and reduction of pollution; protection and restoration of biodiversity and ecosystems (European Union, 2022c).

With the Social Taxonomy, instead, 'socio-economic activities' are delimited, namely those capable of enabling 'smart, sustainable and inclusive growth', with the pursuit of one or more objectives between decent work, adequate standards of living and well-being for end users and, finally, inclusive and sustainable communities and societies (European Union, 2022b). It means directing capital flows towards activities that make 'substantial social contributions' such as education, social housing, and health care aimed at weak users such as seniors and the most disadvantaged (IISD, 2022). Thus, there is a need to invest in real estate assets that enhance individual and collective well-being by being accessible and comfortable, offering high health and safety standards, and by implementing social housing projects to revitalise entire urban areas and foster the creation of community infrastructure.

Environmental sustainability and social inclusion are therefore the guiding principles for community growth and economic development (Cangelli, 2025), which are considered essential in financial transactions and can be concretely evaluated in investment processes involving the construction industry, as they are now firmly rooted in the sector's demand.

State of the art and purpose of the study | The concept of ESG sustainability has become highly relevant to the construction sector and to real estate investment and development in recent times. At a global level, in addition to the CRREM (Carbon Risk Real Estate Monitor)[5], which assesses the decarbonisation potential of the built environment, various standards have been introduced to measure the performance of entire real estate portfolios. These include the GRI (Global Reporting Initiative)[6], which helps draw up the sustainability reports required for ESG reporting, and the GRESB (Global Real Estate Sustainability Benchmark)[7], GRESB awards a full points assessment with specific rewards, relying on voluntary certification protocols for the measurement of the energy-environmental sustainability of the buildings concerned, based on a series of qualifying factors, including the lowering of energy consumption, the reduction of greenhouse gas emissions, proper water and waste management, and the guarantee of healthy and safe environments, all positively affecting the well-being and health of occupants.

The integration of GRESB standards and environmental-energy certification protocols has gained increasing influence among financial operators, who are now moving towards investing in sustainable, economically resilient assets. These operators certify their buildings to achieve adequate transparency and minimise risk, in alignment with EU ESG reporting requirements. Indeed, certification according to recognised voluntary protocols allows real estate assets – to which higher rental premiums, occupancy rates, and economic valuations can be attributed – to be positioned on the market, justifying the sustainability of their investments through verifiable and comparable data, thus facilitating decision-making, due diligence, management activities, access to green finance, and ESG transparency (Confindustria Assoimmobiliare, 2022).

Complementing the GRESB, tools[8] and performance standards[9] are beginning to be available to support the procurement, measurement, management, and reporting of the 'social value' of real estate, covering factors such as user involvement, health and well-being, community impact, human rights, working conditions, and so on, according to DEI (Diversity, Equity, and Inclusion) policies in the supply chain (WGBC, 2023).

In the construction sector, methodologies for determining design criteria and evaluating social sustainability performance, correlated with environmental performance and governance of investment programmes and projects from an ESG perspective, are still being defined. On a national scale, the progress of research in this direction mainly concerns the tertiary sector, for which there is a real potential for energy efficiency and decarbonisation (Ferrante et alii, 2024) and economic or investment activities relat-

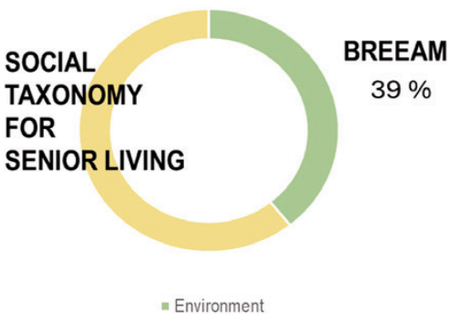


Fig. 11 | Incidence of BREEAM criteria on the Social Taxonomy for Senior Residences (credit: A. Mangiatordi, 2025).

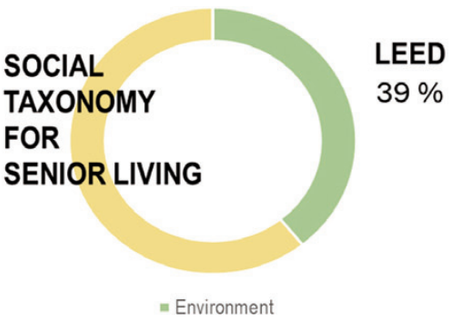


Fig. 12 | Incidence of the LEED criteria on the Social Taxonomy for Senior Residences (credit: A. Mangiatordi, 2025).

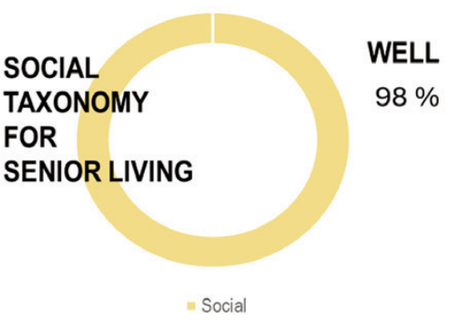


Fig. 13 | Incidence of the WELL criteria on the Social Taxonomy for Senior Residences (credit: A. Mangiatordi, 2025).

SOCIAL TAXONOMY	SOCIAL KPIs	URBAN SCALE	BUILDING SCALE	HOME SCALE	SOCIAL SUB-KPIs	RANGE	UNITY OF MEASURE	BREEAM	LEED	WELL	SDGS
ACCESS FOR ALL	ACCESSIBILITY	✓			Accessibility to public transport	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	various	E	E	S	10, 11, 12
		✓			Accessibility to bike / pedestrian paths	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	various	E	E	S	10, 11, 12
		✓	✓		Accessibility to collective services	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	various	E	E	S	3, 10, 11
		✓	✓		Accessibility to health and assistance services	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	various	E	E	S	3, 10, 11
		✓	✓	✓	Accessibility to digital services	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	various	E	E	S	9
		✓	✓		Accessibility to primary services (e.g. market)	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	various	E	E	S	2, 10, 11
		✓	✓	✓	Accessibility to outdoor spaces (e.g. garden, food production)	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	various	E	E	S	3, 10, 11
		✓			Accessibility to parks and public spaces	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	various	E	E	S	3, 10, 11
		✓	✓	✓	Access for all (e.g. wayfinding)	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	various			S	1, 4, 10, 11, 16
		✓	✓	✓	Accessibility to energy services	> 3	KWh / apartment	E	E	S	1, 7, 10, 11, 12
			✓	✓	Affordable housing	Depende on location and housing typology	€ / smq			S	1, 10, 11
	ADAPTABILITY	✓	✓	✓	Adaptability of spatial, technological, and furnishing solutions to future needs	Use of dry partitions / integrabiility of IoT	yes / no		E	S	3, 9
	CUSTOMIZATION	✓	✓	✓	Customization of spatial, technological, and furnishing solutions to future needs	Not all likely / Not very likely / Somewhat likely / Very likely / Extremely likely	Likert scale 1-5	E	E	S	3, 9
	FLEXIBILITY	✓	✓	✓	Flexibility of spaces and technological solutions	Use of dry partitions and sliding doors	yes / no	E	E	S	3, 9
	FRUIBILITY	✓	✓	✓	Comfort of use and manoeuvre	Depende on Housing typology	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law			S	3, 9
	MODULARITY	✓	✓	✓	Modularity of spatial, technological, and furnishing solutions to future needs	Use of prefabricate solutions	number, metres ot smq	E	E	S	3, 9, 12
	REVERSIBILITY	✓	✓	✓	Reversibility of spatial, technological, and furnishing solutions to future needs	Use of removable components	number, metres ot smq	E	E	S	3, 9, 12
CONNECTIVITY	INTEGRABILITY OF ICT / IOT SOLUTIONS	✓	✓	✓	Integration of domotic systems / building automation	IoT / BMS	% / smq	E	E	S	9
	INTEGRATION WITH BIM TOOLS	✓	✓	✓	Integrability and interoperability with BIM tools	Defined by Technical Law	Interoperability Standard and Protocols				9
	INTEGRATION OF DIGITAL SERVICES	✓	✓	✓	Presence of digital services	from 1 to 5 (< 800 meters)	number				9
SAFETY	SAFETY AND SECURITY	✓	✓	✓	Management of emergencies	Presence of an emergency plan	yes / no			S	1, 3, 13
		✓	✓	✓	Personal and collective safety and security	IoT / BMS for safety and security	% / smq			S	9, 13

Tab. 2a | Social Taxonomy for Senior Residences: KPIs, certification protocols and SDGs (credit: A. Mangiatordi, 2025).

SOCIAL TAXONOMY	SOCIAL KPIs	URBAN SCALE	BUILDING SCALE	HOME SCALE	SOCIA SUB-KPIs	RANGE	UNITY OF MEASURE	BREEAM	LEED	WELL	SDGS
SENSE OF COMMUNITY	LOCATION AND TRANSPORTATION	✓	✓	✓	Proximity to public transport	0 < building entrance < 800	metres	E	E	S	3, 10, 11, 12
		✓	✓	✓	Proximity to parks and public spaces	0 < building entrance < 800	metres	E	E	S	3, 10, 11, 12
		✓	✓	✓	Proximity to bike / pedestrian paths	0 < building entrance < 800	metres	E	E	S	3, 10, 11, 12
	INFRASTRUCTURES AND SERVICES	✓	✓		Proximity to collective services	from 1 to 5 (< 800 meters)	number	E	E	S	3, 10, 11, 12
		✓	✓		Proximity to health and assistance services	from 1 to 5 (< 800 meters)	number	E	E	S	3,10, 11, 12
		✓	✓		Proximity to primary services (e.g. pharmacy)	from 1 to 5 (<800 meters)	number	E	E	S	3, 10, 11, 12
		✓	✓	✓	Proximity to outdoor spaces (e.g. garden, food production)	0 < building entrance < 800	metres	E	E	S	3, 10, 11
		✓	✓	✓	Proximity to spaces and services for interaction	from 1 to 5 (< 800 meters)	number			S	3, 10, 11
WELL-BEING	APPEAREANCE	✓	✓	✓	Aspects of spaces, surfaces, and furnishing	Not all likely / Not very likely / Somewhat likely / Very likely / Extremely likely	Likert scale 1-5				3
	COMFORT	✓	✓	✓	Artificial and natural lighting control	Defined by Technical Law	lux / lumen	E	E	S	3, 11, 12, 13
		✓	✓	✓	Temperature and humidity control	Defined by Technical Law	°C and %RH	E	E	S	3, 11, 12, 13
			✓	✓	Artificial and natural ventilation control	ASHRAE	air flow	E	E	S	3, 11, 12, 13
		✓	✓	✓	Design for health and well-being	Not all likely / Not very likely / Somewhat likely / Very likely / Extremely likely	Likert scale 1-5	E	E	S	3, 10, 11, 12, 13
			✓	✓	IEQ monitoring	ASHRAE	IEQ parameters	E	E	S	3, 11, 12, 13
		✓	✓	✓	Water monitoring	OMS	Water quality parameters	E	E	S	3, 11, 12, 13
			✓	✓	Acoustic and thermic performances	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	dB	E	E	S	3, 11, 12, 13
		✓	✓	✓	User experience evaluation	Not all likely / Not very likely / Somewhat likely / Very likely / Extremely likely	Likert scale 1-5	E	E	S	3, 10
	HEALTH	✓	✓	✓	Presence of spaces, technologies, and devices for health status control	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	smq or number / ab			S	3
		✓	✓	✓	Presence of spaces, technologies, and devices for movement and fitness	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	smq or number / ab			S	3
		✓	✓	✓	Presence of spaces, technologies, and devices for food supply	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	smq or number / ab			S	3
		✓	✓	✓	Presence of spaces, technologies, and devices for social interaction	Defined by National, Regional, Local, and Technical Law	smq or number / ab			S	3, 10
		✓	✓	✓	Biophlic design and integration of nature based solutions	> 3	smq / apartment	E	E	S	3, 11, 13
		✓	✓	✓	IAQ monitoring	ASHRAE	IAQ parameters	E	E	S	3, 11, 12, 13
		✓	✓	✓	Water quality control	OMS	Water quality parameters			S	6, 11, 12, 13
	HYGIENE	✓	✓	✓	Presence of spaces, technologies, and devices for individual hygiene	> 1 accessible bathroom (* Defined by home / building tipology)	n° / apartment or building			S	3, 4, 5, 6
		✓	✓	✓	Hygiene of spaces and surfaces	Use of low VOC hygiene products	yes / no	E	E	S	3
		✓	✓	✓	Materials and components without VOC and low-emitting	Presence of EPD, Ecolabel Technical Schedules, etc.	yes / no	E	E	S	3, 12

Tab. 2b | Social Taxonomy for Senior Residences: KPIs, certification protocols and SDGs (credit: A. Mangiatordi, 2025).

ed to the third sector or public and private institutions that are adopting ESG metrics as a tool for promoting and controlling the quality of projects (Tartaglia et alii, 2024), as well as for assessing and reporting on the environmental sustainability of their property development and management activities (Alini and Martino, 2023).

While for the environmental dimension it is simpler to trace sustainability indicators back to a taxonomy and a more structured technical regulation aligned with European standards (Dodd, Donatello and Cordella, 2021), for the social aspects this path is still little defined, although issues such as well-being, inclusiveness, and accessibility are leading to the identification of areas of improvement in the measurement of the social impact of investments (Confindustria Assoimmobiliare, 2024), requiring, however, further work to refine the assessment parameters, in relation to the specificities of the sector; governance aspects, on the other hand, are often linked to the peculiarities of the production or corporate context.

In this evolving regulatory and production framework, the senior housing sector can have a positive social impact. However, it is not always easy to measure it through the definition of KPIs that can help determine adequate levels of individual and collective well-being, accessibility and inclusiveness, quality of life and relationships in home environments, as in urban contexts, all of which have a significant impact on ESG reporting, through factors such as improving quality, enhancing the social component in housing and urban community infrastructure, incorporating digital devices in buildings, computerising care and assistance services, lowering energy consumption, and reducing polluting emissions.

In line with the EU Taxonomy, the research aims to develop a decision-support tool to guide the design of innovative senior housing practices aligned with ESG principles. Neglecting environmental and governance aspects, the contribution focuses on the social (S) dimension of sustainability. In fact, the environmental dimension (E) presents very similar characteristics to other sectors and an already almost defined structure, thanks to the wide presence of national and technical sector regulations (CAM, DNSH, etc.), methodologies (LCA, LCC, etc.) and production dynamics (EPD, REACH, Ecolabel, etc.) now consolidated. On the other hand, the dimension of governance (G) may depend on variable conditions, such as the nature of the real estate operation, the type of financing, the specificity of the real estate fund or manager, the characteristics of the lease, and so on; therefore, it is complex to generalise.

Methodological approach and performance indicators | The lack of a precise, agreed classification of 'socially sustainable activities' is a key gap in European sustainability policies. However, recent proposals at the European level (Platform on Sustainable Finance, 2022) have not yet been implemented due to divergent evaluation criteria and scope definitions. This lack has generated uncertainty for investors and stakeholders, leaving the Social Taxonomy still fragmented.

The Social Taxonomy proposed for residences for seniors is therefore based on the SDG framework, recognised internationally as a solid basis for promoting 'inclusive' sustainability and as a reference for identifying standardised, shared criteria, in line with the sector's housing and social policies. Starting from the comparison with the scientific literature on the topic of inclusive and digital living for seniors (Angelucci et alii, 2015; Arquilla and Paracolli, 2023; Attainese and Di Dario, 2024; Chaza Chimeno, Revellini and Cellucci, 2024; Villani and Romagnoli, 2023) and from the in-depth study of practical case studies that have obtained energy-environmental certifications (Figg. 2-10), KPIs and design criteria were identified by comparing criteria derived from voluntary protocols and SDGs, in compliance with the community taxonomies described above.

For this research, the BREEAM[10], LEED[11], and WELL[12] protocols were considered, as they are the most widely used at the national level in the real estate investment sector. They differ in terms of certification process, minimum mandatory requirements, prerequisites, and criteria for awarding and weighing credits or scores across different thematic areas (such as water, energy, transport, waste, etc.), as well as the duration and cost of implementation. The three protocols also present different rating systems and updated versions that, while maintaining the general scheme in relation to the specific thematic areas, adapt the prerequisites and credits or scores from time to time to the peculiarities of the building types or interventions to be carried out, contemplating, albeit with different weightings, the pursuit of E, S and G values.

The categories and indicators identified within each protocol were therefore reorganised into a Social Taxonomy that can be used as a planning guideline and an evaluation tool within the framework of residential and housing projects for seniors. Table 1 shows the proposed Social Taxonomy, according to five areas of interest ('Access for all', 'Connectivity', 'Mobility', 'Safety', 'Sense of Community', 'Well-being'), designed to satisfy one or more certification protocols, each associated with verifiable criteria to contribute to the SDGs objectives and, more generally, to the taxonomy introduced by the EU regulation on ESG.

The 'Access for All' area of interest refers to the degree to which an environment, service or product enables accessibility for all, through the design of spaces, furniture, technologies and systems that can be used by all users without the need for future adaptation, at the scale of the home, building, and urban space. It also includes affordable housing to address economic hardship and energy poverty, which seniors are often subject to.

The project area related to 'Connectivity' responds to the demands for computerisation and digitalisation of the built environment, from the use of computerised modelling methodologies in projects and processes, to the introduction of ICT / IoT devices capable of offering new digital services – from monitoring health status to the control of vital parameters, from the activation of remote assistance and care services to the promotion of communication through social networks for the development of new forms of social inclusion and participation.

The 'Mobility' area of interest concerns everything related to the sphere of individual mobility and, through public transport, affects individual well-being, improves seniors' sense of autonomy and safety, facilitates walking and encourages movement, and contributes to the creation of relational infrastructures in the urban fabric of reference.

The 'Safety' category refers, on the one hand, to individual safety in the home or urban environment, supporting seniors in carrying out daily activities, limiting risk situations, and protecting the user from the occurrence of dangerous events, and on the other hand, to collective safety, with reference to emergency management or intrusion by third parties.

The last project area related to the 'Sense of Community' encompasses all those criteria that contribute to reducing social inequalities, improving seniors' sense of participation and belonging within the community, according to shared values and needs, enhancing well-being, quality of life and relationships, and enabling people to interact and support each other in carrying out daily activities, with a view to maximising the development of their potential.

The 'Well-being' category, on the other hand, refers to all those criteria that enable the attainment of a state of complete physical and mental well-being, not necessarily linked to the absence of disease or pathological conditions, favouring healthy and active ageing and contributing to the maintenance of functional capacities throughout the entire life course, referring, therefore, to all those characteristics of spaces, technologies, and furnishings that offer adequate indoor comfort and hygienic conditions in the environments, with beneficial effects on the health conditions of users.

The project categories identified can thus contribute, in a specific and interrelated way, to the achievement of 12 of the 17 SDGs, and specifically to:
– SDG 1 'no poverty' through easier access to affordable housing and adequate support for families and caregivers, through low-cost access to services related to sociality, as well as to care and health, through the availability of space and technology, including digital, in homes, buildings and urban settings;
– SDG 2 'zero hunger' by ensuring proper nutrition and promoting healthy lifestyles;
– SDG 3 'good health and well-being', favouring the maintenance of a good state of health through the construction of adequate living spaces that ensure conditions of comfort and well-being for seniors, also by means of preventive or rehabilitative actions that aim at enhancing the user's functional capacities, encouraging mental health and movement;
– SDG 4 'quality education', ensuring that seniors can continue to be an active part of society, with constant learning and the acquisition of new skills (e.g., digital), to manage their health while maintaining their identity and social connectedness, including by providing forms of intergenerational sharing;
– SDG 5 'gender equality', increasing women's participation in public life;
– SDG 6 'clean water and hygiene services', promoting access to clean water, a vital resource to ensure health and well-being;
– SDG 7 'affordable and clean energy', enabling energy supply with easier access to affordable and reliable services using renewable energy sources, the use of advanced technologies and facilities geared towards energy efficiency, reduction of consumption and enhancement of existing resources, raising awareness and encouraging responsible behaviour by users and operators;
– SDG 9 'industry, innovation and infrastructure', facilitating the digitisation processes of the built environment and technological innovations in digital infrastructures and industrial production 4.0 (e.g., wearable devices, assistive robotics, virtual and augmented reality, electric vehicles, smart homes, etc.) to increase the interoperability of collected data, including digital health services to be activated for maintaining the autonomy of seniors at home and in the neighbourhood context, avoiding hospitalisation;

– SDG 10 'reducing inequalities', overcoming social inequalities by providing services accessible to all, containing the digital divide, enabling the use of new digital functions at the scale of the home, building and urban space, and improving independence through the use of new technologies to increase opportunities for active participation in community life;
– SDG 11 'sustainable cities and communities', accelerating the energy-environmental efficiency of settlements by optimising the logistics of public transport and mobility systems, the design of green areas and safe and inclusive public spaces, the availability of neighbourhood services, the construction of quality housing and the provision of facilities for care, protection and social participation; the adoption of digital systems for health management and energy supply can further contribute to the realisation of a more inclusive, safe, resilient and sustainable development;
– SDG 12 'responsible consumption and production', ensuring the well-being of seniors with access to water, clean energy and food, while reducing overconsumption of natural resources;
– SDG 13 'climate action', fostering project actions necessary to combat climate change and its impacts, enhancing resilience, integrating mitigation and adaptation measures into projects, and improving education and awareness of managers and end-users.

Table 2 shows the interrelationships among Social Taxonomy, project indicators, certification protocols, and SDGs, highlighting how individual project categories can intersect with additional protocols and SDGs. In fact, while WELL certification intercepts 98% of indicators, this percentage is 39% for BREEAM and LEED certification, although in the latter case, they primarily have an environmental value (Figg. 11-13).

SDGs 14 (life below water) and 15 (life on land) remain uncovered by the assessment, on which the project categories and indicators identified (in particular SDGs 6, 7, 11, 12, and 13) may have indirect effects and possible synergies; SDGs 8 (decent work and economic growth), 16 (peace and justice strong institution) and 17 (partnerships for the goals) instead have to do with governance aspects, and thus with management and economic growth, underpinning all the others.

Potentials and limitations of the study | The certification protocols considered in the comparison exhibit considerable qualitative and quantitative differences, as they employ different calculation methodologies and indicators, with varying weights and scores that are not always directly comparable. As far as the environmental dimension is concerned, it is considerably reflected in the adoption of BREEAM and LEED certifications, which are increasingly geared towards promoting decarbonisation alongside energy efficiency in buildings.

As far as the social dimension is concerned, the focus is on defining the key spatial and technological variables with which it is possible to produce 'social value'– from relations with public space, to the proximity of green and pedestrian areas, to the contribution offered by sustainable mobility, to the presence of equipment and services for the performance of shared activities, to the digitalisation of spaces and services, and so on – and thus it refers to all those solutions aimed at the individuals and communities concerned. It is also reflected in the WELL certification, although it does not cover specific relational categories that are fundamental to the sector.

The certification protocols do not fully address all identified themes and indicators. For example, none of them addresses the issue of digitisation through the use of BIM as a methodology that is now indispensable for managing projects and processes (Mangiatordi, 2022); the problem of accessibility for all and physical and mental well-being only addressed in the WELL certification, as is that of individual and collective safety in the area of intervention, which is in any case only partially addressed for emergency management aspects. Even when several instruments consider the presence of the same indicator, the areas of impact – environmental or social – and the assessment methods differ significantly, as in the cases of proximity to public transport, indoor environmental quality management, and others.

In anticipation of future research advances, it is appropriate to highlight how it is necessary to verify the compliance of the indicators with national, regional, local, technical and typological regulations of the sector, which, in the case of residences for seniors, is quite heterogeneous throughout the country and still in the perimeter phase. It is also necessary to collect comparable, aggregable data to improve the structure of the proposed model and enhance the effectiveness of ESG reporting and monitoring activities.

The study's limitations include the need to extend the methodology adopted to other international protocols – such as the Wired Score[13], aimed more at digital connectivity, or the LEED Sites[14], referring specifically to open spaces – as well as to update the criteria at the same time as the protocols are updated, as in the case of LEED certification, which has recently reached version. It is also necessary to extend the research to the national protocols GBC Neighborhoods[15], GBC Historic Buildings[16] and GBC Home[17], taking into account the peculiarity of urban and residential models and the historical-constructive characteristics of buildings and dwellings, typical of the Italian reality, excluding other standards (such as DG-NB[18], due to the specificity to the German context) not referable to the national building sector. Lastly, with reference to the choice of technological solutions, products and services, the possibility of integrating research with Social-LCA[19] assessments throughout the entire life cycle of projects and investments is envisaged.

In principle, many of the requirements of the EU Taxonomy are already part of the analysed certifications. Therefore, the criteria identified in the examined protocols constitute a sound basis for fulfilling the principles of the Social Taxonomy. It should be noted, however, that these requirements will need to be updated and re-verified in the event of future extensions to the EU Taxonomy, particularly for the dimensions of sustainability and governance, which are still being developed.

Governance aspects could include, for example, procedures for cleaning and sanitising environments, emergency preparedness plans, care and health programmes involving users and external figures, and mental health policies. In contrast, for environmental aspects, campaigns could be introduced to improve indoor environmental quality through on-site testing and monitoring, thereby enhancing end-users' well-being. In any case, the defined Taxonomy is not considered finished, but subject to further adjustments in the future.

In a subsequent phase of the research, of a more experimental nature, the construction of an interactive tool is envisaged, starting from the Social Taxonomy, integrated with environmental sustainability (E) and governance (G) indicators, based on KPI sheets structured on a parametric BIM platform, which can be used to control the typological-performance and economic-managerial quality of projects. It will be followed by the application to real case studies, selected from specific real estate assets, as well as the verification and further impact assessment of the results in terms of intervention objectives – in relation to the spatial and technological-plant susceptibility of the real estate concerned, the characterisation of open spaces and the relations with the settlement fabric – and the definition of investment priorities, foreseeing the involvement of real estate management companies and stakeholders, to allow the transaction towards Research and Development activities. The consolidation of the Social Taxonomy, the methodologies and the implemented tool will also pass through the extension to other building types with health-assistance connotations (hospitals, nursing homes and community houses, etc.), social (in the forms of co-housing, intergenerational and multi-living housing) and for special users (including people with disabilities, immigrants, students away from home), according to criteria of replicability and adaptability.

Concluding remarks and future impacts | Recent international policies and the European Union's commitments to carbon neutrality and sustainable finance are introducing new approaches to the design and management of the built environment, with significant implications for ESG-driven investments. In the real estate market, the choice of 'green' investment continues to represent a driving vector, to which it is possible to attribute an 'environmental value' as a rewarding factor, justified by the presence of buildings with high energy efficiency and low carbon emissions in line with EU climate objectives, proven by obtaining energy-environmental certifications and by meeting effectively measurable indicators.

On the other hand, investments in 'socially sustainable' activities exhibit blurred boundaries, grounded in principles and objectives that are not always quantifiable, i.e., aimed at producing 'social value'. This value involves assessing the positive impacts in terms of reducing inequalities, returning decent work to people, promoting well-being, and contributing to the creation of intelligent and inclusive communities. Governance aspects, on the other hand, concern the implementation of processes, methods, and procedures aimed at supporting the 'economic-management value' of investments in the long term, in relation to the specificities of the financial activity or organisation of reference.

To date, no recognised taxonomy enables operators in the senior housing market to demonstrate alignment between their real estate investment and valuation activities and the criteria of the EU ESG regulation through shared methodologies and approaches. Parallel to the scenarios of social and technological innovation (Gaspari and Busacca, 2017) on the horizon, several obstructive barriers remain, including a lack of specialist expertise and a tendency towards cultural resistance to change.

On a national scale, the barriers to the development of ESG approaches in senior residences concern more specifically: 1) regulatory aspects, for

which there is a regulatory inhomogeneity concerning RSAs (Residential Healthcare Facilities) with different approaches depending on the Regions, and an uncertain framework for senior residences, which are configured as a sector that is still not very consolidated compared to other European countries; 2) social factors, for example, linked to the digital divide, which is very widespread among the over-75s (ISTAT, 2024), can limit the implementation of ICT / IoT technology solutions in investment programmes and projects; 3) economic barriers due to very high CAPEX (Capital Expenditures) for new construction or retrofit interventions promoted by various stakeholders, mainly investors and managers, and to the often high cost of spaces, technological equipment, and services offered, with onerous fees for end users.

The advances proposed in this study are therefore addressed not only to the academic community but also to operators in the sector, as a theoretical assumption of the connection between scientific research and the real estate market, within a long-term strategic vision of sustainability as a whole. The results obtained presuppose the consolidation of a systemic approach to measuring the ESG impact for senior residences through the definition of indicators that are not limited to considering only the energy-environmental component, as is already the case for other sectors, but which aim to extend their effectiveness to the social dimension as well, as an aspect of evaluating investments, projects, and regeneration interventions that can no longer be neglected.

This challenge requires the commitment of economic resources and the adoption of appropriate governance tools to make a decisive contribution to redefining the quality of the built environment, emphasising the importance of individual well-being and social relations, and increasing the financial value of real estate transactions.

The time seems ripe to place residential care homes for seniors at the centre of real estate investment and regeneration programmes in an ESG direction, to enhance sociality, improve services for families, and support the weaker segments of the population, within sustainable management methods that are fundamental to safeguarding the environment. The illustrated study, therefore, aims to strengthen this direction, through the dissemination of reliable tools, to accompany the real estate market in the understanding of Community regulations, enhancing the theoretical culture of reporting and promoting new meanings of value for sustainability in ESG terms – environmental, social, and governance – for senior residences, according to a truly integrated and measurable approach.

Notes

1) By way of example, we cite the Aristotele Senior fund, promoted by the public-private partnership between INPS, Inarcassa, and Enpap, which represented the first project in Italy in the sector of residences for older people, with investments of about EUR 500 million in new projects dedicated to self-sufficient over-65s. For more information, please visit: enpap.it/DOC/CS/2021-07-CS-ARISTOTELESENIOR.PDF [Accessed 10 September 2025].

2) First the 'Action Plan for Financing Sustainable Growth', then the 'Sustainable Finance Disclosure Regulation' constitute the pillars of the European Union's sustainable finance, which embraces the demands of a widespread demand for social and environmental responsibility addressed to all productive sectors, including the real estate sector with a social vocation, imposing new ESG reporting obligations, according to standards defined as 'Corporate Social Responsibility', 'Corporate Sustainability Reporting Directive', and 'Corporate Sustainability Due Diligence Directive' (European Commission, 2011, 2018; European Parliament and Council of the European Union, 2019; European Union, 2022a, 2024a).

3) In the previously mentioned fund (footnote 1), social aspects are pursued through real estate initiatives with RSAs and Senior Living as their intended use, selected and monitored, based on factors identified in a Sustainability Map, within a panel of ESG indicators that generically cover various real estate assets, including other building types. For further information, please visit: rivista.inarcassa.it/-/inarcassa-e-il-profilo-sostenibile-esg-degli-investimenti-immobiliari [Accessed 10 September 2025].

4) The contribution presents the partial results of the research project supported by 'Sapienza' University of Rome, Call for Proposals' Start of Research 2024' (Funding € 2,664; Duration: 12 months) entitled 'Senior Smart Housing – Tools and methods for the valorisation of residences for the elderly in an ESG perspective'; Scientific Responsible Arch. PhD A. Mangiatordi; Tutor Prof. C. Clemente.

5) The CRREM analysis assesses the carbon risk of investments. It allows the identification of possible improvement and reduction scenarios starting from the consideration of the energy behaviour of individual buildings or entire property portfolios, defining a decarbonisation pathway in line with the European Union's 2050 targets for limiting global warming, based on IPCC reports, i.e. quantifying potential depreciation due to the direct impacts of climate change and the transition to a low-carbon economy. For more details, see: crrem.eu/ [Accessed 10 September 2025].

6) For more information, see the webpage: crrem.eu/globalreporting.org/ [Accessed 10 September 2025].

7) For more information, see the webpage: gresb.com/nl-en/ [Accessed 10 September 2025].

8) For example, consider the RESVI (Real Estate Social Value Index) tool. For more information, see the webpage: socialvalueportal.com/news-and-insights/resvi [Accessed 10 September 2025].

9) For example, consider the IFC (International Finance Corporation) performance standard. For more information, see the webpage: ifc.org/en/insights-reports/2012/ifc-performance-standards [Accessed 10 September 2025].

10) For more information on BREEAM certification, please see the webpage: breeam.com/ [Accessed 10 September 2025].

11) For more information on LEED certification, see the webpage: usgbc.org/leed [Accessed 10 September 2025].

12) For more information on WELL certification, please visit: wellcertified.com/certification/v2/ [Accessed 10 September 2025].

13) For more information on WiredScore certification, please visit: wiredscore.com/certify-a-building/wiredscore/ [Accessed 10 September 2025].

14) For more information on LEED Sites certification, please visit: usgbc.org/resources/sites-rating-system-and-scorecard [Accessed 10 September 2025].

15) For more information on GBC Neighbourhoods, see the webpage: gbcitalia.org/gbc-quartieri/ [Accessed 10 September 2025].

16) For more information on GBC Historic Buildings, please visit: gbcitalia.org/certificazione/gbc-historic-building/ [Accessed 10 September 2025].

17) For more information on GBC Home, see the webpage: gbcitalia.org/certificazione/gbc-home/ [Accessed 10 September 2025].

18) For more information on DGNB certification, please visit: dgnb.de/en [Accessed 10 September 2025].

19) For more information on ISO 14075:2024 'Environmental management – Principles and framework for social LCA', see the document at: iso.org/standard/61118.html [Accessed 10 September 2025].

References

Alini, L. and Martino, A. (2023), "Progettare la sostenibilità – Metodi e strategie di valutazione ambientale | Designing sustainability – Environmental assessment methods and strategies", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 26, pp. 267-275. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-15289 [Accessed 10 September 2025].

Angelucci, F., Cellucci, C., Di Sivo, M. and Ladiana, D. (2015), "Autonomia, Indipendenza, Inclusione | Autonomy, Independence, Inclusion", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 9, pp. 85-95. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-16109 [Accessed 10 September 2025].

Arbizzani, E., Clemente, C. and Mangiatordi, A. (2022), "Senior smart housing – Abitazioni per anziani come infrastruttura sociale di comunità | Senior smart housing – Housing for the elderly as a community social infrastructure", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 23, pp. 221-231. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-12156 [Accessed 10 September 2025].

Arquilla, V. and Paracolli, A. (2023), "Design sull'esperienza dell'utente e sostenibilità degli oggetti con intelligenza artificiale | User experience design and sustainability of AI-infused objects", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 259-268. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13222023 [Accessed 10 September 2025].

Attaianese, E. and Di Dario, Y. (2024), "Beyond accessibility – Universal design for healthy and inclusive public space | Oltre l'accessibilita – Progettazione universale per uno spazio pubblico sano e inclusivo", in *SMC | Sustainable Mediterranean Construction*, vol. 20, pp. 34-40. [Online] Available at: sustainablemediterraneanconstruction.eu/it/rivista/2024-20/2024-20-034/ [Accessed 10 September 2025].

Cangelli, E. (2025), "Rigenerazione urbana e SDG – Approcci progettuali per la riduzione delle disuguaglianze urbane | Urban regeneration and SDGs – Design approaches for reducing urban inequalities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 28-41. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1712025 [Accessed 10 September 2025].

Chaza Chimeno, M. R., Revellini, R. and Cellucci, C. (2024), "Invecchiamento della popolazione e spazi urbani – Nuove sfide digitali per il benessere degli anziani | Ageing population and urban spaces – New digital challenges for elderly well-being", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 98-107. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1682024 [Accessed 10 September 2025].

Ciaramella, A., Invernale, A. and Gornati, A. (2023), *Qualità e prestazioni degli edifici – Sistemi di rating e indicatori ESG per la misurazione della qualità immobiliare*, FrancoAngeli, Milano.

Colliers (2022), *Capital Markets EMEA – European Living Snapshot.* [Online] Available at: arelitalia.com/images/img-blog/ColliersEMEA_EuropeanLivingSnapshot_April2022%20FINAL.pdf [Accessed 11 October 2025].

Confindustria Assoimmobiliare (2024), *La "S" di ESG – Misurare il Valore Sociale generato dagli investimenti Real Estate.* [Online] Available at: assoimmobiliare.it/wp-con-

tent/uploads/2024/06/LA-_S_-DI-ESG-1.pdf [Accessed 10 September 2025].

Confindustria Assoimmobiliare (2022), *Gli investitori immobiliari e la sfida ESG – Indagine 2021*. [Online] Available at: assoimmobiliare.it/wp-content/uploads/2022/05/2200520_assoimmobiliare_survey.pdf [Accessed 10 September 2025].

Dodd, N., Donatello, S. and Cordella, M. (2021), *Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings – User manual 2 – Setting up a project to use the Level(s) common framework.* [Online] Available at: susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2021-01/UM2_Setting_up_a_project_to_use_Level%28s%29_v1.1_26pp.pdf [Accessed 10 September 2025].

European Commission (2024), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Securing our future Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society*, document 52024DC0063, COM/2024/63 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2024%3A63%3AFIN [Accessed 18 October 2024].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN [Accessed 10 September 2025].

European Commission (2018), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Action Plan – Financing Sustainable Growth*, document 52018DC0097, COM/2018/97 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52018DC0097 [Accessed 10 September 2025].

European Commission (2011), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A renewed EU strategy 2011-14 for Corporate Social Responsibility*, COM/2011/681 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0681 [Accessed 10 September 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2019), *Regulation (EU) 2019/2088 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2019 on sustainability-related disclosures in the financial services sector*, document 32019R2088, PE/87/2019/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2088/oj?eliuri=eli%3Areg%3A2019%3A2088%3Aoj&locale=en [Accessed 10 September 2025].

European Union (2024a), *Regulation (EU) 2024/3005 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 on the transparency and integrity of Environmental, Social and Governance (ESG) rating activities, and amending regulations (EU) 2019/2088 and (EU) 2023/2859*, document 32024R3005, PE/43/2024/REV/1. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/reg/2024/3005/oj [Accessed 10 September 2025].

European Union (2024b), *Directive (EU) 2024/1760 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on corporate sustainability due diligence and amending Directive (EU) 2019/1937 and Regulation (EU) 2023/2859 (Text with EEA relevance)*, document 32024L1760, PE/9/2024/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401760 [Accessed 10 September 2025].

European Union (2022a), *Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as regards corporate sustainability reporting*, document 32022L2464, PE/35/2022/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj/eng [Accessed 10 September 2025].

European Union (2022b), *Opinion of the European Economic and Social Committee on Social taxonomy – Challenges and opportunities*, document 52022IE0721, EESC 2022/00721. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=oj:JOC_2022_486_R_0003 [Accessed 10 September 2025].

European Union (2022c), *Commission Delegated Regulation (EU) 2022/1288 of 6 April 2022 supplementing Regulation (EU) 2019/2088 of the European Parliament and of the Council with regard to regulatory technical standards specifying the details of the content and presentation of the information in relation to the principle of 'do no significant harm', specifying the content, methodologies and presentation of information in relation to sustainability indicators and adverse sustainability impacts, and the content and presentation of the information in relation to the promotion of environmental or social characteristics and sustainable investment objectives in pre-contractual documents, on websites and in periodic report*, document 32022R1288, C/2022/1931. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/reg_del/2022/1288/oj [Accessed 10 September 2025].

European Union (2021), *Commission Delegated Regulation (EU) 2021/2139 of 4 June 2021 supplementing Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council by establishing the technical screening criteria for determining the conditions under which an economic activity qualifies as contributing substantially to climate change mitigation or climate change adaptation and for determining whether that economic activity causes no significant harm to any of the other environmental objectives*, document 32021R2139, C/2021/2800. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/reg_del/2021/2139/oj [Accessed 10 September 2025].

European Union (2020), *Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088*, document 32020R0852, PE/20/2020/INIT. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj [Accessed 10 September 2025].

Ferrante, C., Martini, C., Martini, F., Salvio, M., Mohamed, S., Arnesano, F., De Carlo, F. and Leoni, L. (2024), *Quaderni dell'Efficienza Energetica – Uffici – Prima edizione Luglio 2024*. [Online] Available at: pubblicazioni.enea.it/download.html?task=download.send&id=709:uffici-quaderni-dellefficienza-energetica&catid=3 [Accessed 10 September 2025].

Gaspari, J. and Busacca, M. (2017), "Tra innovazione tecnologica e innovazione sociale – Una nuova dimensione di progetto e di processo | Between technological innovation and social innovation – A new design and process dimension", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 14, pp. 362-368. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-22150 [Accessed 10 September 2025].

Harrison Street and Gensler (2024), *Whole Life Decarbonization in Alternative Real Estate Sectors – Findings for Real Estate investment managers.* [Online] Available at: gensler.com/doc/decarbonization_in_alternative_real_estate_sectors.pdf [Accessed 11 October 2025].

IISD – International Institute for Sustainable Development (2022), *Principles-Based Social Taxonomy for Sustainable Investing – Building blocks and lessons for the future.* [Online] Available at: iisd.org/system/files/2022-08/social-taxonomy-sustainable-investing.pdf [Accessed 11 October 2025].

ISTAT (2024), *Decennio digitale e capitale umano – Il ritardo dell'Italia nelle competenze*. [Online] Available at: istat.it/it/files/2024/06/STATISTICA_TODAY_ICT_2023.pdf [Accessed 11 October 2025].

Mangiatordi, A. (2022), "BIM and IoT for AAL – Digital modelling and 4.0 management for care and assistance services", in Scalisi, F., Sposito, C. and De Giovanni, G. (eds), *Sustainable Built Environment between Connections and Greenery*, Palermo University Press, Palermo, pp. 228-247. [Online] Available at: unipapress.com/wp-content/uploads/2022/11/13_P32_MANGIATORDI.pdf [Accessed 10 September 2025].

Nobili, M. (2019), "Real Estate tra innovazione e accessibilità – Senior housing come strategia d'intervento sostenibile | Real Estate between innovation and accessibility – Senior housing as sustainable intervention strategy", in Baratta, A., Conti, C. and Tatano, V. (eds), *Abitare inclusivo – Il progetto per una vita autonoma e indipendente | Inclusive living – Design for an autonomousand independent living, Atti del Convegno "Abitare Inclusivo", Udine, Italy, December 6, 2019,* Anteferma Edizioni, Conegliano, pp. 190-195. [Online] Available at: iris.uniroma1.it/retrieve/e3835324-83b9-15e8-e053-a505fe0a3de9/Nobili_Real%20Estate_2019.pdf [Accessed 10 September 2025].

Nomisma (2020), *Il senior housing in Italia – Numeri e prospettive dei modelli residenziali per la terza età.* [Online] Available at: nomisma.it/focus/senior-housing-in-italia-numeri-e-prospettive/ [Accessed 10 September 2025].

Paganin, G. (2021), "Finanza sostenibile e industria delle costruzioni – Nuovi paradigmi per lo sviluppo dei progetti | Sustainable finance and the construction industry – New paradigms for design development", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 22, pp. 79-85. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-10600 [Accessed 10 September 2025].

Platform on Sustainable Finance (2022), *Final Report on Social Taxonomy.* [Online] Available at: finance.ec.europa.eu/system/files/2022-08/220228-sustainable-finance-platform-finance-report-social-taxonomy_en.pdf [Accessed 10 September 2025].

Savills (2019), *European Senior Housing.* [Online] Available at: pdf.euro.savills.co.uk/european-commercial-markets/european-senior-housing—-2019.pdf [Accessed 10 September 2025].

SHHA (2024), *The senior housing and healthcare real estate market – A multi-stakeholder perspective on investment opportunities across Europe.* [Online] Available at: shha.international/wp-content/uploads/2024/10/SHHA_RAPORT_OCTOBER-2024.pdf [Accessed 11 October 2025].

Tajani, F., Sica, F., Morano, P., Guarini, M. R. and Roma, A. (2024), "A Clustering Analysis to Support the Definition of Effective ESG Impact Assessment Practices", in Calabrò, F., Madureira, L., Morabito, F. C. and Piñeira Mantiñán, M. J. (eds), *NMP 2024 | Networks, Markets and People – Community, Institutions and Enterprises Towards Post-humanism Epistemologies and AI Challenges – Volume 6*, Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 1188, Springer, Cham, pp. 400-409. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-74716-8_40 [Accessed 10 September 2025].

Tartaglia, A., Babudri, M., Salucci, F., Pacini, R. and Sereni, A. (2024), "Strumenti integrati per la promozione e il controllo della qualità del progetto | Integrated tools for quality promotion and project control", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 27, pp. 167-176. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-15129 [Accessed 10 September 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development – A/RES/70/1.* [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf [Accessed 10 September 2025].

UNEP – United Nations Environment Programme (2024), *Global Status Report for Buildings and Construction – Beyond foundations – Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. [Online] Available at: doi.org/10.59117/20.500.11822/45095 [Accessed 10 September 2025].

Villani, T. and Romagnoli, F. (2023), "Modularità e personalizzazione per le cure domiciliari – Configurazione e analisi multicriteri degli arredi | Modularity and customisation for home care – Configuration and multicriteria analysis of furnishings", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 236-249. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14202023 [Accessed 10 September 2025].

World Green Building Council (2023), *Social Impact across the Built Environment – Prioritising People throughout the building life cycle*. [Online] Available at: worldgbc.org/wp-content/uploads/2024/01/WGBC-Creating-Better-Places-for-People.pdf [Accessed 11 October 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 144-161
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1872025

Article Info

Received 10 September 2025
Revised 22 October 2025
Accepted 23 October 2025
Published 30 December 2025

GEMELLO DIGITALE E PROCESSO EDILIZIO
Riflessioni su produttività, energia e salute

THE DIGITAL TWIN AND THE BUILDING PROCESS
Reflections on productivity, energy, and health

Alexandra Eika D'Amore

Abstract

Il settore delle costruzioni, storicamente segnato da inefficienze e alti impatti ambientali, è al centro di una trasformazione digitale. In questo quadro il gemello digitale opera come piattaforma sistemica che integra dati, processi e attori lungo l'intero ciclo di vita, abilitando decisioni complesse e generando valore. Il saggio indaga come l'impiego del gemello digitale nelle diverse fasi del processo edilizio possa sostenere produttività, qualità del lavoro e sviluppo di nuove competenze e, al contempo, promuovere efficienza energetica, salute e benessere. L'analisi adotta una prospettiva umano-centrica, valutando in che misura il gemello digitale migliori l'esperienza della committenza, dei lavoratori e degli utenti finali e come contribuisca a una transizione equa e inclusiva, in linea con la visione dell'Industria 5.0 che assegna alla persona un ruolo decisionale centrale nel processo.

The construction sector, historically marked by inefficiencies and high environmental impacts, is at the centre of a digital transformation. Within this framework, the Digital Twin operates as a systemic platform that integrates data, processes, and stakeholders throughout the entire life cycle, enabling complex decision-making and generating value. The paper investigates how the use of the Digital Twin across the different phases of the building process can support productivity, work quality, and the development of new skills, while also promoting energy efficiency, health, and well-being. The analysis adopts a human-centred perspective, assessing the extent to which the Digital Twin improves the experience of clients, workers, and end users, and how it contributes to a fair and inclusive transition, in line with the vision of Industry 5.0, which places the human being at the centre of the decision-making process.

Keywords

gemello digitale, processo edilizio, produttività, sviluppo sostenibile, industria 5.0

digital twin, building process, productivity, sustainable development, industry 5.0



Alexandra Eika D'Amore is an Engineer and PhD Candidate in Architectural Engineering at the Department DICEA, 'Sapienza' University of Rome (Italy). Her research focuses on technological and environmental design, particularly on methods and tools for meta-design, design, and construction at different scales, with a focus on technological innovation and the digitalisation of processes and projects. E-mail: alexandraeika.damore@uniroma1.it

Il settore delle costruzioni costituisce una delle principali fonti di emissioni di gas serra a livello globale, e il comparto AEC contribuisce in modo sostanziale agli impatti dell'ambiente costruito (Xu, Kim and Chen, 2025; Amarasinghe et alii, 2025), rappresentando uno dei principali responsabili delle emissioni di carbonio a livello globale, con circa il 40% delle emissioni energetiche complessive (World Green Building Council, 2024). Da iniziative globali, come l'Accordo di Parigi (UN, 2015b), alle strategie dell'Unione Europea, come il Green Deal Europeo (European Commission, 2019), l'edilizia emerge come leva chiave per la decarbonizzazione e la neutralità climatica. In Italia il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC; Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2023) allinea obiettivi e risorse per l'efficientamento del Patrimonio edilizio (Tab. 1).

Secondo lo studio del Buildings Performance Institute Europe (BPIE, 2024) in Italia le misure adottate hanno ridotto le emissioni di CO_2 e i consumi energetici degli edifici e hanno incrementato l'uso di rinnovabili; tuttavia tali progressi non sono ancora allineati agli obiettivi prefissati, rinviando oltre due terzi dello sforzo al 2050. In questa prospettiva il principio di sviluppo sostenibile assume un ruolo fondante per ripensare il settore delle costruzioni, orientandolo verso modelli capaci di coniugare crescita economica, tutela ambientale e benessere sociale, garantendo un utilizzo equilibrato, equo e duraturo delle risorse disponibili (Fig. 1; Holden et alii, 2014).

La transizione dall'Industria 4.0 a quella 5.0 rafforza questa visione, spostando l'attenzione dall'automazione e dall'efficienza dei processi verso un paradigma umano-centrico, in cui la sostenibilità, l'equità sociale e l'innovazione tecnologica si integrano per generare soluzioni resilienti e servizi di lungo periodo a beneficio della collettività (Fig. 2; Wang et alii, 2024). Tecnologie emergenti come il Digital Twin assumono un ruolo strategico nel tradurre la prospettiva umano-centrica dell'Industria 5.0 in applicazioni concrete per il settore delle costruzioni (Nava and Melis, 2024). Tale tecnologia si configura oggi come una delle innovazioni più rilevanti per l'ingegneria civile, trovando applicazione lungo le diverse fasi del processo edilizio, dalla programmazione, progettazione e costruzione fino alla gestione e manutenzione (Zhang et alii, 2023).

In questa cornice tematica il saggio intende inserirsi nel dibattito scientifico-disciplinare offrendo una lettura critica delle interconnessioni tra l'innovazione tecnologica e digitale e gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), supportata dalla disamina di casi di studio che affrontano il ruolo del Digital Twin applicato alle varie fasi del processo edilizio come leva per la trasformazione produttiva, ambientale e sociale. Attraverso un approccio interdisciplinare e multilivello il contributo evidenzia la complessità del tema rispetto alle sfide attuali, ai compromessi da affrontare e alle prospettive di applicazione futura, con il fine di orientare il settore delle costruzioni verso una trasformazione di impronta ambientale, economica e sociale effettiva.

L'obiettivo del saggio critico è riflettere sulle potenzialità del Digital Twin non solo come avanzamento tecnologico, ma come strumento di mediazione tra innovazione e responsabilità sociale che riconosce il valore dell'apporto umano in ogni fase del ciclo di vita edilizio, ponendo al centro le esigenze della committenza, dei lavoratori e degli utenti finali e contribuendo alla costruzione di nuovi paradigmi di benessere, sicurezza e professionalità. Tale prospettiva si distingue rispetto allo stato dell'arte che tende a privilegiare un'interpretazione prevalentemente tecnica e prestazionale del Digital Twin, proponendo invece una visione sistemica capace di integrare dimensioni tecnologiche, sociali e ambientali. La finalità del contributo è favorire una riflessione critica sulla transizione digitale del settore edilizio, orientandola verso modelli di sviluppo che coniughino innovazione tecnologica, qualità del lavoro e benessere delle persone, in linea con la visione umano-centrica dell'Industria 5.0.

Tale impostazione consente di ampliare il dibattito disciplinare sull'uso delle tecnologie digitali, offrendo spunti per la definizione di nuovi modelli di valutazione del benessere e della produttività, nonché per l'elaborazione di strategie di governance più inclusive e sostenibili. Tale contributo infatti si rivolge in primis alla comunità scientifica, nonché ai decisori pubblici, ai professionisti del settore delle costruzioni, ai soggetti coinvolti nella gestione e nella trasformazione dell'ambiente costruito e agli utenti finali, proponendo spunti utili per orientare politiche, strategie e pratiche verso una transizione digitale etica, equa e sostenibile. L'ambito di riferimento è quello della ricerca architettonica e tecnologica contemporanea, con particolare attenzione alle trasformazioni digitali dei processi edilizi e ai loro impatti sociali e ambientali. L'elemento di originalità del presente contributo risiede nell'adozione di una prospettiva critica e sistemica che interpreta il Digital Twin non soltanto come strumento tecnologico, ma come leva di trasformazione produttiva, sociale e ambientale, mantenendo al contempo la centralità della persona.

Il saggio è strutturato in sei sezioni principali, la prima delle quali ripercorre l'evoluzione del concetto di Digital Twin e le sue applicazioni, fino al settore delle costruzioni, introducendo le tecnologie abilitanti di cui fa uso e gli ambiti di applicazione all'interno del processo edilizio. La sezione metodologica adotta un approccio di analisi critica e argomentativa, volto a sistematizzare le modalità di adozione del Digital Twin nelle fasi di progettazione, costruzione e gestione di un'opera, evidenziando le potenzialità, i limiti e le barriere all'adozione. Successivamente il saggio attiva delle riflessioni sulla letteratura e i casi studio selezionati, sintetizzando le evidenze teoriche e applicative e mettendo in relazione le trasformazioni tecnologiche con gli aspetti organizzativi, sociali ed etici coerenti con la visione umano-centrica dell'Industria 5.0. Una sezione dedicata alla sintesi dei risultati trasversali analizza le sinergie tra il Digital Twin ed SDG, approfondendo in particolare i nessi con gli Obiettivi 8, 7 e 3 e offrendo al contempo una visione complessiva sugli effetti sinergici o di compromesso che la sua adozione può generare rispetto all'intero quadro dell'Agenda 2030. Le conclusioni ripercorrono criticamente le evidenze emerse per ciascuna fase del processo edilizio, mettendo in luce come il Digital Twin possa rafforzare la centralità della persona nei momenti di progettazione, costruzione e gestione, ma anche i principali limiti dello studio e le possibili direzioni di sviluppo futuro orientate a un uso più consapevole, inclusivo e umano-centrico della tecnologia.

Origine e sviluppi applicativi del Digital Twin nel ciclo di vita dell'edilizia | Il saggio, di taglio narrativo-critico e multidisciplinare, si fonda su una selezione qualitativa di articoli scientifici che analizzano l'applicazione del Digital Twin alle fasi del processo edilizio di progettazione, costruzione e gestione / manutenzione.

La selezione delle fonti è stata guidata da un criterio qualitativo e interpretativo, finalizzato a individuare contributi capaci di rappresentare in modo significativo l'evoluzione del paradigma del Digital Twin nel settore delle costruzioni. Ciascuna fase è stata esaminata attraverso casi di studio rappresentativi, scelti per la loro capacità di evidenziare relazioni con gli SDG e in particolare con la produttività (SDG 8), l'efficienza energetica (SDG 7) e la salute e il benessere (SDG 3). Le fonti sono state selezionate in base alla loro rilevanza concettuale e interdisciplinare e sottoposte a una lettura critica volta a evidenziarne limiti, bias e potenzialità; molti studi infatti tendono a privilegiare una visione tecnologico-prestazionale del Digital Twin, trascurando le dimensioni organizzative, sociali e di governance che ne condizionano l'adozione: questa riflessione di meta-analisi costituisce il punto di partenza per la costruzione della presente lettura critica.

L'analisi dei casi applicativi così selezionati consente di mettere in luce lacune e opportunità di approfondimento, ponendo le basi per una discussione orientata ai principi dell'Industria 5.0 e agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile. Per ciascuna fase sono riportati gli articoli che presentano applicazioni del Digital Twin, evidenziando la corrispondenza tra i contributi e i principali ambiti tematici di riferimento: produttività, qualità ed efficienza energetica, salute e benessere (Tab. 2).

Il concetto di Digital Twin trova le sue origini nei primi anni duemila in ambito manifatturiero e aerospaziale, con l'obiettivo di sviluppare una copia digitale di un sistema fisico finalizzata al monitoraggio e all'ottimizzazione delle prestazioni (Iliuta et alii, 2024). Il sistema del Digital Twin è articolato in tre componenti fondamentali (Fig. 3): lo spazio fisico reale, la sua controparte virtuale, in grado di rispecchiare fedelmente le caratteristiche della realtà fisica, e un ponte bidirezionale che connette i due domini consentendo lo scambio continuo di dati e informazioni (Wang, 2020).

Tale tecnologia si è progressivamente affermata come strumento trasversale in numerosi ambiti applicativi: dall'aerospaziale, dove abilita la manutenzione predittiva e il supporto decisionale, al settore dell'energia, per l'ottimizzazione dei sistemi e delle infrastrutture; dalla manifattura, in cui consente la simulazione dell'intero ciclo di vita del prodotto e promuove pratiche sostenibili, ai trasporti intelligenti, favorendo il monitoraggio dinamico delle infrastrutture e l'efficienza della mobilità (Mousavi et alii, 2024). Il trasferimento del Digital Twin al settore delle costruzioni è più recente: si è affermato con la diffusione del BIM e di altri strumenti digitali, alimentando la trasformazione del comparto e offrendo un approccio integrato alla gestione dell'intero ciclo di vita dell'opera (Yang et alii, 2024).

Il settore delle costruzioni si trova oggi immerso in un contesto globale fortemente competitivo (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023); storicamente caratterizzato da una lenta adozione delle innovazioni digitali, il comparto AEC manifesta oggi un bisogno crescente di strumenti in grado di favorire pratiche più ecologiche, efficienti e sicure (Zhang et alii, 2023). In tale scenario l'introduzione di tecnologie digitali avanzate e sistemi intelligenti, supportati

da infrastrutture di connettività e da ecosistemi integrati di dati, ha favorito l'adozione di nuovi strumenti e metodologie, innescando una trasformazione profonda del settore delle costruzioni.

Secondo quanto indicato dalla norma UNI 108 38:1999 il processo edilizio può essere inteso come una sequenza organizzata e strutturata di fasi che prende avvio dal rilevamento delle esigenze espresse dalla committenza-utenza, per giungere al loro soddisfacimento attraverso un percorso che comprende la progettazione, la produzione, la realizzazione e la gestione dell'opera stessa (Fig. 4).

In ambito internazionale il processo edilizio è comunemente inquadrato all'interno del più ampio concetto di ciclo di vita del progetto; l'Istituto statunitense Project Management Institute e l'Istituto inglese Association for Project Management individuano nel ciclo di vita di un progetto una sequenza di quattro fasi dall'avvio alla conclusione (Wang and Chen, 2023). In tale contesto il processo edilizio si configura come un sistema intrinsecamente complesso, chiamato oggi a confrontarsi con le pressanti sfide poste dagli obiettivi di sostenibilità ambientale, economica e sociale.

L'innovazione tecnologica assume un ruolo strategico quale fattore abilitante della transizione verso pratiche più sostenibili, poiché consente la generazione di prodotti e servizi capaci di rispondere con maggiore efficacia e tempestività alla crescente complessità dei bisogni contemporanei (Weichbroth, Jandy and Zurada, 2024). Dall'analisi della letteratura scientifica emerge una prevalente concentrazione degli studi sull'applicazione del Digital Twin alle fasi di progettazione, costruzione e gestione del ciclo di vita dell'opera (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023; Cumo et alii, 2025; Zhang et alii, 2023), le quali saranno anche le fasi analizzate nel presente contributo.

L'aspetto innovativo del Digital Twin risiede nella capacità di operare su processi e scale diverse: dalla visualizzazione progettuale alla simulazione dei processi costruttivi, dal monitoraggio in tempo reale delle prestazioni all'ottimizzazione dei consumi energetici fino alla pianificazione della manutenzione, della riqualificazione e dell'assetto urbano, dal singolo edificio al quartiere e alla città (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023; Longo et alii, 2024; Yang et alii, 2024).

Oltre a tali applicazioni una parte crescente della letteratura evidenzia l'integrazione del Digital Twin con l'Intelligenza Artificiale e agenti autonomi, capaci di assumere decisioni operative e di interagire in logiche machine-to-machine: ciò sposta l'attenzione dal mero monitoraggio al decision-making automatizzato e ridefinisce ruoli, responsabilità e competenze nei processi di progetto e gestione (Celaschi, Casoni and Formia, 2024). A fronte della molteplicità d'uso del Digital Twin, viene adottato un quadro di riferimento delle componenti essenziali, che guida i paragrafi successivi.

Applicazione in fase di progettazione | Nella fase di progettazione l'adozione del Building Information Modeling (BIM) è in grado di generare modelli digitali integrati, che racchiudono informazioni geometriche, prestazionali e funzionali dell'opera (Yang et alii, 2024), e di ridurre conflitti progettuali e discrepanze documentali, garantendo un controllo più accurato sulle decisioni progettuali (Nguyen and Adhikari, 2023).

In fase di progettazione il Digital Twin si configura come un'evoluzione del BIM, trasformandolo in un modello dinamico e continuamente aggiornato grazie all'integrazione con sensori IoT e tecniche di intelligenza artificiale (Lee et alii, 2021). L'integrazione dell'Intelligenza Artificiale nei processi di progettazione consente poi di affiancare alla produzione di immagini la capacità di prevedere prestazioni ambientali, comportamenti degli utenti e risposte dei materiali, divenendo un supporto esplorativo e comunicativo (Nava and Melis, 2024).

Un esempio di applicazione integrata di BIM, Digital Twin e Intelligenza Artificiale è offerto dallo studio sulla rifunzionalizzazione dell'ex Manifattura Tabacchi di Torino, dove viene sperimentata la progettazione di una smart library capace di connettere in tempo reale dati fisici e digitali (Ugliotti, D'Addetta and Fabbricatore, 2024). L'oggetto della ricerca è la creazione di un sistema digitale multilivello capace di integrare dati e processi provenienti da domini diversi in un unico ambiente coerente.

Al livello più basso il BIM fornisce la struttura informativa statica dell'edificio, su cui si innesta un secondo livello costituito da una rete di sensori IoT e telecamere intelligenti, deputata alla raccolta in tempo reale di dati ambientali. Il terzo livello, dedicato all'elaborazione, utilizza algoritmi di Intelligenza Artificiale per interpretare le informazioni acquisite, rilevare schemi di comportamento e generare risposte automatiche del sistema. La metodologia, basata su una matrice spaziale automatizzata (Fig. 5), permette di monitorare parametri ambientali come luminosità, temperatura e presenza, attivando risposte automatiche per ottimizzare comfort, sicurezza ed efficienza energetica.

Il principale punto di forza, che determina anche la scelta di questo caso studio, risiede proprio nell'integrazione effettiva e sinergica delle tre tecnologie, che rende il gemello digitale uno strumento operativo, dinamico e progressivamente adattivo. Inoltre la valutazione delle esigenze degli utenti introduce la visione adattiva e predittiva che eleva il Digital Twin da semplice strumento di monitoraggio a sistema operativo capace di decisioni autono-

Name	Classification	Year	Level	Specific Objectives in the Construction Sector	Additional Notes
Kyoto Protocol	Global treaty	1997	International (UN/UNFCCC)	First legally binding reduction of greenhouse gas emissions; initial push for building energy efficiency	Established the basis for future energy-saving regulations
2030 Agenda	Reference framework	2015	International (UN)	Goals 7, 11, and 13 include targets for the building sector	Global policy framework
Paris Agreement	Global treaty	2015	International (UN/UNFCCC)	Global emission reduction to limit temperature rise below 1.5-2 °C; construction identified as a key sector	Foundation for EU and national strategies
European Green Deal	EU strategic framework	2019	European	Climate neutrality by 2050; decarbonisation of the building sector as a pillar of the transition	Includes the Renovation Wave principle
Renovation Wave	EU sectoral initiative	2020	European	Doubling renovation rates; energy efficiency and decarbonisation of the European building stock	Focus on residential and public buildings
Fit for 55	Legislative package	2021	European	55% emission reduction by 2030; reinforcement of building-related directives (EPBD, RED III)	Introduces stricter obligations for the construction sector
Energy Performance of Buildings Directive (recast)	EU directive	2024	European	Zero-emission buildings (ZEB) by 2030 for new stock; by 2050 for existing stock	Requires national renovation plans
Integrated National Energy and Climate Plan	National plan	2024 (update)	Italy	Energy efficiency, decarbonisation, renewables; specific targets for the building stock and deep renovations	Main Italian instrument for implementing the EPBD and Green Deal

Tab. 1 | Climate agreements and policies: objectives for the construction industry (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Next page

Fig. 1 | The three dimensions of sustainable development (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Fig. 2 | Timeline of the Industrial Revolutions (credit: A. E. D'Amore, 2025).

me, orientato alla qualità della vita degli utenti e alla sostenibilità del costruito. Esistono evidenze applicative che mostrano come BIM e Digital Twin possano supportare anche simulazioni e analisi di scenari per decisioni più consapevoli e sostenibili (Kaewunruen, Rungskunroch and Welsh, 2019), ridefinendo anche i profili professionali: Zannoni et alii (2024) infatti introducono la figura del Transitional Industrial Designer, con il compito di anticipare scenari, mediare tra attori e governare processi complessi.

Tuttavia si riscontrano criticità legate alla complessità tecnologica e infrastrutturale, alla necessità di competenze specialistiche e ai delicati aspetti etici e di privacy derivanti dall'uso di dati sensibili. Il carattere ancora sperimentale della ricerca e la dipendenza da infrastrutture tecnologiche avanzate ne riducono per ora la piena applicabilità, ma l'impianto metodologico mostra una notevole potenzialità evolutiva, aprendo prospettive concrete per la diffusione di modelli di progettazione più intelligenti, sostenibili e inclusivi, soprattutto laddove BIM / Digital Twin / Intelligenza Artificiale si integrano per rendere la progettazione più informata e verificabile, riducendo rischi a valle e preparando dati e decisioni per cantiere e gestione (Fig. 6).

Applicazione in fase di costruzione | All'interno del ciclo di vita di un progetto edilizio la fase di costruzione implica una complessa attività di coordinamento di risorse per ottimizzare tempi e costi, tutti elementi determinanti per il conseguimento del successo complessivo dell'opera. I casi di studio selezionati per questa fase documentano come il Digital Twin può garantire una gestione più consapevole del rischio e una maggiore qualità del lavoro attraverso l'uso di piattaforme immersive e sistemi di realtà aumentata o virtuale, capaci di migliorare la visualizzazione delle attività di cantiere, il coordinamento tra gli operatori e la formazione del personale.

Il caso di studio analizzato da Chacón et alii (2024) riguarda un edificio in cemento armato gettato in opera, situato nel quartiere di Poble Nou a Barcellona. L'obiettivo era verificare come l'integrazione tra BIM, IoT e simulazioni potesse migliorare la produttività, la sicurezza e l'efficienza delle risorse in un contesto reale di cantiere. Il progetto si basa su un modello geometrico BIM collegato, tramite una piattaforma IoT, a una piattaforma digitale interattiva che integra un kit di applicazioni utilizzabili nelle diverse fasi del ciclo edilizio (Fig. 7), attraverso la quale è possibile simulare le attività di cantiere, pianificare e tracciare le lavorazioni, nonché gestire la sicurezza e l'analisi dei rischi.

L'aspetto innovativo risiede nell'approccio integrato e modulare della piattaforma, che consente di migliorare il processo decisionale e la trasparenza gestionale; l'impiego di una rete di sensori permette inoltre un monitoraggio costante del cantiere, riducendo i tempi di intervento per la risoluzione delle criticità. L'interoperabilità tra i diversi sistemi (modello BIM, sensori e piattaforma) garantisce il rispetto delle tempistiche previste e una gestione più efficiente delle informazioni.

Tuttavia la piattaforma si fonda su un ampio ecosistema di software e strumenti eterogenei che richiede competenze tecniche avanzate e una gestione complessa dei flussi informativi; tale aspetto riduce la scalabilità del modello e ne limita l'adozione in contesti caratterizzati da una bassa maturità digitale, configurandosi come un bias tecnologico rilevante. Inoltre l'implementazione universale dei Digital Twin nei cantieri è ancora in una fase iniziale; la variabilità delle attività, la presenza simultanea di molteplici stakeholder e la mole consistente di dati prodotti rappresentano una sfida per la qualità dei risultati generati dalla piattaforma. Nel complesso il progetto rappresenta un approccio innovativo alla digitalizzazione del settore delle costruzioni, offrendo una visione integrata e predittiva della fase di cantiere, ma per raggiungere il livello di maturità tecnologica auspicato, sarà necessario intensificare la ricerca e promuovere modelli di interoperabilità più accessibili e sostenibili.

Nel progetto dello Shanghai East Hospital il Digital Twin ha operato in cantiere come piattaforma fisico-digitale, sincronizzando fornitori e attività, integrando sensori geolocalizzati, centralizzando dati in tempo reale per analisi con Intelligenza Artificiale, verificando l'allineamento tra il modello e il costruito, riducendo errori e tempi decisionali e abilitando una gestione più efficiente (Fig. 8; Peng et alii, 2020). Inoltre lo studio introduce un nuovo sviluppo della figura dell'appaltatore, il quale assume il ruolo di coordinatore digitale, guidando in cantiere l'installazione e la mappatura dei sensori e garantendo l'allineamento continuo tra modello e realtà.

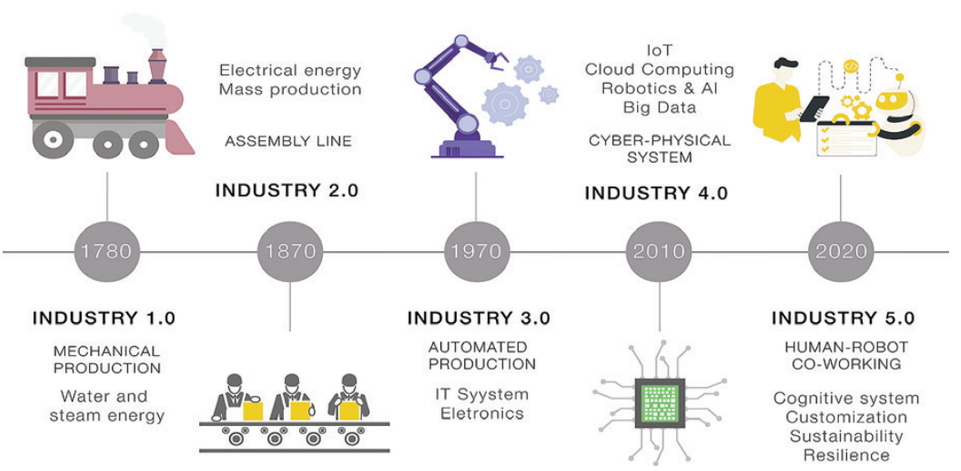
La possibilità di monitorare in tempo reale le prestazioni di cantiere e di connettere più sistemi informativi rappresenta un'evoluzione significativa rispetto alle modalità tradizionali di controllo, migliorando la tracciabilità e la qualità dei dati e favorendo una maggiore predittività decisionale. Allo stesso tempo l'adozione di un sistema così complesso richiede una struttura tecnologica avanzata, competenze digitali altamente specializzate e investimenti economici rilevanti, elementi che ne limitano l'applicabilità diffusa. Per tali ragioni l'approccio risulta più adatto a contesti di alta complessità funzionale, come quelli ospedalieri, piuttosto che a edifici residenziali o di piccola scala. Questa esperienza evidenzia il potenziale di una gestione integrata dei flussi informativi complessi, che tuttavia richiede l'elaborazione di politiche e strategie di sostegno capaci di garantirne un'adozione sostenibile e diffusa.

Infine nel progetto di costruzione di un'infrastruttura autostradale nel Regno Unito il Digital Twin è stato sperimentato come piattaforma interattiva per il monitoraggio del cantiere e la gestione della sicurezza, integrando dati BIM, rilievi tridimensionali e informazioni ambientali in tempo reale attraverso il motore Unreal Engine 5, utilizzando un approccio 'no-code' (Ellul et alii, 2024; Fig. 9). Tale caratteristica rappresenta un'evoluzione significativa nel campo dei Digital Twin per la costruzione, poiché offre un'interfaccia intuitiva e un'esperienza visiva realistica, permettendo ai lavoratori di comprendere in modo immediato le situazioni di pericolo, migliorando la consapevolezza dei rischi e supportando attività di formazione mirata.

Tuttavia la scelta di una piattaforma originariamente concepita per il gioco comporta anche limiti strutturali; infatti alcune funzioni dei Digital Twin non sono integrate in Unreal Engine 5 e il caricamento dei dati deve essere fatto manualmente, sottolineando il carattere ancora sperimentale del progetto che riproduce le logiche del Digital Twin senza realizzare una piena connessione fisico-digitale. Proprio queste difficoltà rendono evidente la necessità di continuare la ricerca verso sistemi più interoperabili e automatizzati, capaci di connettere in modo nativo ambienti di progettazione e ambienti di simulazione. Nonostante tali criticità l'esperienza inglese mette in luce il potenziale di questi ambienti digitali che si configurano come strumenti accessibili anche alle figure operative, rappresentando una nuova forma di innovazione per il settore delle costruzioni (Fig. 10).

Applicazione in fase di gestione e manutenzione | I Digital Twin stanno trasformando le fasi di gestione e manutenzione, offrendo agli operatori e ai manutentori una visione chiara delle attività necessarie grazie alla disponibilità di dati prestazionali raccolti attraverso sensori fisici integrati con sistemi per





la visualizzazione e il monitoraggio delle performance (Yang et alii, 2024). I casi studio selezionati per la fase di gestione e manutenzione sono stati individuati in base alla loro capacità di dimostrare come l'applicazione del Digital Twin possa ridurre tempi e costi delle attività manutentive, migliorando l'efficienza operativa e la pianificazione degli interventi. La scelta è inoltre motivata dalla volontà di evidenziare la scalabilità del modello digitale che si dimostra applicabile tanto ai contesti edilizi di piccola scala quanto alle realtà urbane più estese.

Nel caso del Manage5.0 la metodologia è orientata alla costruzione del Digital Twin di uno stabilimento industriale come leva per l'Industria 5.0 e per una transizione umano-centrica (Fig. 11; Osello et alii, 2024a). Lo studio introduce l'uso di cruscotti e sistemi di 'realtà estesa' per l'interazione con la replica digitale: le squadre di manutenzione monitorano i componenti, selezionano strategie d'intervento adeguate e riducono tempi e rischi, generando valore per l'immobile. In questo assetto il facility manager pianifica e comunica in sicurezza le attività, ottimizza risorse e materiali e riduce le emissioni legate a pratiche manutentive inefficienti.

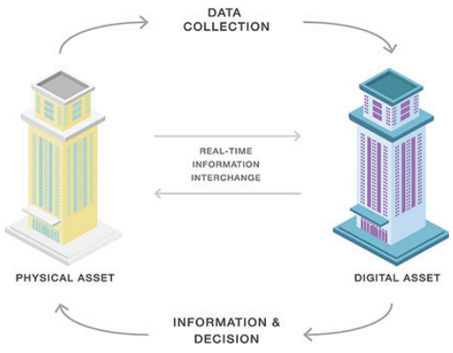
L'interpretazione uomo-macchina del sistema valorizza la partecipazione attiva dell'utente nei processi di gestione supportando il facility manager e gli operatori tecnici nella pianificazione e nella comunicazione degli interventi manutentivi, agevolati anche dall'uso di sistemi di realtà virtuale, garantendo il ruolo centrale della figura umana nella gestione del ciclo di vita dell'edificio (Fig. 12).

Il progetto definisce in modo esemplare un Digital Twin dinamico, in cui il modello BIM e i dati provenienti dai sensori in situ si integrano per produrre simulazioni energetiche visualizzate tramite un cruscotto digitale e ambienti immersivi, creando una connessione costante tra realtà fisica e gemello digitale. Tuttavia il sistema mostra ancora difficoltà nella comunicazione tra i diversi software e formati utilizzati, in quanto la conversione dei modelli tra file di origine diversa può determinare la perdita di dati e informazioni che compromettono la coerenza del modello e la corretta interoperabilità del Digital Twin. Queste discontinuità rendono necessario un lavoro costante di verifica e calibrazione, rallentando il processo e aumentando il rischio di errori. Nonostante ciò il progetto si distingue per l'utilizzo di software e tecnologie ampiamente diffuse, facilmente accessibili e già note agli operatori del settore, condizione che ne favorisce la trasferibilità sia rispetto al tipo di edificio analizzato sia per l'adozione di un sistema informativo realistico e replicabile. Un altro esempio, questa volta a scala urbana, è quello della Città di Bologna in cui il Digital Twin energetico riesce a supportare pianificazione e decisioni attraverso un sistema capace di operare efficacemente anche in condizioni di carenza o incompletezza dei dati (Longo et alii, 2024). Ciò è particolarmente rilevante nel contesto urbano, dove la disponibilità e la qualità delle informazioni sugli edifici risultano spesso frammentarie, non aggiornate o soggette a restrizioni legate alla privacy. L'intero processo, per quanto costruito su dati minimi, mira a generare un modello urbano energetico coerente, capace di descrivere lo stato attuale e di simulare scenari di retrofit e decarbonizzazione (Fig. 13).

Il Digital Twin non è infatti inteso soltanto come strumento tecnico di simulazione, ma come dispositivo di governance urbana orientato al miglioramento della qualità della vita dei cittadini, ponendo al centro le loro esigenze e la sostenibilità del contesto abitativo. Tale prospettiva umano-centrica, che riconosce il valore del gemello digitale come mediatore tra dati, processi decisionali e bisogni sociali, rappresenta uno dei principali punti di forza del progetto. Bisogna tuttavia riconoscere il limite dei sistemi di Digital Twin urbani che si trovano ancora in

Building process phase	Articles	Productivity	Quality and Energy efficiency	Health and Safety
Design phase	Yang et alii, 2024	✓	✓	
	Nguyen and Adhikari, 2023	✓		
	Lee et alii, 2021	✓		
	Nava and Melis, 2024		✓	✓
	Kaewunruen, Rungskunroch and Welsh, 2019		✓	
	Ugliotti, D'Addetta and Fabbricatore, 2024		✓	✓
	Zannoni et alii, 2024	✓		
Construction phase	Chacón et alii, 2024	✓		✓
	Peng et alii, 2020	✓	✓	✓
	Ellul et alii, 2024	✓		✓
Management / Maintenance phase	Osello et alii, 2024a	✓	✓	✓
	Longo et alii, 2024	✓		
	Osello et alii, 2024b	✓	✓	

Tab. 2 | Quantitative distribution of publications by project phase and thematic area (credit: A. E. D'Amore, 2025).



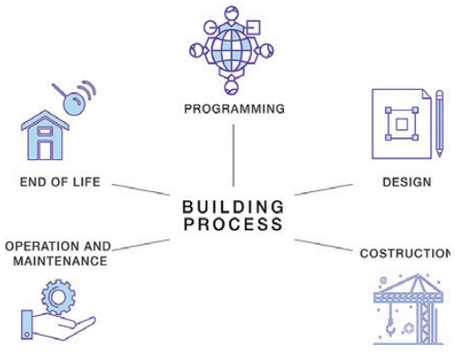


Fig. 3 | Digital Twin architecture schematic (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Fig. 4 | The phases of the building process (credit: A. E. D'Amore, 2025).

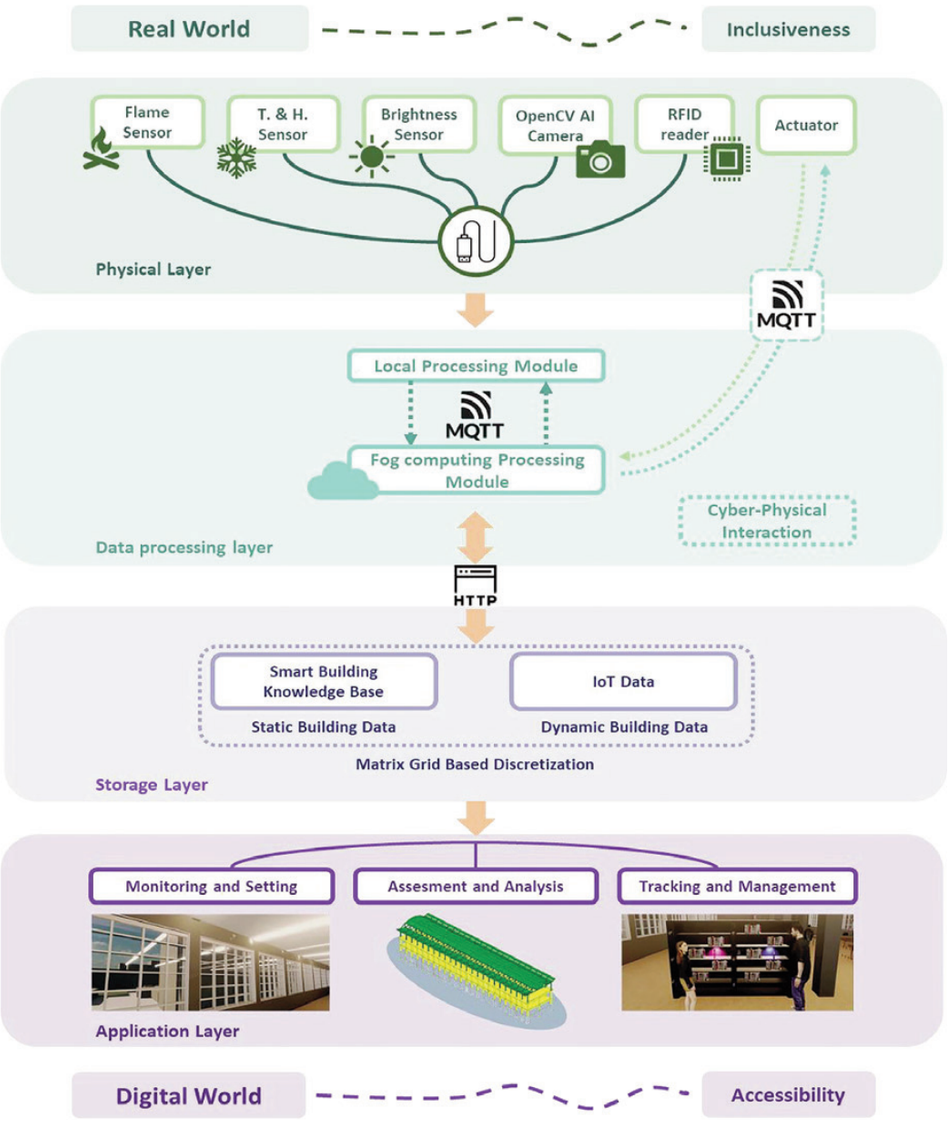


Fig. 5 | Methodological research framework (source: Ugliotti, D'Addetta and Fabbricatore, 2024).

una fase di maturità iniziale, caratterizzata da forti disomogeneità negli standard, dalla frammentazione delle fonti e dalla complessità di garantire continuità e aggiornamento del modello nel tempo.

Il valore del progetto risiede nel tentativo di colmare il divario di maturità dei Digital Twin, sperimentando approcci innovativi e costruendo un framework urbano digitale condiviso, in cui tecnologia, dati e governance si uniscono per favorire una manutenzione più consapevole, efficiente e sostenibile delle città, offrendo al tempo stesso nuove prospettive di ricerca.

Una prospettiva diversa viene affrontata nel caso del Palazzo Unico della Regione Piemonte, considerato un sistema complesso e sul quale viene adottato un linguaggio grafico innovativo e una metodologia in tre fasi (analisi, decodifica e sintesi; Fig. 14), che integra rilievi e documentazione in un BIM computazionale, riorganizza i dati e li restituisce tramite dashboard, diventando banco di prova per metodologie innovative di manutenzione e gestione (Osello et alii, 2024b). Tale metodologia, che integra pensiero computazionale e rappresentazione grafica, mira a trasformare la complessità in risorsa cognitiva, rendendo interpretabili i dati e migliorando il processo decisionale in ambito manutentivo.

Uno dei principali punti di forza del lavoro consiste nella capacità di rendere accessibili e comprensibili le informazioni tecniche, favorendo una gestione del Patrimonio edilizio più trasparente e partecipata. Un aspetto distintivo del progetto è la scalabilità della metodologia che ne permette l'applicazione anche in altri contesti con Patrimoni edilizi complessi o di grandi dimensioni. L'integrazione tra modelli BIM e algoritmi di analisi introduce un approccio innovativo nella gestione e manutenzione degli edifici, pur non potendo essere ancora definito un Digital Twin pienamente operativo e dinamico ma con basi per sviluppi futuri.

Tuttavia l'elevato livello di competenze tecniche richiesto per l'elaborazione dei modelli e per la gestione dei dati rappresenta una barriera d'accesso per le Pubbliche Amministrazioni, spesso prive di risorse e personale adeguatamente formato. Sul piano epistemologico inoltre permane la difficoltà di bilanciare la dimensione quantitativa dei dati con la valutazione qualitativa delle caratteristiche architettoniche e d'uso, che resta essenziale per una comprensione piena del comportamento del sistema edificio. In conclusione il caso del Palazzo della Regione Piemonte, pur con i limiti propri di un approccio ancora in fase di consolidamento, offre un contributo rilevante nel delineare un nuovo paradigma di 'gestione digitale', in cui algoritmi, rappresentazione grafica e pensiero sistemico si fondono per supportare decisioni più informate, trasparenti e orientate alla sostenibilità (Fig. 15).

Criticità, compromessi e fattori abilitanti | Dall'analisi della letteratura emerge che l'adozione dei Digital Twin nel processo edilizio comporta insieme potenzialità e frizioni. Gli studi teorici (Peng et alii, 2020; Wang et alii, 2024; Mousavi et alii, 2024) evidenziano come le principali criticità riguardino la governance dei dati e il coordinamento tra stakeholder, con negoziazioni su accessi, responsabilità e riuso delle informazioni lungo il ciclo vita. Nei contesti complessi persistono timori legati all'automazione e alla fiducia, poiché il Digital Twin opera per lo più in modalità diagnostica senza controllo automatico, mantenendo un presidio umano nelle decisioni (Peng et alii, 2020).

Secondo la letteratura più recente la capacità e il livello di dettaglio a cui è possibile adottare tecnologie avanzate come il Digital Twin dipendono anche dalla complessità dell'opera e dal grado di maturità digitale dell'organizzazione. L'automazione e il controllo offrono opportunità ma sollevano que-

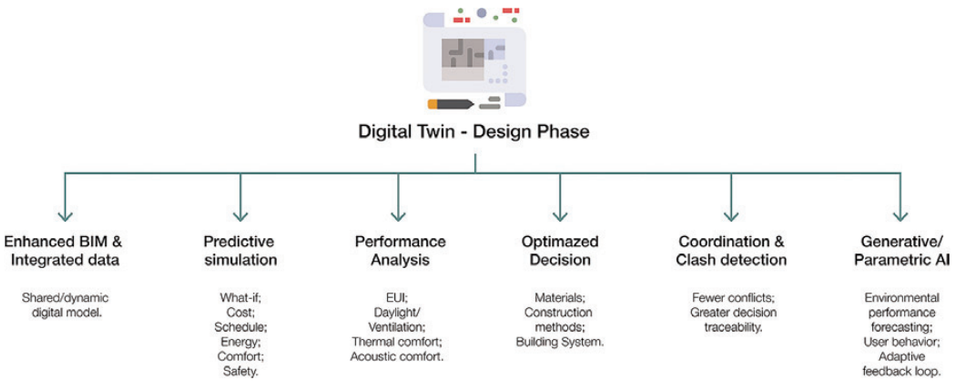


Fig. 6 | Application of Digital Twin in design phase (credit: A. E. D'Amore, 2025).

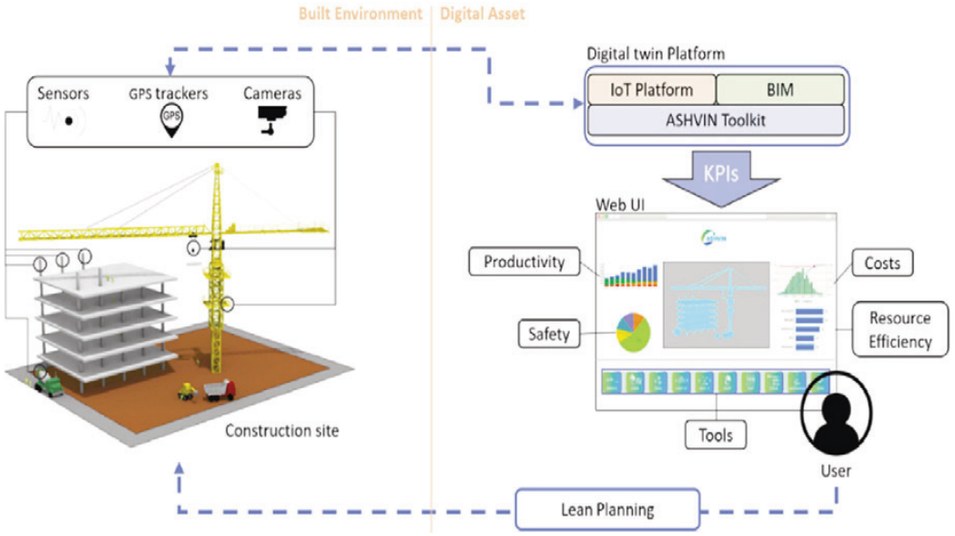


Fig. 7 | Information flow from data-collection to performance indicators (source: Chacón et alii, 2024).

stioni operative e di responsabilità; nel contesto attuale di riferimento i modelli decisionali basati sulla supervisione dell'essere umano bilanciano ambizione tecnologica e sostenibilità organizzativa, garantendo una gestione controllata dei processi (Nguyen and Adhikari, 2023; Weichbroth, Jandy and Zurada, 2024).

I casi studio analizzati confermano e concretizzano queste evidenze, mostrando come nella pratica il potenziale del Digital Twin si confronti con la complessità del coordinamento multi-attore e con la necessità di standardizzare i dati per garantire scalabilità e riuso. Nella fase di costruzione, ad esempio, il caso di Barcellona (Chacón et alii, 2024) mostra come la digitalizzazione sia ancora disomogenea e richieda un quadro chiaro di ruoli, diritti e doveri sul dato, formalizzato in policy operative; allo stesso modo il caso dello Shanghai East Hospital (Peng et alii, 2020) conferma la necessità di competenze specialistiche e di infrastrutture tecnologiche avanzate la cui carenza riduce la trasferibilità del modello in contesti a bassa maturità digitale.

Inoltre nella fase di gestione e manutenzione studi come quelli di Longo et alii (2024) e Osello et alii (2024b) mettono in luce che l'assenza di software pienamente interoperabili e l'uso di linguaggi grafici innovativi, pur utili alla lettura sistemica, possono produrre semplificazioni eccessive e richiedere competenze avanzate non sempre disponibili: queste evidenze applicative riflettono i limiti già individuati in letteratura, traducendoli in difficoltà operative e gestionali. Accanto agli aspetti tecnici e infrastrutturali sia gli studi teorici che i casi studio impongono una dimensione etica decisiva relativa alla privacy, alla sicurezza informatica e alla governance dei dati. L'interoperabilità incompleta dei dati, se non adeguatamente governata, ne limita l'impiego (Longo et alii, 2024), generando compromessi tra rapidità di sperimentazione e solida governance dei dati, tra apertura e tutela della riservatezza. L'assenza di policy unitarie e di norme di sicurezza adeguate riduce l'uso di dati sensibili e lascia funzioni incomplete (Peng et alii, 2020), imponendo di bilanciare innovazione e controllo degli impatti socio-etici.

Infine la convergenza tra letteratura e casi studio è evidente nella riflessione su nuove figure professionali e modelli organizzativi emergenti che redistribuiscano responsabilità lungo la filiera e garantiscano coerenza di processi e capacità di guidare il cambiamento tecnologico, organizzativo e culturale indotto dalla transizione digitale (Zannoni et alii, 2024). In sintesi, se il superamento delle criticità richiede compromessi espliciti e tracciabili, il prossimo passo è consolidare fiducia e responsabilità per abilitare gradi crescenti di automazione in sicurezza e benefici misurabili nelle fasi di progettazione, costruzione e gestione (Tab. 3).

In tale scenario il superamento delle criticità non può essere letto unicamente in chiave tecnologica o gestionale, ma richiede un allargamento del quadro interpretativo capace di includere dimensioni sociali e organizzative. Da questa prospettiva emerge un salto disciplinare che riconosce come l'efficacia del gemello digitale dipenda anche dalla sua capacità di generare valore umano: il benessere si misura nella capacità del sistema di migliorare salute, sicurezza e comfort ambientale; la formazione nella possibilità di trasferire competenze e apprendimento digitale; il lavoro dignitoso nella promozione di condizioni operative sicure, trasparenti e partecipative. Questa lettura interdisciplinare amplia il significato del gemello digitale, ponendolo come strumento di mediazione tra innovazione tecnologica e qualità della vita lavorativa, in coerenza con il paradigma umano-centrico dell'Industria 5.0.

Risultati trasversali: sinergie e compromessi con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile | In riferimento all'SDG 8 il Digital Twin contribuisce a una crescita produttiva e di qualità rendendo le fasi del processo edilizio più rapide, prevedibili e meno dispendiose. In progettazione flussi BIMtoBEM accelerano le analisi e riducono lavorazioni e tempi di coordinamento, con ricadute dirette su produttività ed efficienza nell'uso delle risorse (Osello et alii, 2024a); in cantiere e negli asset complessi monitoraggi in tempo reale, ispezioni virtuali e avvisi contestuali sostengono prevenzione e risposta rapida ai rischi, innalzando gli standard di sicurezza e riducendo i fermi produttivi (Chacón et alii, 2024; Peng et alii, 2020); in gestione interfacce e algoritmi collegati ai modelli informativi permettono di governare migliaia di ambienti in grandi strutture pubbliche, comprimendo i tempi decisionali del facility management e migliorando la qualità del servizio (Osello et alii, 2024a). L'ecosistema Digital Twin inoltre abilita acquisizione di competenze e nuove professionalità lungo la filiera, come il Transitional Industrial Desi-

gner che integra responsabilità economiche, sociali e ambientali lungo l'intero ciclo di vita dell'opera (Zannoni et alii, 2024) e crea spazi per servizi digitali e imprenditorialità, grazie a strumenti interoperabili e accessibili che facilitano adozioni graduali (Osello et alii, 2024b; Chacón et alii, 2024). In sintesi il Digital Twin riduce sprechi e tempi morti e amplia le competenze richieste dal mercato, favorendo occupazione qualificata, crescita inclusiva, nuovi ruoli e competenze lungo l'intero ciclo vita del costruito.

In riferimento all'SDG 7 il Digital Twin fa da ponte tra progetto e gestione per ampliare l'accesso a servizi energetici affidabili e a costi sostenibili, accelerare l'integrazione delle rinnovabili, migliorare l'efficienza e rafforzare infrastrutture e competenze. Sul fronte dell'efficienza, lo scambio di dati tra modello informativo e modello energetico in fase di progetto consente di comparare rapidamente alternative d'involucro e impianto (Osello et alii, 2024a): in esercizio il Digital Twin collegato a sensori abilita monitoraggi continui, rileva anomalie e simula previsioni, con risparmi misurabili e riduzione di guasti / ripari evitati (Peng et alii, 2020).

A scala urbana il Digital Twin supporta la configurazione di Comunità Energetiche e PED con valutazioni dei costi e dei benefici (Longo et alii, 2024). L'accessibilità economica è favorita dalla riduzione di sprechi e rilavorazioni lungo il ciclo vita e dalla gestione dei picchi energetici, con effetti su bollette e continuità del servizio (Peng et alii, 2020). Nel complesso il Digital Twin rende trasparenti le prestazioni, accelera le decisioni progettuali a bassa intensità energetica e coordina l'operazione efficiente dei sistemi contribuendo in modo concreto al raggiungimento dell'SDG 7.

In riferimento all'SDG 3 il Digital Twin contribuisce alla tutela della salute e alla riduzione dei rischi lungo l'intero ciclo vita dell'opera; sul versante prevenzione degli infortuni e sicurezza del lavoro il Digital Twin in cantiere abilita monitoraggio situazionale e allerta proattiva: nel caso autostradale l'integrazione di modelli 3D, flussi di dati e software di simulazione immersiva consente ispezioni virtuali, con effetti diretti sulla riduzione degli infortuni, e una migliore prontezza decisionale sul campo (Chacón et alii, 2024).

Inoltre l'uso di processi informativi, come il BIM e il CoSIM, e tecnologie digitali come la realtà virtuale adottate ai fini della pianificazione per fasi e addestramento immersivo su procedure critiche, trasferisce competenze in ambiente sicuro e riduce esposizione a scenari pericolosi; la stessa impostazione quantifica anche costi e misure anti-contagio, collegando la sicurezza organizzativa alla protezione della salute nei luoghi di lavoro (Luiso, 2021). Infine sul piano della salute ambientale e della qualità dell'aria i Digital Twin orientati all'energia supportano strategie di ventilazione e controllo microclimatico, manutenzione predittiva delle UTA e ottimizzazione dei consumi / emissioni; a scala urbana gemelli energetici semplificati consentono scenari di decarbonizzazione che riducono l'esposizione della popolazione a inquinanti e picchi termici (Osello et alii, 2024a; Longo et alii, 2024). In sintesi, tra cantiere edificio in esercizio e distretto, il Digital Twin riduce incidenti e condizioni nocive, tramite diagnosi e simulazione, e migliora il benessere di tutti gli attori coinvolti (Fig. 16).

Oltre ai risultati già discussi, i casi analizzati mostrano che il Digital Twin opera come 'infrastruttura abilitante' capace di connettere innovazione industriale e infrastrutturale, città sostenibili, cicli di consumo più sobri e traiettorie di decarbonizzazione, generando sinergie significative anche con altri SDG. In ambito produttivo e delle grandi infrastrutture, il Digital Twin consolida processi decisionali informati e introduce competenze e ruoli ad alto valore (Zannoni et alii, 2024; Chacón et alii, 2024).

A scala urbana la modellazione integrata di edifici, reti e flussi rende più leggibili le prestazioni dei distretti e supporta una regia coordinata di trasformazioni energetiche, mobilità e servizi, con effetti concreti su vivibilità e sicurezza (Longo et alii, 2024; Peng et alii, 2020; Gausa, 2024). Sul versante del-

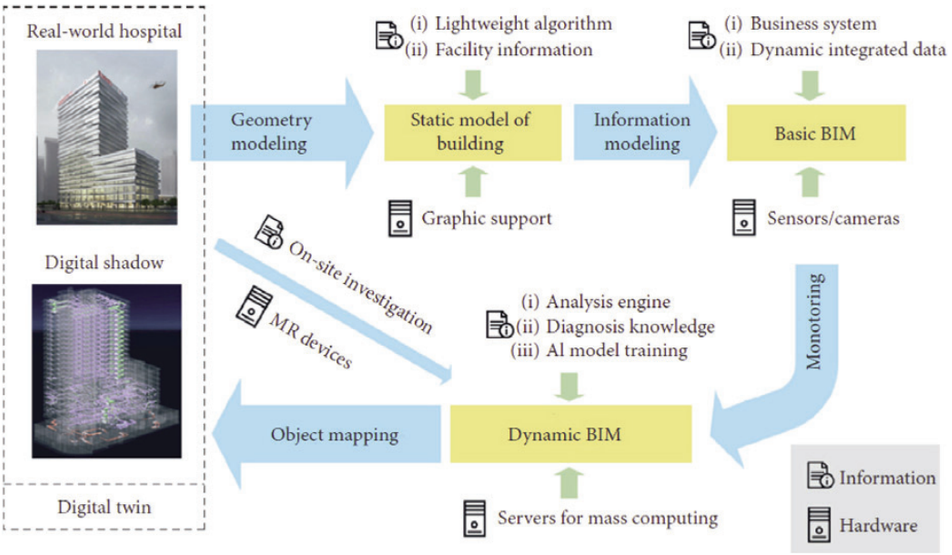


Fig. 8 | Main stages of a Digital Twin for the hospital building (source: Peng et alii, 2020).

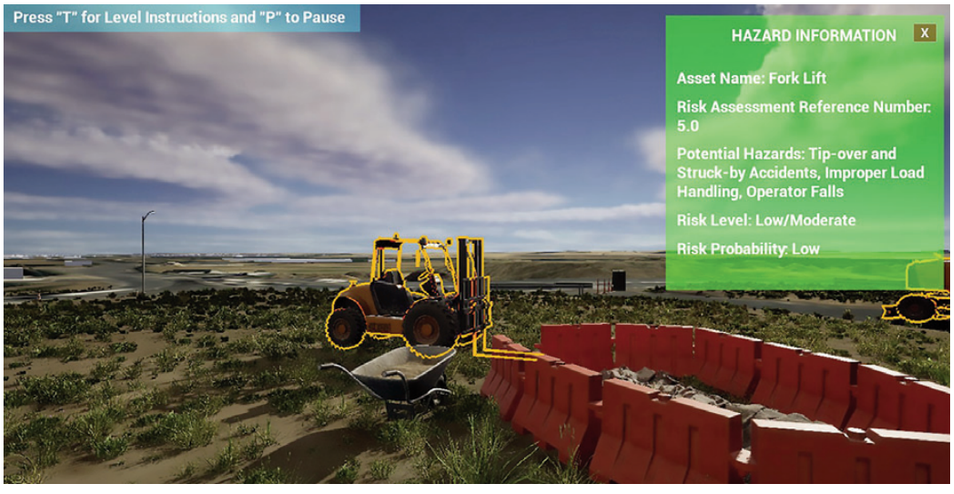
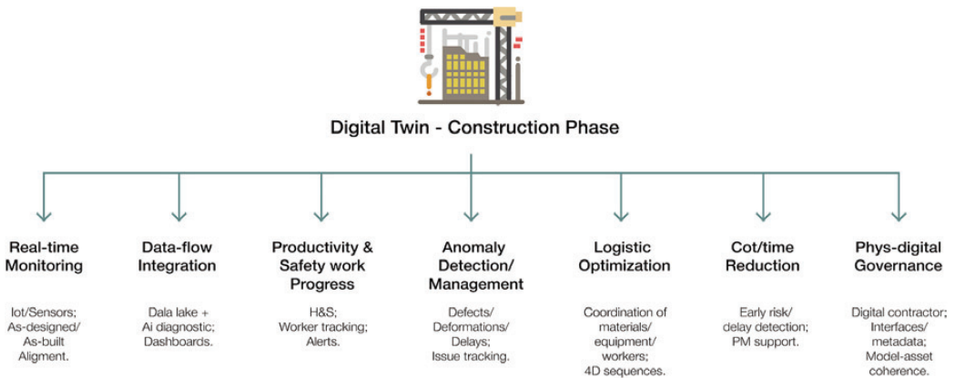
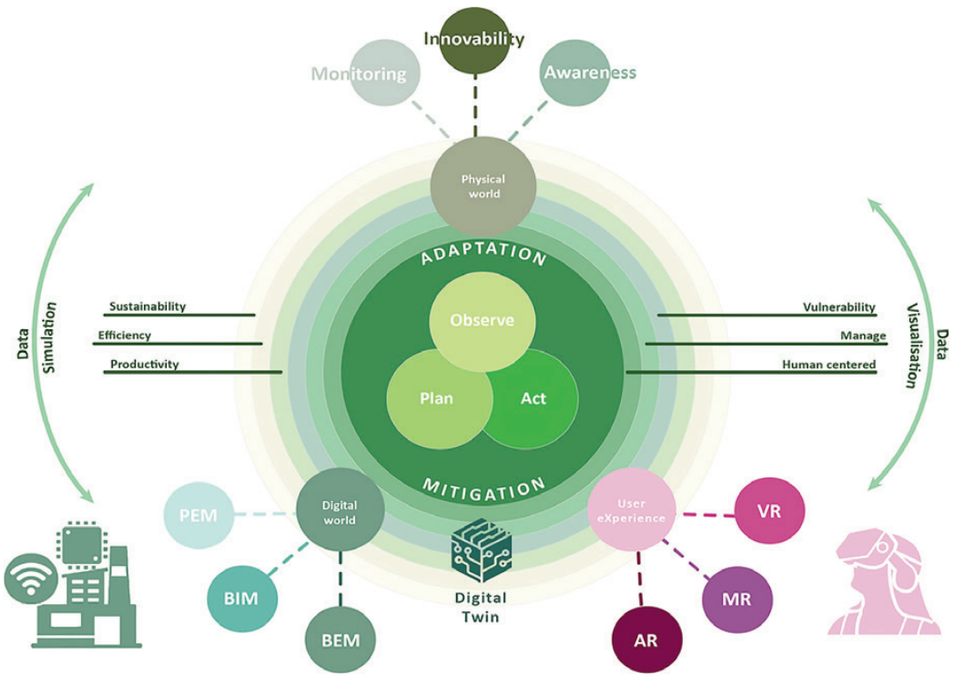


Fig. 9 | User interface with information on hazards and risks in the workplace (source: Ellul et alii, 2024).







le risorse il Digital Twin rende visibili inefficienze e opportunità lungo il ciclo di vita, orientando scelte di progetto, approvvigionamento e gestione verso minori sprechi e maggiore circolarità (Osello et alii, 2024a). In questo quadro la capacità del gemello di collegare simulazione e monitoraggio apre margini reali per ridurre consumi ed emissioni e pianificare percorsi di decarbonizzazione coerenti con i vincoli locali (Longo et alii, 2024).

Tuttavia l'adozione del Digital Twin comporta anche alcuni compromessi che incidono, in diversa misura, sul raggiungimento dei 17 SDG. Sul piano economico e occupazionale l'automazione e la digitalizzazione dei processi introdotte dal Digital Twin possono accentuare squilibri nel mercato del lavoro, riducendo la domanda di manodopera tradizionale e creando nuove barriere di accesso per operatori e imprese meno digitalizzate. L'aumento della complessità tecnologica richiede competenze avanzate e specialistiche che possono compromettere la crescita inclusiva e la qualità del lavoro.

Dal punto di vista energetico e ambientale i vantaggi in termini di efficienza operativa possono essere parzialmente compromessi dall'elevato fabbisogno di risorse necessario per alimentare l'infrastruttura digitale. I flussi di dati generati dai gemelli richiedono reti di sensori, server e data center di grandi dimensioni, con consumi elettrici significativi e impatti legati alla produzione, al raffreddamento e alla manutenzione delle apparecchiature. La gestione e l'approvvigionamento delle materie prime rappresentano un ulteriore punto critico che rende le filiere più vulnerabili e sollecita strategie di economia circolare per la gestione del ciclo vita delle tecnologie. Sul piano sociale l'evoluzione digitale che accompagna l'implementazione dei Digital Twin evidenzia il rischio di ampliamento del digital divide per imprese e comunità. Le categorie più vulnerabili, in particolare quelle con minori risorse economiche o competenze digitali, possono essere escluse dai benefici informativi e dai processi partecipativi, compromettendo il principio di equità e inclusione che sottende l'Agenda 2030. L'adozione del Digital Twin urbano è inoltre costosa e complessa, poiché ri-

Fig. 10 | Application of Digital Twin in construction phase (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Fig. 11 | Overview of the case study in Google Earth (source: Osello et alii, 2024a).

Fig. 12 | Centrality of human action in the physical-digital interaction (source: Osello et alii, 2024a).

chiede capacità di investimento, competenze e infrastrutture che non tutti i territori possiedono, con il rischio di ampliare il divario tra grandi città e realtà minori, creando disuguaglianze nella capacità di innovazione e nella qualità dei servizi urbani, in contrasto con gli obiettivi di città sostenibili e inclusive.

Dal punto di vista etico, sebbene il Digital Twin offra strumenti avanzati di prevenzione, monitoraggio e controllo dei rischi, la raccolta e la gestione di dati sensibili introducono criticità legate alla privacy, alla cybersicurezza e all'uso etico delle informazioni. Inoltre la crescente fiducia nei modelli digitali potrebbe compromettere la percezione diretta del rischio e la capacità decisionale autonoma degli operatori. Questi elementi richiedono un bilanciamento tra controllo tecnologico, tutela dei diritti individuali e valorizzazione della competenza umana, affinché il progresso digitale non comprometta il ruolo decisionale dell'essere umano.

Sul piano istituzionale e normativo l'attuale frammentazione degli standard, la mancanza di un quadro normativo unitario e la disomogeneità nelle politiche di gestione dei dati rendono difficile un'applicazione coordinata tra imprese, Enti pubblici e territori. L'assenza di linee guida comuni su interoperabilità, privacy, sicurezza e responsabilità rischia di rallentare l'innovazione e di generare disuguaglianze nell'accesso alle tecnologie. Una governance efficace del gemello digitale richiede dunque una cornice regolativa che armonizzi le pratiche e renda possibile un'azione integrata e trasparente (Fig. 17).

Conclusioni e prospettive future | La rassegna evidenzia come l'evoluzione tecnologica e digitale stia assumendo un ruolo sempre più centrale nel settore delle costruzioni, migliorando l'efficienza delle diverse fasi del ciclo vita dell'opera. I casi esaminati mostrano come il Digital Twin favorisca una crescita produttiva e di qualità, rendendo le fasi del processo edilizio più rapide, prevedibili e meno onerose, ottimizzando l'efficienza energetica, rafforzando la tutela della salute e del benessere, contribuendo allo sviluppo dell'economia circolare e alla mitigazione dei cambiamenti climatici (Sharma and Gupta, 2024).



Fig. 13 | Decarbonisation roadmap (source: Longo et alii, 2024).

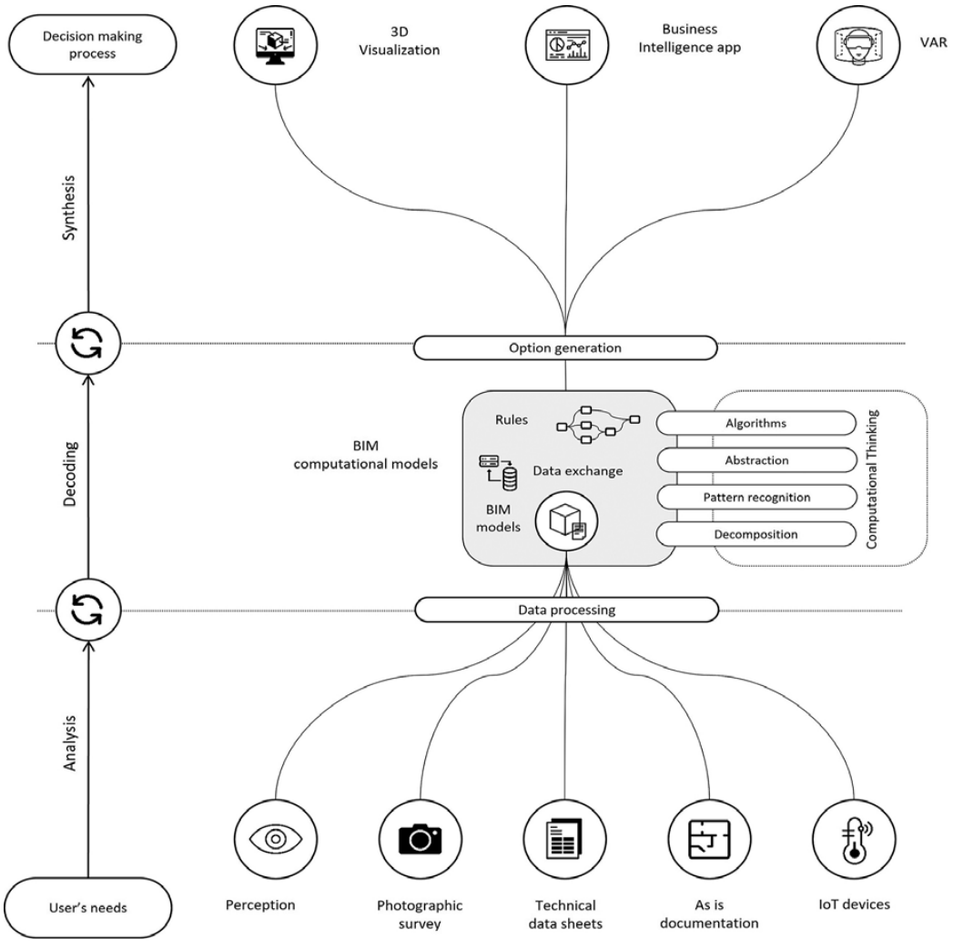


Fig. 14 | Informative decision-making process (source: Osello et alii, 2024b).

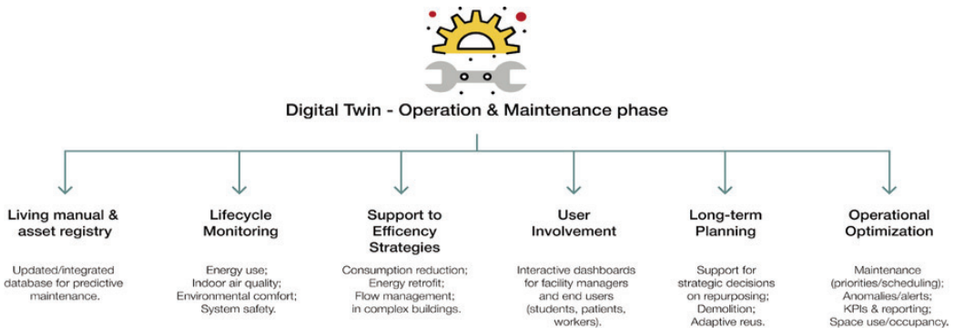


Fig. 15 | Application of Digital Twin in O&M phase (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Domain	Key issues	Trade-offs	Enablers / Actions
Governance and Stakeholders	Unclear access, responsibilities, and data reuse; DT often remains diagnostic-only (Peng et alii, 2020)	Experiment Speed ↔ Solid Data Governance	Data policies and contractual clauses; RACI roles; SLAs; audit logs and traceability
Data and Interoperability	Heterogeneous sources; incomplete standards; ethics / privacy constraints (Longo et alii, 2024)	Openness ↔ Privacy; Data Granularity ↔ Sustainability	Open standards (IFC / ontologies / APIs); metadata catalogues; role-based access; privacy-by-design / DPIA
Automation and Safety-critical	Limited automatic actuation; manual fallback required	Decision Speed ↔ Validation / Safety	Human-in-the-loop; explainable AI; safety controls; fail-safe / circuit-breaker procedures
Model Fidelity and Reliability	Simplifications to cut time / costs risk reliability (Osello et alii, 2024)	Accuracy ↔ Resources	Validation metrics; M&V with real data; purpose-fit LOD / LOI; specialist software
Visualisation and Skills	Innovative visuals risk over-simplification; skills gaps	Clarity ↔ Information Richness	Visual analytics guidelines; training / upskilling; data stewardship
Infrastructure and Scalability	High CapEx / OpEx; retrofit on as-built; continuity of data flows/storage (Peng et alii, 2020)	Performance ↔ Cost; Cloud ↔ On-prem	Modular architectures; hybrid edge+cloud; CapEx / OpEx planning; sensor prioritisation
Organization and Market	Fragmented processes; uneven maturity; need for pilots (Chacón et alii, 2024)	Standardisation ↔ Local Adaptation	Pilot projects with KPIs; scalability roadmaps; operational guidelines
Ethics, Trust, and Adoption	Public / worker distrust; socio-ethical implications (Nava and Melis, 2024)	Radical Innovation ↔ Impact Control	Stakeholder engagement; algorithmic transparency; communication and training
Professional Roles (TID/DER)	Hard to operationalise in multi-actor ecosystems (Zannoni et alii, 2024)	Central Governance ↔ Actor Autonomy	Information requirements; interoperability standards; metrics; change management
Responsibility (accountability)	Weak reporting / traceability	Speed ↔ Auditability	KPIs and reporting; audit trails; clear 'duty to account' rules

Tab. 3 | Challenges, trade-offs, and enabling conditions of the Digital Twin in the building process (credit: A. E. D'Amore, 2025).

Tuttavia l'analisi critica svolta mostra come le principali revisioni tecniche tendano a trascurare le implicazioni umane, etiche e di giustizia sociale introdotte dal paradigma 5.0, riducendo il gemello digitale a strumento prestazionale e non a dispositivo relazionale e cognitivo. In questo senso il contributo propone uno scarto interpretativo che restituisce alla persona, come progettista, lavoratore e utente, un ruolo centrale nel processo di digitalizzazione edilizia, valorizzandone competenze, responsabilità e capacità decisionale.

Nella fase di progettazione la centralità della persona si esprime nella capacità del progetto di tradurre bisogni, abitudini e aspettative in soluzioni spaziali e tecnologiche. Il caso esaminato mostra come il Digital Twin consenta di simulare diversi scenari d'uso e di verificare in tempo reale il livello di comfort ambientale, la qualità dell'aria, la luminosità o la percezione acustica, orientando così le decisioni progettuali verso il benessere dell'utente finale. Questa possibilità di osservare, prevedere e adattare le prestazioni dell'edificio, già in fase di ideazione, rappresenta uno dei contributi più significativi del gemello digitale che diventa strumento di ascolto e mediazione tra la dimensione tecnica e quella umana: il progettista non è sostituito dall'automazione, ma ne guida l'uso critico, interpretando i dati per restituire valore sociale e culturale al progetto.

Nella fase di costruzione i casi analizzati mostrano un forte carattere sperimentale: vengono utilizzati sistemi e piattaforme digitali provenienti da settori diversi rispetto a quello delle costruzioni, come motori di simulazione o ambienti di realtà virtuale, nel tentativo di migliorare la pianificazione, il monitoraggio e la sicurezza in cantiere. Queste sperimentazioni aprono nuove possibilità, ma evidenziano anche limiti di trasferibilità e difficoltà di applicazione diffusa, poiché la fase di costruzione è la più articolata e complessa del processo edilizio.

In cantiere si intrecciano attività molteplici, competenze specialistiche e responsabilità condivise che rendono indispensabile una gestione coordinata e una comunicazione efficace tra tutti gli attori coinvolti. In questo scenario il Digital Twin può diventare uno strumento prezioso per connettere persone, mezzi e informazioni, migliorando l'efficienza delle operazioni e, allo stesso tempo, garantendo la salvaguardia dei lavoratori. L'introduzione di nuove figure professionali legate alla digitalizzazione può avere un impatto decisivo nel migliorare la qualità, la sicurezza e la sostenibilità del cantiere. La vera innovazione non risiede dunque solo negli strumenti digitali, ma nella capacità di mantenere la persona al centro del processo, riconoscendone il ruolo di protagonista e di beneficiario della trasformazione.

Nella fase di gestione e manutenzione la centralità della persona assume un significato ancora più concreto, perché è in questa fase che il rapporto tra tecnologia e vita quotidiana si manifesta pienamente. I casi analizzati mostrano come il Digital Twin possa supportare le attività di manutenzione prevedendo guasti, ottimizzando gli interventi e migliorando l'efficienza energetica, ma il suo valore più profondo risiede nella capacità di mettere in connessione le persone con gli spazi che abitano e gestiscono: tecnici, facility manager e utenti finali di-

ventano parte attiva del sistema, contribuendo con i loro comportamenti e le loro decisioni ad aggiornare e migliorare il modello digitale.

In questa prospettiva il gemello digitale non è solo uno strumento di controllo, ma un ambiente collaborativo che rafforza la consapevolezza, la partecipazione e la responsabilità condivisa nella cura dell'edificio o della città. La possibilità di visualizzare in tempo reale lo stato di un impianto o di un ambiente non solo semplifica le operazioni, ma rende più trasparente la gestione, permettendo a chi utilizza gli spazi di comprenderne il funzionamento e di contribuire al loro miglioramento; è in questo dialogo continuo tra dato e esperienza che il Digital Twin diventa realmente umano-centrico.

Il contributo si è concentrato sulle fasi di progettazione, costruzione, gestione e manutenzione e ha tralasciato altre due fasi fondamentali del ciclo vita dell'opera, la programmazione e la dismissione o fine vita. Tale scelta – sebbene sia motivata dal fatto che la sperimentazione del Digital Twin in queste fasi risulta ancora limitata – costituisce il limite principale del contributo, pur nella consapevolezza che il gemello abbia un elevato potenziale strategico per la gestione sostenibile delle risorse, la pianificazione preventiva e la valutazione dell'impatto ambientale dell'opera nel lungo periodo. In tale prospettiva la ricerca potrà estendere l'osservazione oltre le fasi considerate, adottando una visione lungo l'intero ciclo vita e integrando approcci valutativi trasversali che si estendano anche a target di sostenibilità più ampi, ad esempio quelli relativi al sociale.

Alla luce di quanto esposto si ritiene necessario un ulteriore sforzo collaborativo tra comunità scientifica, governance e società civile che da un lato prosegua nell'affrontare le questioni tecniche e tecnologiche, dall'altro adotti modalità di ricerca centrate sulla persona, riconoscendone il ruolo sia di decisore che di utente finale. Al contempo la trasferibilità in altri settori affini che similmente richiedono lo sviluppo di modelli digitali complessi finalizzati alla gestione di asset contribuirebbe a una maggiore comprensione dei flussi metodologici attraverso lo scambio di informazioni e conoscenze.

Da questa prospettiva il Digital Twin può essere letto come piattaforma di convergenza fra saperi tecnici e discipline sociali, aprendo scenari di ricerca applicata che includono economia circolare, etica dei dati, formazione digitale e nuovi modelli di governance collaborativa. La trasferibilità dei risultati ad ambiti come la gestione urbana, l'industria e le infrastrutture suggerisce la possibilità di costruire un linguaggio metodologico condiviso per l'analisi dei processi complessi e delle loro ricadute sui contesti di vita.

In tale ottica l'originalità del presente contributo risiede nel porre questa traiettoria entro la cornice umano-centrica dell'Industria 5.0: l'avanzamento del Digital Twin non viene letto solo come maturazione tecnologica o infrastrutturale, né soltanto come leva di nuove professionalità, ma come capacità di rispondere ai bisogni degli utenti (Nava and Melis, 2024). In questo scenario l'innovazione trova terreno fertile per espandersi ed evolvere, a condizione che mantenga la persona e i suoi bisogni al centro delle proposte di valore. In tale accezione l'innovazione sostenibile pone congiuntamente al primo piano benessere sociale e ambientale, favorendo una transizione etica a beneficio della collettività (Sposito and Scalisi, 2024). Le implicazioni culturali e pratiche sono evidenti: un Digital Twin concepito per le persone e non solo sui dati, può sostenere crescita qualificata e aggiornamento di professionalità, ridurre sprechi ed esternalità lungo la filiera e migliorare salute e sicurezza, traducendo l'innovazione digitale in valore sociale ed economico condiviso. In prospettiva la ricerca dovrà indagare nuovi modelli di valutazione multidimensionale del gemello digitale, capaci di coniugare indicatori tecnici e metriche di benessere, promuovendo un quadro di politiche per l'adozione consapevole e inclusiva di tali strumenti. Ciò implica un cambio di paradigma dal gemello come 'replica tecnologica' al gemello come 'ecosistema cognitivo e sociale', fondato su responsabilità, equità e cooperazione, secondo una visione in cui il progresso digitale si misura nella sua capacità di potenziare l'opera umana e non di sostituirla.

The construction sector represents one of the main sources of greenhouse gas emissions worldwide and the AEC industry contributes substantially to the impacts of the built environment (Xu, Kim and Chen, 2025; Amarasinghe et alii, 2025), standing among the primary contributors to global carbon emissions, with approximately 40% of total energy-related emissions (World Green Building Council, 2024). From global initiatives such as the Paris Agreement (UN, 2015b) to the strategies of the European Union, including the European Green Deal (European Commission, 2019), the construction industry emerges as a key lever for decarbonisation and climate neutrality. In Italy, the Integrated National Energy and Climate Plan (Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2023) aligns objectives and resources to improve the energy performance of the building stock (Tab. 1).

According to the study conducted by the Buildings Performance Institute Europe (BPIE, 2024), measures adopted in Italy have reduced CO_2 emissions and the energy consumption of buildings and increased the use of renewables; however, these advances are still not aligned with the set objectives, postponing over two-thirds of the effort until 2050. In this perspective, the principle of sustainable development assumes a foundational role in rethinking the construction sector, orienting it toward models capable of combining economic growth, environmental protection, and social well-being, ensuring a balanced, equitable, and lasting use of available resources (Fig. 1; Holden et alii, 2014).

The transition from Industry 4.0 to Industry 5.0 reinforces this vision, shifting the focus from automation and process efficiency to a human-centred paradigm in which sustainability, social equity, and technological innovation integrate to generate resilient solutions and long-term services for the benefit of society (Fig. 2; Wang et alii, 2024). Emerging technologies such as the Digital Twin play a strategic role in translating the human-centred perspective of Industry 5.0 into concrete applications for the construction sector (Nava and Melis, 2024). Today, this technology represents one of the most significant innovations in civil engineering, finding application throughout the different stages of the building process, from planning, design, and construction to management and maintenance (Zhang et alii, 2023). Within this thematic framework, the paper aims to contribute to the scientific and disciplinary debate by offering a critical interpretation of the interconnections between technological and digital innovation and the Sustainable Development Goals (SDGs), supported by an examination of case studies addressing the role of the Digital Twin applied to various stages of the building process as a lever for productive, environmental, and social transformation. Through an interdisciplinary and multilevel approach, the contribution highlights the complexity of the topic in relation to current challenges, trade-offs, and future application perspectives, aiming to guide the construction sector toward an effective transformation with environmental, economic, and social impacts.

The objective of this critical essay is to reflect on the potential of the Digital Twin not only as a technological advancement but as a mediation tool between innovation and social responsibility, recognising the value of human contribution in every stage of the building life cycle. It focuses on the needs of clients, workers, and end users, contributing to the development of new paradigms for well-being, safety, and professionalism. This perspective differs from the current state of the art, which tends to privilege a mainly technical and performance-oriented interpretation of the Digital Twin, proposing instead a systemic vision capable of integrating technological, social, and environmental dimensions. The purpose of the contribution is to foster a critical reflection on the digital transition of the construction sector, guiding it toward development models that combine technological innovation, work quality, and people's well-being, in line with the human-centred vision of Industry 5.0.

This approach broadens the disciplinary debate on the use of digital technologies, offering insights into the development of new models for evaluating well-being and productivity, as well as fostering more inclusive and sustainable governance strategies. This contribution mainly targets the scientific community, public decision-makers, construction sector professionals, stakeholders involved in managing and transforming the built environment, and end users, providing valuable perspectives to inform policies, strategies, and practices towards an ethical, fair, and sustainable digital transition.

The reference framework is that of contemporary architectural and technological research, with particular attention to the digital transformations of building processes and their social and environmental impacts. The originality of this contribution lies in adopting a critical and systemic perspective that interprets the Digital Twin not only as a technological tool but also as a driver of productive, social, and environmental transformation, while maintaining the centrality of the human being.

The paper is structured into six main sections, the first of which traces the evolution of the concept of the Digital Twin and its applications up to the construction sector, introducing the enabling technologies associated with it and the areas of application within the construction process. The methodological section adopts a critical, argumentative, and analytical approach, aimed at systematising the adoption methods of the Digital Twin across the design, construction, and management phases of a project, highlighting its potential, limitations, and barriers to adoption. Subsequently, the paper presents reflections on the selected literature and case studies, synthesising the theoretical and practical evidence

and linking technological transformations with organisational, social, and ethical aspects consistent with the human-centred vision of Industry 5.0.

A section dedicated to the synthesis of cross-cutting results analyses the synergies between the Digital Twin and the SDGs, focusing particularly on the connections to Goals 8, 7, and 3, while also providing an overall view of the synergistic or trade-off effects that its adoption may generate with respect to the entire framework of the 2030 Agenda. The conclusions critically review the findings that emerged in each phase of the building process, highlighting how the Digital Twin can reinforce the centrality of the human being during design, construction, and management stages, as well as identifying the main limitations of the study and possible future development directions aimed at a more conscious, inclusive, and human-centred use of technology.

Origin and application developments of the Digital Twin in the building life cycle | The essay, characterised by a narrative-critical and multidisciplinary approach, is based on a qualitative selection of scientific articles analysing the application of the Digital Twin to the design, construction, and management / maintenance phases of the building process.

The selection of sources was guided by a qualitative and interpretative criterion aimed at identifying contributions that meaningfully represent the evolution of the Digital Twin paradigm in the construction sector. Each phase was examined through representative case studies chosen for their ability to highlight their relationships with the SDGs, particularly with productivity (SDG 8), energy efficiency (SDG 7), and health and well-being (SDG 3). The sources were selected based on their conceptual and interdisciplinary relevance and subjected to a critical reading aimed at revealing their limitations, biases, and potential. Indeed, many studies tend to favour a technology-and performance-oriented vision of the Digital Twin, neglecting the organisational, social, and governance dimensions that influence its adoption. This meta-analytical reflection serves as the starting point for this critical interpretation.

The analysis of the selected application cases enables the identification of existing gaps and opportunities for further investigation, laying the foundation for a discussion oriented toward the principles of Industry 5.0 and the Sustainable Development Goals. For each phase, the articles presenting Digital Twins applications are examined, demonstrating the connections between contributions and the main thematic areas of reference: productivity, quality and energy efficiency, health, and well-being (Tab. 2).

The concept of the Digital Twin originated in the early 2000s in the manufacturing and aerospace fields, aiming to develop a digital copy of a physical system for performance monitoring and optimisation (Iliuta et alii, 2024). The Digital Twin system is structured into three fundamental components (Fig. 3): the real physical space; its virtual counterpart, which faithfully mirrors the characteristics of physical reality; and a bidirectional bridge connecting the two domains, enabling continuous exchange of data and information (Wang, 2020).

This technology has progressively become a cross-sectoral tool in numerous application areas: from aerospace, where it enables predictive maintenance and decision support; to the energy sector, where it optimises systems and infrastructures; from manufacturing, where it allows the simulation of the entire product life cycle and promotes sustainable practices; to smart transport, where it enhances the dynamic monitoring of infrastructures and the mobility efficiency (Mousavi et alii, 2024). The adoption of the Digital Twin in the construction sector is more recent, emerging alongside the spread of BIM and other digital tools, fuelling the transformation of the industry and offering an integrated approach to managing the entire life cycle of a built asset (Yang et alii, 2024).The construction sector is currently facing a highly competitive global context (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023). Historically characterised by slow adoption of digital innovations, the AEC industry now shows a growing need for tools capable of supporting more ecological, efficient, and safe practices (Zhang et alii, 2023). In this scenario, the introduction of advanced digital technologies and intelligent systems, supported by connectivity infrastructures and integrated data ecosystems, has fostered the adoption of new tools and methodologies, triggering a profound transformation of the construction sector.

According to the UNI 10838:1999 standard, the building process is defined as an organised and structured sequence of phases that begins with the identification of the needs expressed by clients and users and leads to their fulfilment through a pathway that includes the design, production, construction, and management of the built asset itself (Fig. 4).

In the international context, the building process is commonly framed within the broader concept of the project life cycle. The U.S. Project Management Institute and the UK Association for Project Management identify the project life cycle as a sequence of four phases, from initiation to conclusion (Wang and Chen, 2023). Within this context, the building process functions as an intrinsically complex system that currently faces pressing challenges related to environmental, economic, and social sustainability goals.

Technological innovation plays a strategic role as an enabling factor in the transition toward more sustainable practices, as it enables the generation of products and services that respond more effectively and promptly to the growing complexity of contemporary needs (Weichbroth, Jandy and Zurada, 2024). The analysis of the scientific literature reveals a predominant concentration of studies on the application of the Digital Twin to the design, construction, and management phases of the life cycle of built assets (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023; Cumo et alii, 2025; Zhang et alii, 2023), which are also the phases analysed in the present contribution.

The innovative aspect of the Digital Twin lies in its ability to operate across different processes and scales: from design visualisation to the simulation of construction processes, from real-time performance monitoring to energy consumption optimisation, up to the planning of maintenance, renovation, and urban layout – from individual buildings to districts and cities (Rafsanjani and Nabizadeh, 2023; Longo et alii, 2024; Yang et alii, 2024).

In addition to these applications, a growing body of literature highlights the integration of the Digital Twin with Artificial Intelligence and autonomous agents capable of making operational decisions and interacting via machine-to-machine logic. This shifts the focus from mere monitoring to automated decision-making and redefines roles, responsibilities, and competencies within design and management processes (Celaschi, Casoni and Formia, 2024). Given the multiple uses of Digital Twin, this paper adopts a reference framework of its essential components to guide the following sections.

Application in the design phase | In the design phase, the adoption of Building Information Modeling (BIM) enables the creation of integrated digital models that incorporate geometric, performance, and functional information about the asset (Yang et alii, 2024), while reducing design conflicts and documentation discrepancies and ensuring more accurate control over design decisions (Nguyen and Adhikari, 2023). At this stage, the Digital Twin represents an evolution of BIM, transforming it into a dynamic and continually updated model by integrating IoT sensors and artificial intelligence techniques (Lee et alii, 2021).

The integration of Artificial Intelligence into design processes enables the addition of predictive capabilities – such as environmental performance, user behaviour, and material responses – alongside image production, thus serving as both an exploratory and communicative tool (Nava and Melis, 2024). An example of the integrated application of BIM, Digital Twins, and Artificial Intelligence is provided by the study on the redevelopment of the former Manifattura Tabacchi in Turin (Italy), where the design of a smart library capable of connecting physical and digital data in real time is being tested (Ugliotti, D'Addetta and Fabbricatore, 2024). The research focuses on creating a multilevel digital system that integrates data and processes from different domains into a single, coherent environment.

At the lowest level, BIM provides the static information structure of the building, upon which a second level is built, consisting of a network of IoT sensors and smart cameras dedicated to collecting real-time environmental data. The third level, dedicated to processing, uses Artificial Intelligence algorithms to interpret collected information, detect behavioural patterns, and generate automated system responses. The methodology, based on an automated spatial matrix (Fig. 5), enables monitoring of environmental parameters such as brightness, temperature, and occupancy, and automatically triggers responses to optimise comfort, safety, and energy efficiency.

The main strength, which also underlies the choice of this case study, lies in the effective, synergistic integration of the three technologies, making the Digital Twin an operational, dynamic, and progressively adaptive tool. Furthermore, the assessment of user needs introduces an adaptive and predictive perspective, elevating the Digital Twin from a mere monitoring instrument to an operational system capable of autonomous decision-making, oriented toward user well-being and the sustainability of the built environment. There is growing evidence that BIM and Digital Twins technologies can also support simulations and scenario analyses for more informed and sustainable decision-making (Kaewunruen, Rungskunroch and Welsh, 2019), also redefining professional roles: Zannoni et alii (2024) introduce the figure of the Transitional Industrial Designer, responsible for anticipating scenarios, mediating among stakeholders, and managing complex processes.

However, several challenges persist, including technological and infrastructural complexity, the need for specialised skills, and delicate ethical and

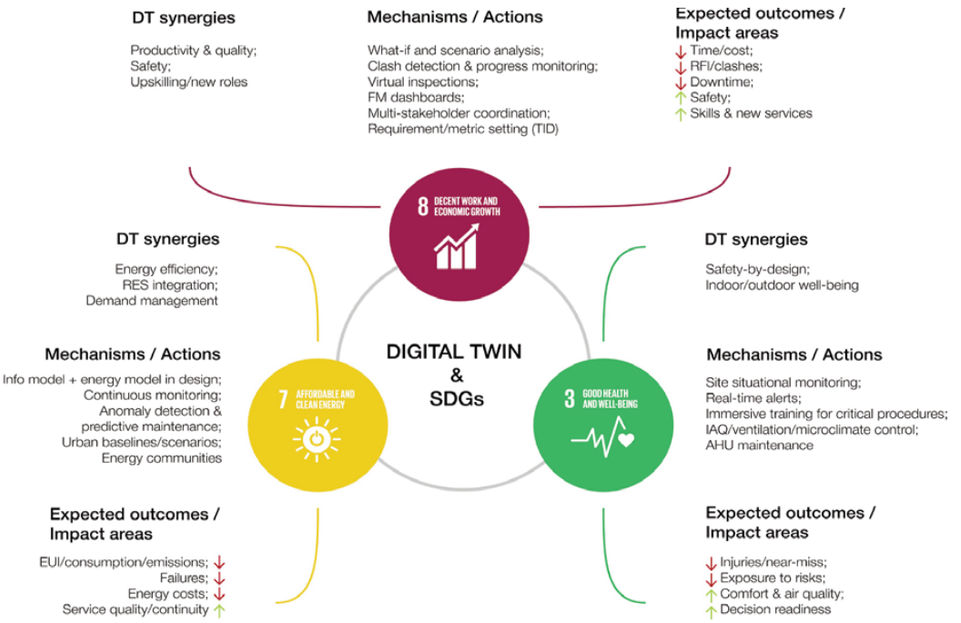


Fig. 16 | Synergies between Digital Twins and the Sustainable Development Goals (credit: A. E. D'Amore, 2025).

privacy issues related to the use of sensitive data. The still-experimental nature of research and the dependence on advanced technological infrastructures currently limit its full applicability, but the methodological framework demonstrates strong evolutionary potential, opening concrete prospects for the diffusion of more intelligent, sustainable, and inclusive design models – especially where BIM, Digital Twins, and Artificial Intelligence are integrated to make design more informed and verifiable, reducing downstream risks and preparing data and decisions for construction and management (Fig. 6).

Application in the construction phase | Within the life cycle of a building project, the construction phase involves complex resource coordination to optimise time and costs, key factors for achieving the overall success of the work. The case studies selected for this phase demonstrate how the Digital Twin can enable more conscious risk management and higher work quality through the use of immersive platforms and augmented or virtual reality systems that enhance the visualisation of construction site activities, operator coordination, and personnel training.

The case study analysed by Chacón et alii (2024) concerns a reinforced concrete building constructed on-site in the Poble Nou district of Barcelona. The objective was to verify how integrating BIM, IoT, and simulations could improve productivity, safety, and resource efficiency in a real construction site context. The project is based on a BIM geometric model connected, through an IoT platform, to an interactive digital platform that integrates a set of applications usable in the various stages of the construction cycle (Fig. 7), through which it is possible to simulate site activities, plan and track operations, as well as manage safety and risk analysis.

The innovative aspect lies in the platform's integrated modular approach, which improves decision-making processes and enhances management transparency; the use of a sensor network also enables continuous monitoring of the construction site, reducing intervention time to resolve issues. The interoperability between the different systems (BIM model, sensors, and platform) ensures compliance with planned schedules and more efficient information management.

However, the platform relies on a broad ecosystem of heterogeneous software and tools that require advanced technical expertise and complex management of information flows. This aspect reduces the model's scalability and limits its adoption in contexts with low digital maturity, thereby representing a significant technological bias. Moreover, the universal implementation of Digital Twins on construction sites is still in its early stages; the variability of activities, the simultaneous presence of multiple stakeholders, and the large amount of data produced pose considerable challenges to the quality of results generated by the platform. Overall, the project represents an innovative approach to the digitalisation of the construction sector, offering an integrated and predictive vision of the construction phase, but to reach the desired level of technological maturity, further research and the promotion of more accessible and sustainable interoperability models will be necessary.

In the Shanghai East Hospital project, the Digital Twin operated on-site as a physical-digital platform, synchronising suppliers and activities, integrating geolocated sensors, centralising real-time data for AI-driven analyses, verifying alignment between the model and the built work, reducing errors and decision times, and enabling more efficient management (Fig. 8; Peng et alii, 2020). The study also introduces a new role for the contractor: a digital coordinator who leads the installation and mapping of sensors and ensures continuous alignment between the model and reality.

The ability to monitor site performance in real time and connect multiple information systems represents a significant evolution from traditional control methods, improving data traceability and quality and enhancing decision predictability. At the same time, adopting such a complex system requires advanced technological infrastructure, highly specialised digital skills, and substantial financial investment – factors that limit widespread applicability. For these reasons, this approach is more suitable for high-functional-complexity contexts, such as hospitals, rather than residential or small-scale buildings. This experience demonstrates the potential of integrated management of complex information flows, but it nevertheless requires the development of supporting policies and strategies to ensure sustainable and widespread adoption.

Finally, in a highway infrastructure project in the United Kingdom, the Digital Twin was tested as an interactive platform for site monitoring and safety management, integrating BIM data, 3D surveys, and real-time environmental information through the Unreal Engine 5, using a 'no-code' approach (Ellul et alii, 2024; Fig. 9). This feature represents a significant evolution in the field of Digital Twins for constructions, as it provides an intuitive interface and realistic visual experience, allowing workers to immediately recognise hazardous situations, improving risk awareness, and supporting targeted training activities.

However, the use of a platform designed initially for gaming also entails structural limitations: some Digital Twin functions are not integrated into Unreal Engine 5, and data must be uploaded manually, highlighting the project's still-experimental nature and its inability to achieve a full physical-digital connection. These challenges underline the need to continue research toward more interoperable and automated systems capable of natively connecting design and simulation environments. Despite these limitations, the UK experience highlights the potential of such digital environments, which are accessible tools even for operational personnel and represent a new form of innovation for the construction industry (Fig. 10).

Application in the management and maintenance phase | Digital Twins are transforming management and maintenance phases, offering operators and maintenance teams a clear view of required activities through the availability of performance data collected by physical sensors integrated with visualisation and performance monitoring systems (Yang et alii, 2024). The case studies selected for the management and maintenance phases were chosen for



Fig. 17 | Word cloud of the benefits and trade-offs of the Digital Twin in the building process (credit: A. E. D'Amore, 2025).

their ability to demonstrate how Digital Twin applications can reduce maintenance time and costs while improving operational efficiency and intervention planning. The selection was also motivated by the intention to highlight the scalability of the digital model, which proves applicable to both small-scale building contexts and broader urban environments.

In the Manage 5.0 case, the methodology focuses on building the Digital Twin of an industrial facility as a driver for Industry 5.0 and for a human-centred transition (Fig. 11; Osello et alii, 2024a). The study introduces the use of dashboards and extended reality systems for interaction with the digital replica: maintenance teams monitor components, select appropriate intervention strategies, and reduce time and risks, thus generating value for the asset. In this configuration, the facility manager safely plans and communicates activities, optimises resources and materials, and reduces emissions associated with inefficient maintenance practices.

The human-machine interpretation of the system enhances user participation in management processes, supporting facility managers and technical operators in the planning and communication of maintenance activities, facilitated by virtual reality systems, and ensuring the central role of the human figure in building life-cycle management (Fig. 12).

The project provides an exemplary definition of a dynamic Digital Twin, integrating the BIM model and on-site sensor data to produce energy simulations visualised through a digital dashboard and immersive environments, creating a continuous connection between the physical reality and its Digital Twin. However, the system still faces communication challenges among different software and file formats, as converting models between heterogeneous sources may cause data loss and compromise model consistency and Digital Twin interoperability. These discontinuities require constant verification and calibration, slowing down processes and increasing the risk of errors. Nevertheless, the project stands out for its use of widely available software and technologies that are easily accessible and familiar to industry operators, thus favouring transferability both in terms of the type of analysed building and the adoption of a realistic and replicable information system.

Another example at the urban scale is the City of Bologna, where an energy Digital Twin supports planning and decision-making through a system that operates effectively even under conditions of data scarcity or incompleteness (Longo et alii, 2024). This is particularly relevant in urban contexts, where information about buildings is often fragmented, outdated, or subject to privacy restrictions. The entire process, though developed from minimal data, aims to generate a coherent urban energy model capable of describing the current state and simulating retrofit and decarbonisation scenarios (Fig. 13).

The Digital Twin is not conceived merely as a technical simulation tool but as an urban governance instrument aimed at improving citizens' quality of life, placing their needs and the sustainability of the living environment at the centre. This human-centred perspective, which recognises the Digital Twin's value as a mediator between data, decision-making processes, and social needs, is one of the project's main strengths. However, it is necessary to acknowledge the limitations of urban Digital Twin systems, which are still at an early stage of maturity, characterised by significant standardisation gaps, fragmented data sources, and challenges in ensuring model continuity and updates over time.

The value of the project lies in its attempt to bridge the Digital Twin maturity gap by experimenting with innovative approaches and building a shared digital urban framework in which technology, data, and governance converge to promote more informed, efficient, and sustainable city maintenance, while offering new research perspectives.

A different standpoint is provided by the case of the Palazzo Unico of the Piedmont Region, conceived as a complex system, where an innovative graphic language and a three-phase methodology (analysis, decoding, and synthesis; Fig. 14) are applied. This technology integrates surveys and documentation into a computational BIM, reorganising data and presenting them via dashboards, thus serving as a testing ground for innovative maintenance and management methodologies (Osello et alii, 2024b). This methodology, which combines computational thinking with graphical representation, aims to transform complexity into a cognitive resource, making data interpretable and improving decision-making processes in maintenance contexts.

One of the project's main strengths lies in its ability to make technical information accessible and understandable, fostering more transparent and participatory management of the building stock. A distinctive feature of the project is the scalability of the methodology, allowing its application in other contexts with complex or large-scale building assets. The integration of BIM models with analytical algorithms offers an innovative approach to building management and maintenance. However, it cannot yet be considered a fully operational, dynamic Digital Twin, laying the groundwork for future developments.

However, the high level of technical expertise required for model processing and data management represents an access barrier for public administrations, which often lack adequate resources and trained personnel. On an epistemological level, difficulties persist in balancing the quantitative dimension of data with the qualitative assessment of architectural and functional characteristics, which remains essential for a complete understanding of building behaviour.

In conclusion, the case of the Palazzo Unico of the Piedmont Region, despite the limitations inherent in an approach still in the consolidation phase, provides a significant contribution to defining a new paradigm of 'digital management', in which algorithms, graphic representation, and systemic thinking merge to support more informed, transparent, and sustainability-oriented decision-making (Fig. 15).

Critical issues, trade-offs, and enabling factors | From the literature review, it emerges that adopting Digital Twins in the building process entails both potential and challenges. Theoretical studies (Peng et alii, 2020; Wang et alii, 2024; Mousavi et alii, 2024) highlight that the main critical issues concern data governance and coordination among stakeholders, with negotiations over access, responsibilities, and information reuse throughout the life cycle. In complex contexts, concerns related to automation and trust persist, since the Digital Twin mainly operates in diagnostic mode without automatic control, maintaining a human presence in decision-making (Peng et alii, 2020).

According to more recent literature, the capability and level of detail with which advanced technologies such as the Digital Twin can be adopted also depend on the complexity of the asset and the organisation's digital maturity. Automation and con-

trol offer opportunities but raise operational and responsibility issues. In the current reference context, decision-making models based on human supervision balance technological ambition and organisational sustainability, ensuring controlled process management (Nguyen and Adhikari, 2023; Weichbroth, Jandy and Zurada, 2024).

The case studies analysed confirm and make these findings concrete, showing how, in practice, the potential of the Digital Twin must face the complexity of multi-actor coordination and with the need to standardise data to ensure scalability and reuse. In the construction phase, for example, the Barcelona case (Chacón et alii, 2024) shows that digitalisation remains uneven and requires a clear framework of roles, rights, and duties regarding data, formalised in operational policies. Similarly, the Shanghai East Hospital case (Peng et alii, 2020) confirms the need for specialised skills and advanced technological infrastructures, which reduce the transferability of the model in contexts with low digital maturity.

Furthermore, in the management and maintenance phase, studies such as those by Longo et alii (2024) and Osello et alii (2024b) highlight that the absence of fully interoperable software and the use of innovative graphic languages – while useful for systemic reading – can produce excessive simplifications and require advanced skills that are not always available: these application findings reflect the limits already identified in the literature, translating them into operational and managerial difficulties.

Alongside technical and infrastructural aspects, both theoretical studies and case studies point to a decisive ethical dimension related to privacy, cybersecurity, and data governance. Incomplete data interoperability, if not adequately governed, limits its use (Longo et alii, 2024), generating trade-offs between the speed of experimentation and solid data governance, between openness and the protection of confidentiality. The absence of unified policies and adequate security standards reduces the use of sensitive data and leaves functions incomplete (Peng et alii, 2020), imposing a balance between innovation and the control of socio-ethical impacts.

Finally, the convergence between literature and case studies is evident in reflections on new professional roles and emerging organisational models that redistribute responsibilities along the supply chain and ensure process coherence and the ability to steer the technological, organisational, and cultural change induced by the digital transition (Zannoni et alii, 2024). In short, if overcoming the critical issues requires explicit, traceable trade-offs, the next step is to consolidate trust and accountability to enable progressively safer automation and measurable benefits across the design, construction, and management phases (Tab. 3).

In this scenario, overcoming the critical issues cannot be interpreted solely in technological or managerial terms, but requires a broadening of the interpretive framework to include social and organisational dimensions. From this perspective, a disciplinary leap emerges that recognises how the effectiveness of the Digital Twin also depends on its ability to generate human value. Well-being is assessed by the system's capacity to improve health, safety, and environmental comfort; training is measured by the ability to transfer skills and digital learning; the promotion of safe, transparent, and participatory operating conditions evaluates decent work. This interdisciplinary reading expands the meaning of Digital Twin, positioning it as a mediator between technological innovation and quality of working life, in line with the human-centred paradigm of Industry 5.0.

Cross-cutting results: synergies and trade-offs with the Sustainable Development Goals | With reference to SDG 8, the Digital Twin contributes to productive and quality growth by accelerating, predicting, and reducing the cost of the building process. In design, BIM-to-BEM workflows accelerate analyses and reduce rework and coordination times, with direct effects on productivity and resource efficiency (Osello et alii, 2024a). On construction sites and in complex assets, real-time monitoring, virtual inspections, and contextual alerts support prevention and rapid response to risks, improving safety standards and reducing production downtime (Chacón et alii, 2024; Peng et alii, 2020). Interfaces and algorithms linked to information models enable the management of thousands of spaces in large public facilities, thereby shortening decision-making time and improving service quality (Osello et alii, 2024a).

The Digital Twin ecosystem also enables skill acquisition and the development of new professional profiles along the supply chain, such as the Transitional Industrial Designer, who integrates economic, social, and environmental responsibilities across the entire life cycle of the asset (Zannoni et alii, 2024). It also creates opportunities for digital services and entrepreneurship through interoperable, accessible tools that facilitate gradual adoption (Osello et alii, 2024b; Chacón et alii, 2024). In summary, the Digital Twin reduces waste and idle time and broadens the skills demanded by the market, fostering qualified employment, inclusive growth, and new roles and competences across the entire life cycle of the built environment.

With reference to SDG 7, the Digital Twin acts as a bridge between design and management to expand access to reliable and affordable energy services, accelerate the integration of renewables, improve efficiency, and strengthen infrastructures and skills. In terms of efficiency, data exchange between the information model and the energy model during design enables rapid comparison of envelope and system alternatives (Osello et alii, 2024a). In operation, the sensor-connected Digital Twin allows continuous monitoring, anomaly detection, and forecast simulations, resulting in measurable savings and reductions in faults or avoided repairs (Peng et alii, 2020).

At the urban scale, the Digital Twin supports the configuration of Energy Communities and PEDs, with cost-benefit assessments (Longo et alii, 2024). Economic accessibility is favoured by reducing waste and rework along the life cycle and by managing energy peaks, with effects on bills and service continuity (Peng et alii, 2020). Overall, the Digital Twin makes performance transparent, accelerates low-energy-intensity design decisions, and coordinates the efficient operation of systems, making a concrete contribution to achieving SDG 7.

Regarding SDG 3, the Digital Twin contributes to health protection and risk reduction throughout the asset's life cycle. In terms of accident prevention and workplace safety, the on-site Digital Twin enables situational monitoring and proactive alerts. In the highway case, integrating 3D models, data streams, and immersive simulation software enables virtual inspections, thereby directly reducing accidents and enhancing decision-making readiness in the field (Chacón et alii, 2024).

Moreover, the use of information processes such as BIM and CoSIM, and digital technologies such as virtual reality adopted for phased planning and immersive training on critical procedures, transfers skills in a safe environment and reduces exposure to hazardous scenarios. The same setup also quantifies costs and anti-contagion measures, linking organisational safety to workplace health protection (Luiso, 2021).

Finally, regarding environmental health and air quality, energy-oriented Digital Twins support ventilation and microclimate control strategies, predictive maintenance of AHUs, and optimisation of consumption/emissions. At the urban scale, simplified energy twins enable decarbonisation scenarios that reduce population exposure to pollutants and heat peaks (Osello et alii, 2024a; Longo et alii, 2024). In summary, from the construction site to the building in operation and the district level, the Digital Twin reduces accidents and harmful conditions through diagnosis and simulation and improves the well-being of all actors involved (Fig. 16).

Beyond the already discussed results, the cases analysed show that the Digital Twin operates as an 'enabling infrastructure' that connects industrial and infrastructural innovation, sustainable cities, more sustainable consumption cycles, and decarbonisation pathways, generating significant synergies with other SDGs as well. In the productive sector and within large infrastructures, the Digital Twin consolidates informed decision-making processes and introduces high-value skills and roles (Zannoni et alii, 2024; Chacón et alii, 2024).

At the urban scale, the integrated modelling of buildings, networks, and flows enhances the legibility of district performance and supports a coordinated management of energy transformations, mobility, and services, with tangible effects on livability and safety (Longo et alii, 2024; Peng et alii, 2020; Gausa, 2024). On the resources side, the Digital Twin makes inefficiencies and opportunities visible along the life cycle, guiding design, procurement, and management choices toward less waste and greater circularity (Osello et alii, 2024a). In this framework, the twins' ability to link simulation and monitoring creates real opportunities to reduce consumption and emissions, and to plan decarbonisation pathways that are consistent with local constraints (Longo et alii, 2024).

However, adopting the Digital Twin also involves trade-offs that affect, to varying degrees, the achievement of the 17 SDGs. On the economic and employment front, automation and process digitalisation introduced by the Digital Twin can exacerbate labour-market imbalances, reducing demand for traditional labour and creating new access barriers for less digitally equipped operators and firms. The increased technological complexity requires advanced and specialised skills that may compromise inclusive growth and work quality.

From an energy and environmental standpoint, the operational efficiency gains may be partially offset by the high resource demand required to power digital infrastructure. Data streams generated by twins require sensor networks, servers, and large data centres, with significant electricity consumption and impacts related to the production, cooling, and maintenance of equipment. The management

and sourcing of raw materials represent an additional critical point that makes supply chains more vulnerable and calls for circular-economy strategies throughout the technological life cycle. On the social level, the digital evolution accompanying the implementation of Digital Twins highlights the risk of widening the digital divide among firms and communities. The most vulnerable categories – particularly those with fewer economic resources or digital skills – may be excluded from informational benefits and participatory processes, undermining the principle of equity and inclusion underlying the 2030 Agenda. The adoption of urban Digital Twins is also costly and complex, as it requires investment capacity, skills, and infrastructures that not all territories possess. This can widen the gap between large cities and smaller realities, creating inequalities in innovation capacity and the quality of urban services, in contrast with the objectives of sustainable and inclusive cities.

From an ethical perspective, although the Digital Twin offers advanced tools for risk prevention, monitoring, and control, the collection and management of sensitive data raise critical privacy, cybersecurity, and ethical-use issues. Moreover, growing reliance on digital models could compromise direct risk perception and operators' autonomous decision-making capacity. These elements require a balance between technological control, protection of individual rights, and valorisation of human competence, ensuring that digital progress does not undermine the human decision-making role.

On the institutional and regulatory front, the current fragmentation of standards, the lack of a unified regulatory framework, and uneven data management policies make coordinated application among companies, public bodies, and territories difficult. The absence of common guidelines on interoperability, privacy, security, and responsibility risks slowing innovation and generating inequalities in access to technologies. Effective governance of the Digital Twin, therefore, requires a regulatory framework that harmonises practices and enables integrated and transparent action (Fig. 17).

Conclusions and future perspectives | The review shows that technological and digital evolution are playing an increasingly central role in the construction sector, improving the efficiency of the asset's life-cycle phases. The cases examined show how the Digital Twin fosters productive and high-quality growth by speeding up, making more predictable, and reducing the onerousness of the building process, optimising energy efficiency, strengthening protection of health and well-being, and contributing to circular economy development and climate change mitigation (Sharma and Gupta, 2024).

However, the critical analysis conducted shows that most technical reviews tend to overlook the human, ethical, and social justice implications introduced by the 5.0 paradigm, reducing the Digital Twin to a performance tool rather than a relational and cognitive device. In this sense, the contribution advocates an interpretive shift that restores to the person – as designer, worker, and user – a central role in the process of construction digitalisation, valorising competences, responsibilities, and decision-making capacity.

In the design phase, the centrality of the human factor is expressed in the project's ability to translate needs, habits, and expectations into spatial and technological solutions. The case examined demonstrates how the Digital Twin enables simulation of different use scenarios and real-time verification of environmental comfort, air quality, lighting, and acoustic perception, thereby guiding design decisions toward the well-being of the end user. This possibility of observing, predicting, and adapting building performance from the earliest stages of conception represents one of the most significant contributions of the Digital Twin, which becomes a tool for listening and mediation between the technical and the human dimension: the designer is not replaced by automation but guides its critical use, interpreting data to return social and cultural value to the project.

In the construction phase, the analysed cases exhibit a strong experimental character: digital systems and platforms from sectors other than construction are used – such as simulation engines and virtual reality environments – to improve planning, monitoring, and construction site safety. These experiments open new possibilities but also reveal limits on transferability and difficulties in large-scale application, since construction is the most articulated and complex phase of the building process.

On construction sites, multiple activities, specialised skills, and shared responsibilities intersect, making coordinated management and effective communication among all actors essential. In this scenario, the Digital Twin becomes a valuable tool for connecting people, equipment, and information, improving operational efficiency while ensuring workers' safety. The introduction of new professional roles linked to digitalisation can have a decisive impact on improving the quality, safety, and sustainability of the construction site. True innovation, therefore, lies not only in digital tools but also in the ability to keep the person at the centre of the process, recognising their role as protagonist and beneficiary of the transformation.

In the management and maintenance phase, the centrality of the person assumes an even more concrete meaning, as it is in this phase that the relationship between technology and everyday life fully manifests. The cases analysed show how the Digital Twin can effectively support maintenance activities by predicting failures, optimising interventions, and improving energy efficiency. Yet, its deepest value lies in its ability to connect people with the spaces they inhabit and manage. Technicians, facility managers, and end users become active parts of the system, contributing through their behaviours and decisions to updating and improving the digital model.

In this perspective, the Digital Twin is not only a control tool but a collaborative environment that strengthens awareness, participation, and shared responsibility in the care of the building and the city. The possibility of visualising in real time the state of a system or space not only simplifies operations but also makes management more transparent, enabling users to understand how spaces function and to contribute to their improvement. It is within this continuous dialogue between data and experience that the Digital Twin becomes truly human-centred.

This contribution has focused on the design, construction, operation, and maintenance phases, while deliberately omitting two other fundamental phases of the asset life cycle, programming and decommissioning (or end-of-life). This choice – although motivated by the fact that Digital Twin experimentation in these phases is still limited – constitutes the main limitation of the contribution. At the same time, it acknowledges the high strategic potential of the twin for sustainable resource management, preventive planning, and long-term assessment of the asset's environmental impact. In this perspective, future research may extend observations beyond the phases considered, adopting a whole-life-cycle vision and integrating cross-cutting assessment approaches that also extend to broader sustainability targets, for example, those related to the social dimension.

In light of what has been presented, a further collaborative effort among the scientific community, governance, and civil society is deemed necessary, on the one hand, to continue addressing technical and technological challenges, and on the other, to adopt human-centred research approaches that recognise the person's role as both decision-maker and end user. At the same time, extending the transferability of these practices to other related sectors that similarly require the development of complex digital models for asset management would contribute to a greater understanding of methodological flows through the exchange of information and knowledge.

From this perspective, the Digital Twin can be understood as a platform for convergence between technical knowledge and the social sciences, opening up scenarios for applied research that include circular economy, data ethics, digital training, and new models of collaborative governance. The transferability of results to fields such as urban management, industry, and infrastructures suggests the possibility of building a shared methodological language for analysing complex processes and their impacts on living contexts.

In this view, the originality of the present contribution lies in placing this trajectory within the human-centred framework of Industry 5.0: the advancement of the Digital Twin is not read solely as technological or infrastructural maturation, nor merely as a lever for new professional roles, but as the capacity to respond to users' needs (Nava and Melis, 2024). In this scenario, innovation finds fertile ground to expand and evolve, provided it keeps the person and their needs at the centre of the value proposition. In this sense, sustainable innovation prioritises social and environmental well-being, fostering an ethical transition for the benefit of society (Sposito and Scalisi, 2024).

The cultural and practical implications are evident: a Digital Twin designed for people – not merely for data – can support qualified growth and professional upskilling, reduce waste and externalities along the supply chain, and enhance health and safety, translating digital innovation into shared social and economic value. Looking ahead, research should investigate new models for the multidimensional evaluation of the Digital Twin that can combine technical indicators and well-being metrics, and promote a policy framework for the conscious and inclusive adoption of these tools. This implies a paradigm shift from the twin as a 'technological replica' to the twin as a 'cognitive and social ecosystem', founded on responsibility, equity, and cooperation, in a vision where digital progress is measured by its ability to enhance human work rather than replace it.

References

Amarasinghe, I., Liu, T., Stewart, R. A. and Mostafa, S. (2025), "Paving the way for lowering embodied carbon emissions in the building and construction sector", in *Clean Technologies and Environmental Policy,* vol 27, pp. 1825-1843. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10098-024-03023-6 [Accessed 30 September 2025].

BPIE – Buildings Performance Institute Europe (2024), *Italy Buildings Climate Tracker – Is Italy on track to decarbonise its building stock?*. [Online] Available at: bpie.eu/publication/italy-buildings-climate-tracker-is-italy-on-track-to-decarbonise-its-building-stock/ [Accessed 30 September 2025].

Celaschi, F., Casoni, G. and Formia, E. (2024), "La mediazione del Design – L'integrazione tra agenti artificiali autonomi, produzione manifatturiera e servizi | The mediation of Design – The integration between autonomous artificial agents, manufacturing production, and services", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 334-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16282024 [Accessed 30 September 2025].

Chacón, R., Posada, H., Ramonell, C., Jungmann, M., Hartmann, T., Khan, R. and Tomar, R. (2024), "Digital twinning of building construction processes – Case study – A reinforced concrete cast-in structure", in *Journal of Building Engineering*, vol. 84, article 108522, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108522 [Accessed 30 September 2025].

Cumo, F., Giovenale, A. M., Pennacchia, E. and Tiburcio, V. A. (2025), "Towards a Healthier Hospital Environment – The Role of Digital Twins in Achieving Optimal Environmental Comfort", in *Digital Twins and Applications*, vol. 2, issue 1, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1049/dgt2.70002 [Accessed 30 September 2025].

Ellul, C., Hamilton, N., Pieri, A. and Floros, G. (2024), "Exploring Data for Construction Digital Twins – Building Health and Safety and Progress Monitoring Twins Using the Unreal Gaming Engine", in *Buildings*, vol. 14, issue 7, article 2216, pp 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14072216 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640 [Accessed 30 September 2025].

Gausa, M. (2024), "Complessità, n-città e sistemi dinamici multilivello – Verso una (geo)urbanità in rete e in reti | Complexity, n-city, and multilevel dynamic systems – Towards a networked (geo)urbanity and networks", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 16-29. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1612024 [Accessed 30 September 2025].

Holden, E., Linnerud, K. and Banister, D. (2014), "Sustainable development – Our Common Future revisited", in *Global Environmental Change*, vol. 26, pp. 130-139. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.006 [Accessed 30 September 2025].

Iliuță, M.-E., Moisescu, M.-A., Pop, E., Ionita, A.-D., Caramihai, S.-I. and Mitulescu, T.-C. (2024), "Digital Twin – A Review of the Evolution from Concept to Technology and Its Analytical Perspectives on Applications in Various Fields", in *Applied Sciences*, vol. 14, issue 13, article 5454, pp. 1-38. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app14135454 [Accessed 30 September 2025].

Kaewunruen, S., Rungskunroch, P. and Welsh, J. (2019), "A Digital-Twin Evaluation of Net Zero Energy Building for Existing Buildings", in *Sustainability*, vol. 11, issue 1, article 159, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su11010159 [Accessed 30 September 2025].

Lee, D., Lee, S. H., Masoud, N., Krishnan, M. S. and Li, V. C. (2021), "Integrated digital twin and blockchain framework to support accountable information sharing in construction projects", in *Automation in Construction*, vol. 127, article 103688, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103688 [Accessed 30 September 2025].

Longo, D., Turillazzi, B., Roversi, R., Lilla, S., Nucci, C. A., Piccinini, A. and Costa, A. (2024), "Gemello digitale urbano e modellazione energetica – Esperienze e analisi di casi d'uso | Urban Digital Twin and Energy Modeling – Experiences and case study analyses", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 160-169. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15122024 [Accessed 30 September 2025].

Luiso, P. (2021), *Digital Twin – Parco della Salute, della Ricerca e dell'Innovazione di Torino – Analisi costi della sicurezza in periodo Covid-19 e approccio alla sicurezza in cantiere attraverso il Digital Twin | Digital Twin – Park of Health, Research and Innovation in Turin – Safety cost analysis in the Covid-19 period and approach to safety on site through the Digital Twin*, Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino; Relatori Osello, A. and Manzone, F. [Online] Available at: webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/20803 [Accessed 30 September 2025].

Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2023), *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC_finale_17012020.pdf [Accessed 18 October 2024].

Mousavi, Y., Gharineiat, Z., Karimi, A. A., McDougall, K., Rossi, A. and Gonizzi Barsanti, S. (2024), "Digital Twin Technology in Built Environment – A Review of Applications, Capabilities and Challenges", in *Smart Cities*, vol. 7, issue 5, pp. 2594-2615. [Online] Available at: doi.org/10.3390/smartcities7050101 [Accessed 30 September 2025].

Nava, C. and Melis, A. (2024), "IA generativa e complessità – Verso un nuovo paradigma nel design digitale rigenerativo | Generative IA and complexity – Towards a new paradigm in regenerative digital design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 40-49. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1632024 [Accessed 30 September 2025].

Nguyen, T. D. and Adhikari, S. (2023), "The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction – A Literature Review", in *Sustainability*, vol. 15, issue 13, article 10462, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su151310462 [Accessed 30 September 2025].

Osello, A., Del Giudice, M., Donato, A. J. and Fratto, A. (2024a), "Verso la Neutralità Climatica – Il ruolo chiave del Digital Twin nell'Industria 5.0 | Towards Climate Neutrality – The key role of the Digital Twin in Industry 5.0", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 276-285. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15222024 [Accessed 30 September 2025].

Osello, A., Zucco, M., Iacono, E. and Del Giudice, M. (2024b), "Logiche nascoste della complessità – Interfacce grafiche e algoritmi per il sistema edificio | Hidden logic of complexity – Graphical interfaces and algorithms for the building system", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 202-211. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16172024 [Accessed 30 September 2025].

Peng, Y., Zhang, M., Yu, F., Xu, J. and Gao, S. (2020), "Digital Twin Hospital Buildings – An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration", in *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, article 8846667, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1155/2020/8846667 [Accessed 30 September 2025].

Rafsanjani, H. N. and Nabizadeh, A. H. (2023), "Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through Virtual Design and Construction (VDC) and digital twin", in *Energy and Built Environment*, vol. 4, issue 2, pp. 169-178. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.10.004 [Accessed 30 September 2025].

Sharma, R. and Gupta, H. (2024), "Leveraging cognitive digital twins in Industry 5.0 for achieving sustainable development goal 9 – An exploration of inclusive and sustainable industrialisation strategies", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 448, article 141364, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141364 [Accessed 30 September 2025].

Sposito, C. and Scalisi, F. (2024), "Riflessioni e traiettorie di ricerca interdisciplinari sulla transizione energetica | Reflections and trajectories for interdisciplinary research on the energetic transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 3-17. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1502024 [Accessed 30 September 2025].

Ugliotti, F. M., D'Addetta, C. and Fabbricatore, M. (2024), "Digital Twin and Artificial Intelligence – Matrix Automation for Design, Monitoring, and Management of Spaces", in Giordano, A., Russo, M. and Spallone, R. (eds), *Advances in Representation – New AI- and XR-Driven Transdisciplinarity*, Springer, Cham, Switzerland, pp. 727-743 [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-62963-1_44 [Accessed 30 September 2025].

UN – United Nations (2015a), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: docs.un.org/en/A/RES/70/1 [Accessed 30 September 2025].

UN – United Nations (2015b), *Paris Agreement*. [Online] Available at: unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf [Accessed 30 September 2025].

UNI 10838:1999, *Edilizia – Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia.* [Online] Available at: store.uni.com/uni-10838-1999 [Accessed 30 September 2025].

Wang, B., Zhou, H., Li, X., Yang, G., Zheng, P., Song, C., Yuan, Y., Wuest, T., Yang, H. and Wang, L. (2024), "Human Digital Twin in the context of Industry 5.0", in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 85, article 102626, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102626 [Accessed 30 September 2025].

Wang, T. and Chen, H.-M. (2023), "Integration of building information modeling and project management in construction project life cycle", in *Automation in Construction*, vol. 150, article 104832, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104832 [Accessed 30 September 2025].

Wang, Z. (2020), "Digital Twin Technology", in Bányai, T., Petrilloand, A. and De Felice, F. (eds), *Industry 4.0 – Impact on Intelligent Logistics and Manufacturing*, IntechOpen, Rijeka, pp. 95-114. [Online] Available at: dx.doi.org/10.5772/intechopen.80974 [Accessed 30 September 2025].

Weichbroth, P., Jandy, K. and Zurada, J. (2024), "Toward Sustainable Development – Exploring the Value and Benefits of Digital Twins", in *Telecom*, vol. 5, issue 3, pp. 774-791. [Online] Available at: doi.org/10.3390/telecom5030039 [Accessed 30 September 2025].

World Green Building Council (2024), *Annual Report 2023-2024*. [Online] Available at: worldgbc.org/wp-content/uploads/2025/02/WorldGBC-Annual-Report-2023-2024.pdf?utm_campaign=website&utm_medium=email&utm_source=sendgrid.com [Accessed 14 October 2025].

Xu, H., Kim, J. I. and Chen, J. (2025), "Improved framework for estimating carbon emissions from prefabricated buildings during the construction stage – Life cycle assessment and case study", in *Building and Environment*, vol. 272, article 112599, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112599 [Accessed 30 September 2025].

Yang, Z., Tang, C., Zhang, T., Zhang, Z. and Doan, D. T. (2024), "Digital Twins in Construction – Architecture, Applications, Trends and Challenges", in *Buildings*, vol. 14, issue 9, article 2616, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14092616 [Accessed 30 September 2025].

Zannoni, M., Succini, L., Rosato, L. and Pasini, V. (2024), "Transitional industrial designer – La responsabilità di progettisti e imprese per una transizione sostenibile | Transitional industrial designer – The responsibility of designers and companies for a sustainable transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 332-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15282024 [Accessed 30 September 2025].

Zhang, A., Yang, J. and Wang, F. (2023), "Application and enabling digital twin technologies in the operation and maintenance stage of the AEC industry – A literature review", in *Journal of Building Engineering*, vol. 80, article 107859, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107859 [Accessed 30 September 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 162-177
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1882025

ARTICLE INFO

Received 10 September 2025
Revised 15 October 2025
Accepted 17 October 2025
Published 30 December 2025

RICONNETTERE LE DIMENSIONI DI ACQUA, CITTÀ E COMUNITÀ
Una sperimentazione a Yerevan (Armenia)

RECONNECTING THE DIMENSIONS OF WATER, CITY, AND COMMUNITY
An experiment in Yerevan (Armenia)

Filippo Angelucci, Armen Shatvoryan

ABSTRACT

Due ricerche hanno permesso di riaprire il dibattito sul futuro del Circular Park di Yerevan, previsto dal Piano Tamanyan della capitale armena fin dal 1924. La sperimentazione meta-progettuale ha affrontato due sfide: la prima riguarda il superamento della logica d'intervento per oggetti edilizi o infrastrutturali isolati, ristabilendo connessioni verticali, oblique e orizzontali tra acqua, verde e suolo; la seconda mira a riorientare il Circular Park verso l'idea originaria di bene comune per soddisfare le esigenze di una città in continua evoluzione. Ponendo l'attenzione sugli spazi pubblici e sul loro rapporto con le risorse essenziali per la vita, lo studio individua la risorsa acqua non come materiale del progetto, ma come agente di riconnessione che agisce in simbiosi con suolo, microclima, sottosuolo e edifici, con valore regolativo fra società, città e dinamiche socioeconomiche.

Two research projects have reopened the debate over the future of the Circular Park of Yerevan, a feature already found in the 1924 Tamanyan plan for the Armenian capital. The meta-design experimentation tackles two challenges: the first concerns overcoming the logic of intervening on isolated built-up structures and infrastructure, re-establishing the vertical, oblique and horizontal connections between water, vegetation and soil; the second aims to reorient the Circular Park toward its original concept of common space to satisfy the needs of a city in constant evolution. Focusing on public spaces and their relationship with the essential resources for life, the study identifies the resource water, not as the material of the project, but rather as a reconnective agent that acts symbiotically with the soil, microclimate, underground and buildings, creating regulative value between society, the city and socio-economic dynamics.

KEYWORDS

meta-progetto, progettazione tecnologica e ambientale, strategia idrica integrata, città giardino, parco circolare di Yerevan

meta-design, technological and environmental design, integrated water strategy, garden city, Circular Park of Yerevan

Filippo Angelucci, Architect and PhD in Environmental Design, is a Associate Professor of Technological and Environmental Design of Architecture at the Department of Architecture 'G. d'Annunzio' University of Chieti-Pescara (Italy). He mainly works on research into the meta-design of technological-environmental interface systems for intermediate spaces at the territorial, urban, and building levels. E-mail: filippo.angelucci@unich.it

Armen Shatvoryan, Architect and PhD in Architecture. He is an Associate Professor of the Chair of Architectural Design and Design of Architectural Environments at the National University of Architecture and Construction (Armenia), where he is the Dean of the Faculty of Architecture. He carries out research primarily in the areas of intelligent strategies for energy efficiency, sustainable architecture and inclusive architecture. E-mail: shatvo ryanschool@gmail.com

Il Piano di Alexander Tamanyan per Yerevan (1924) si ispirò ai principi della Garden City di Ebenezer Howard: la prima versione del Piano, pensata per 150.000 abitanti, puntava a soddisfare le esigenze amministrative, commerciali e culturali per rendere la nuova capitale armena sana, confortevole e bella (Tamanyan, 2000). Tuttavia il modello della Garden City non presenta gli spazi verdi come in altre coeve esperienze (Nabila, 2021): Tamanyan, ispirandosi allo schema concentrico di Howard, adotta un impianto ad anello radiale che abbraccia l'intera città per facilitare i trasporti e gli spostamenti dal centro verso tutti i quartieri urbani. Nell'impianto radiale assunse importanza il Circular Park che fondeva in una visione organica suolo, acqua, edifici e caratteri climatici di contesto, come sistema di spazi pubblici in cui si integrano fontane, piscine, corsi d'acqua e parchi giochi per i bambini.

Il Circular Park è ancora oggi un condensatore di attività e funzioni sociali, ricreative ed ecologiche (Russian Federation – Ministry of Finance of the Slovak Republic and UNDP, 2021), importante eredità della cultura delle città giardino, tra i pochi esempi basati sul modello radiale. La crescente attrattività turistica, che dal 1991 caratterizza la capitale armena, rischia però di infrangere gli equilibri fra acqua, verde e contesto urbano verso una prospettiva di trasformazioni a esclusivo uso privato (Harutyunyan, 2023). Il problema emergente riguarda le connessioni fra aspetti architettonici, tecnologici, ambientali, urbanistici e socioeconomici.

Su questo tema due ricerche, finanziate dalla Comunità Europea[1] ed estese anche a realtà non comunitarie, hanno fornito l'occasione per riaprire il dibattito sui possibili futuri del Circular Park. L'attività sperimentale ha permesso di esplorare approcci e strumenti metodologici tecnologico-ambientali con l'obiettivo di ridefinire il valore del Circular Park nella Yerevan contemporanea, puntando a due sfide in cui l'acqua assume un duplice ruolo rispetto agli obiettivi dell'Agenda 2030 (UN, 2015).

In primo luogo, l'acqua è un vettore fondamentale per riconnettere le relazioni interrotte fra spazio pubblico, aree verdi e manufatti abitativi: in questa direzione si punta a ristabilire le relazioni tra acqua, città e comunità per migliorare la raccolta, l'utilizzo e il riuso sostenibile delle risorse idriche (SDG 6) supportando l'accessibilità e inclusività degli spazi pubblici e l'adattamento ai cambiamenti climatici (SDG 11; Capolongo et alii, 2018).

In secondo luogo l'acqua è agente attrattore che può contribuire all'innalzamento della qualità psico-fisica e della disponibilità economica di persone e comunità. In tale ottica le relazioni tra acqua, città e comunità possono incidere sulla promozione di pratiche salutogeniche (Maass, Lillefjell and Arild Espnes, 2017) per la vita in città (SDG 3) e sullo sviluppo di attività creative, culturali-turistiche e ricreative sostenibili per l'ecosistema urbano (SDG 8).

Considerato il potenziale interesse transdisciplinare dell'argomento il contributo affronta in senso olistico il quadro problematico generale e specifico del Circular Park, la tesi del trinomio acqua / città / comunità come generatore del benessere urbano, la sperimentazione metaprogettuale condotta per interfacce regolative e gli elementi di criticità e replicabilità dell'esperienza

Gli obiettivi di maggiore impatto riguardano due ambiti. L'approccio metaprogettuale non si limita alle fasi preparatorie del progetto e la metaprogettazione può assumere senso anche come pratica continuativa di produzione di conoscenze per una progettualità aperta e adattiva, finalizzata alla generazione di condizioni di benessere psico-fisico variabili. Inoltre i riferimenti alla Garden City e agli spazi aperti non sono considerati in termini esclusivamente conservativi o di infrastrutturazione verde-blu; il Circular Park è riattualizzato come sistema strategico con capacità evolutive di regolazione climatica che integra edifici, strade, spazi aperti, pratiche individuali e collettive.

Stato dell'arte: il Circular Park, una lettura diacronica | Lo stato dell'arte sul Circular Park e in generale sulla 'città giardino' presenta un carattere diacronico; si può infatti fare riferimento a come è stato pensato il Circular Park e in che modo si è poi trasformato nel tempo: in questa chiave di lettura è possibile rintracciare elementi che attestano una consolidata relazione fra acqua, spazi pubblici e verdi e collettività. Il Piano Tamanyan costituisce infatti il primo momento in cui la Città di Yerevan si dota di uno strumento che va oltre la logica di pianificazione per zonizzazione presovietica (Piano Musheghyan 1905-1911; Fig. 1a), avviando dal 1924 una strategia di integrazione fra spazi verdi, acqua e aree edificate, sul modello della Garden City. Fino al 1932 è riconoscibile nel Piano Tamanyan la logica di riconnettere giardini e spazi naturali attraverso un grande giardino circolare (Fig. 1b).

Nel secondo dopoguerra, nella parte ovest mai realizzata del Circular Park appare già avviata una edificazione in cui dell'originale giardino circolare restano solo le giaciture geometriche; tuttavia nell'ala est è ancora ben visibile la robusta connessione fra il Fiume Getar, gli specchi d'acqua e gli spazi verdi in almeno tre dei quattro settori (Fig. 1c). Tale assetto compare come indirizzo generale nel Master Plan 2005-2020, anche se poi non del tutto attuato sia per quanto riguarda la continuità dell'elemento acqua all'interno di tutti i settori del Circular Park, sia per l'obiettivo di portare la superficie di verde pro-capite al 17% (Fig. 1d).

Riguardo alla percentuale di spazio verde procapite, il recente Master Plan 2024-2025 approvato dallo Yerevan Council of Elders conferma l'obiettivo di portare il verde dall'8,3% al 10% entro il 2030; lo Yerevan Green City Action Plan (2017-2030), sviluppato con l'EU Covenant of Majors spinge verso una integrazione del sistema del verde con gli elementi acqua, aria, suolo, trasporti, registrando la necessità di muoversi verso l'obiettivo prefissato dalla Organizzazione Mondiale della Sanità del 50% di spazio verde pro-capite. Su un diverso piano di lettura tra passato e presente gli elementi di continuità che caratterizzano il Circular Park costituiscono importanti specificità anche rispetto ad altre esperienze riferibili al modello della Città Giardino di Howard: sono infatti pochi e datati i casi studio riconducibili allo schema concentrico / circolare.

In un primo gruppo il modello concentrico è adottato per proiettare visioni futuristiche di città giardino a bassa densità o per supportare la massima concentrazione edilizia, funzionale e impiantistica di città o distretti di nuova fondazione, tra cui New Delhi Connaught Place (1933) di R. Tor Russell, Circular Economy Park Middle East (2021) di McGregor Coxall o il Masterplan dimostrativo Jardin Siti di Houseal Lavigne (2023); in questo raggruppamento il tema della Garden City sembra rivivere come matrice di aree verdi in cui immergere il costruito della città. In un secondo gruppo si collocano esempi quali Nærum Oval Allotment Gardens (1948) di C. T. Sørensen e Brøndby Garden City (1964) di Erik Mygind: lo schema circolare è in prevalenza usato come elemento geometrico per la formalizzazione degli spazi verdi privati di unità abitative disperse in una matrice insediativa rurale.

Per quanto riguarda le prospettive di sviluppo e riattualizzazione del modello Garden City, non solo a impianto radiale, si tende invece a integrare in modo olistico acqua, verde, comunità, infrastrutture e attività socioeconomico-culturali per affrontare le nuove sfide ed emergenze delle transizioni climatiche, ecologiche e sanitarie (Vernet and Coste, 2017; Swensen and Krokann Berg, 2020; Nikologianni and Larkham, 2022; Khavarian-Garmsir et alii, 2023; Coskun, 2024). Rispetto a quest'ultima posizione scientifica è importante segnalare due esperienze recenti di gruppi di ricerca internazionali riguardanti il Circular Park.

Il progetto Memory of the River – Getar, del Cultural and Social Narratives Laboratory NGO, rientra tra le iniziative della Civil Society Support for Ensuring Impact on Reforms (finanziate da Eurasia Partnership Foundation e Governo svedese). Il progetto assume rilevanza per l'approccio transdisciplinare che è fondamentale sia per l'approccio metaprogettuale sia per l'interpretazione dell'elemento acqua del Fiume Getar, riportato alla luce, come parte attiva di una più ampia visione che interconnette relazioni fra progetto urbano, aspetti antropologici, culturali e ambientali (Amiryan and Galstyan, 2023).

Lo Yerevan Green City Action Plan (2017-2030) ha costituito un secondo caso studio rilevante (sviluppato e finanziato da Ernst & Young, European Bank for Reconstruction and Development, Czech Government's Official Development Assistance, Technical Cooperation Fund of the City of Yerevan) che, oltre che ricomporre in una visione unitaria le componenti dei precedenti Piani che coinvolgono il Circular Park, propone un processo di interventi di medio e lungo termine con cui integrare su più livelli acqua, suolo, ecosistemi ed energie della città (Ernst and Young, 2017).

Obiettivi: dimensioni riconnettive del trinomio acqua / città / comunità | Negli ultimi anni il carattere originario del Circular Park come bene comune al servizio della collettività ha rischiato di essere cancellato. Come in altre realtà urbane rientrate nei circuiti del turismo di massa, gli spazi verdi sono stati sacrificati per attività sportive, ricreative e di ristorazione, attraverso concessioni a operatori privati – favorite dalla scarsa disponibilità di risorse economiche pubbliche – che attraverso opere edilizie (anche piccole o provvisorie) hanno avviato azioni irreversibili di colonizzazione degli spazi aperti di pertinenza (De Cauter, 2004; Harutyunyan, 2021, 2023). In alcuni casi, per decongestionare il traffico carrabile e fare spazio a edifici e relativi parcheggi privati, è stato persino canalizzato in sotterraneo il corso del Fiume Getar (Hovhannisyan, 2017; Amiryan and Galstyan, 2023; Fig. 2).

Questo processo si rileva oggi con pesi e consistenze diversificate in quattro settori (Fig. 3) che evidenziano criticità sul rapporto che rischia di infrangersi tra l'agente acqua, le componenti tecnologico-ambientali della città (suoli naturali e modificati, edifici, infrastrutture, ecc.) e le comunità di abitanti e utenti che vivono il Circular Park. Si delinea-



Fig. 1 | Urban design plans: a) Musheghyan Plan 1905-1911; b) Tamanyan Plan 1932; c) progress on the Tamanyan Plan as of 1969; d) Master Plan of Yerevan 2005-2020 (source: Wikimedia Commons).

Next page

Fig. 2 | Examples of typical situations of the Circular Park: a) Poplavok Park; b) National Center for Chamber Music; c. Khanjyan Street; d. Skating Park. Examples of critical situations: e) Unused reservoir in Poplavok Park; f) Permanently fenced area for recreational activities; g) Chess House with its parking lot and Getar River canalisation; h) Parking lot on the Getar River (credits: F. Angelucci, 2024/25).

Fig. 3 | The four sectors of the Circular Park (source: Google Earth Airbus, adapted by F. Angelucci and A. Shatvoryan).

no quindi necessità e modalità di intervento per ripristinare, rigenerare e migliorare gli assetti del Circular Park andando oltre una riduttiva accezione estetico-figurativa o conservativa.

Nell'idea di Tamanyan infatti il Circular Park si snoda come una 'promenade architecturale' all'aperto tra le attrezzature collettive: monumenti, fontane, piscine, piazze, scuole e sedi universitarie ed edifici di pubblico interesse. L'acqua è considerata un elemento fisico-chimico attrattore che, insieme agli spazi verdi, si muove in anticipo rispetto ai paradigmi della sostenibilità urbana, potendo migliorare la qualità abitativa della città per diverse pratiche collettive, target ed età di utenza. Inoltre, considerando l'articolazione del Piano Tamanyan fondato sul tema delle 'promenade' urbane (Kertmenjian, 2019), il Circular Park costituisce, anche in questo caso, un'esperienza anticipatrice delle finalità che oggi attribuiamo alle infrastrutture blu, verdi e grigie. L'acqua diventa vettore centrale per la sicurezza, la resilienza e l'approvvigionamento idrico: essa costituisce risorsa vitale ed essenziale per la vitalità dell'ecosistema e si inserisce nei flussi metabolici della città (Stockholm Resilience Alliance, 2010), dove può assumere valore strategico nel mantenimento delle condizioni di sostenibilità di Yerevan.

È in questa direzione che le relazioni fra acqua, verde, spazio pubblico e collettività emergono come caratteri importanti del Circular Park che meritano di essere posti all'attenzione nelle future traiettorie di sviluppo della città. Il contatto diretto fra acqua fluviale / lacuale e spazio pubblico si coglie ancora oggi in tutta Yerevan (Fig. 4): l'acqua si integra con l'architettura e le infrastrutture della città a vari livelli – dagli elementi puntuali come pulpulak e fontane a quelli ad estensione areale – e funge da elemento attrattore in diverse polarità strategiche della capitale armena (Fig. 5). Non come ultimo aspetto, la presenza dell'acqua continua a costituire un importante catalizzatore della vita collettiva di Yerevan nelle varie stagioni e condizioni climatiche, come agente di microregolazione delle condizioni di comfort urbano (Fig. 6).

Alla luce di ciò gli obiettivi della sperimentazione sono stati orientati verso l'esplorazione di due principali dimensioni riconnettive del trinomio acqua / città / comunità, tendendo verso interventi che non neghino le permanenze della matrice originaria del Piano, conservate attraverso le sue evoluzioni dal 1924 al 1932. Il primo assunto riguarda la riattualizzazione degli obiettivi del Piano Tamanyan per soddisfare esigenze attuali e future di una città in continua evoluzione: il trinomio acqua / città / comunità dovrà assumere configurazioni spaziali protese al miglioramento qualitativo del Circular Park in termini di recupero e rigenerazione delle condizioni di benessere psico-fisico delle persone. Il secondo assunto riguarda l'idea di Tamanyan del Circular Park come sistema regolatore climatico della città: l'intero sistema dovrebbe ri-orientarsi verso la logica per promenade, mantenendo l'ampiezza delle sezioni entro dimensioni appropriate per bilanciare la compresenza di edifici, strade carrabili, percorsi pedonali e spazi aperti, preservando il principio della percentuale minima di almeno 9-10 mq per abitante (Tamanyan, 1960).

Metodologia: agire per interfacce regolative spazio-ambientali | La questione emergente dalla lettura diacronica del Circular Park e dall'ipotesi di far leva sulle capacità riconnettive del trinomio acqua / città / comunità riguarda il ruolo della pratica progettuale nelle dinamiche di evoluzione dell'habitat urbano. Si è partiti dall'assunto che, prima di pensare in termini di Piano, programmi e progetti, è necessario sviluppare traiettorie metaprogettuali per individuare scenari alternativi, proiettare visioni multiple ed elaborare concetti informazionali (Gausa,



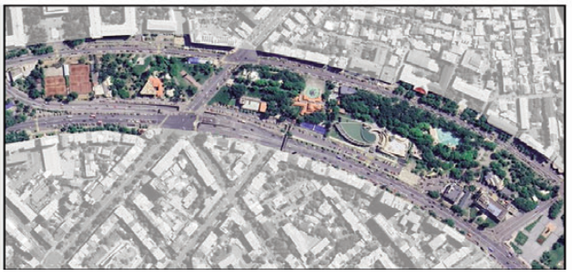
Sector A
Between Marshal Baghramyan Ave and Poplavok Park.
Parts of the original garden have been enclosed within residential blocks and are now dedicated to mixed uses (greenery and private parking).





Sector B
Between Poplavok Park and the Khanjyan Street junction. Seasonal areas are fenced off or permanently colonized, taking away public space from the CP and its collective-use buildings.

Sector C
Between Khanjyan Street junction and Vardanans Street.
Densification of permanently privatized spaces for recreational/restaurant uses, Getar River diverted underground.





Sector D
Between Vardanans Street and Tigran Mets Ave.
Predominance of green and public spaces, although Getar is partially buried and some spaces are privatized or made seasonally inaccessible.

2024) per comprendere le 'ragioni del progetto': con il metaprogetto si può superare la logica d'azione per oggetti, edifici e infrastrutture tematiche. La risorsa acqua non è solo materiale caratterizzante l'infrastrutturazione verde-blu, è bene comune che agisce per la sostenibilità diffusa e multi-obiettivo dell'habitat urbano, in simbiosi con altri capitali naturali, umani e culturali quali suolo, sottosuolo, verde, fattori contestuali, edifici e Patrimoni intangibili (D'Ambrosio, Di Martino and Rigillo, 2022).

Nella sperimentazione condotta a Yerevan[2] sono stati esplorati scenari, visioni e concetti d'intervento ripartendo dalle sezioni delle promenade del Piano di Tamanyan e indagando i molteplici livelli di connessione relazionali, performativi o di processo che possono essere recuperati o instaurati agendo sul trinomio acqua / città / comunità. Alcune sezioni delle promenade prese a riferimento caratterizzano ancora oggi l'area del Kentron di Yerevan, mentre altre sono specifiche delle aree con maggiori criticità del Circular Park (Fig. 7).

L'intera esperienza metaprogettuale ha preso in considerazione componenti sia tecnologiche che ambientali dei vari settori del Circular Park, entrando nelle loro diverse e mutevoli interazioni simbiotiche, cronologiche e spaziali riconoscibili in sezioni d'interfaccia spazio-ambientali. Questa modalità di approccio ha permesso di osservare dall'interno e dall'esterno il Circular Park come un'interfaccia regolativa socio-bio-tecno-ecosistemica; scegliendo di lavorare per progressivi approfondimenti su interfacce regolative spazio-ambientali, l'approccio ha assunto un andamento euristico.

In ogni fase metaprogettuale per ciascun settore o sezione sono stati utilizzati dati, parametri ed elaborati eterogenei, seguendo logiche sia qualitative, basate sull'evidenza, sia quantitative, basate sulle prestazioni. Il processo si è inoltre caratterizzato per la sua impostazione inferenziale, soffermandosi su come porre domande (chi, cosa, dove, come, quando, perché, ecc.) per definire le ragioni ideative e decisionali delle possibili azioni trasformative (Gehl and Svarre, 2013), impiegando allo stesso tempo attività deduttive / tesi, abduttive / ipotesi e induttive / sintesi (Fig. 8).

La fase di scenarizzazione ha riguardato l'intero Circular Park come ambito di interfaccia spazio-ambientale che attraversa la totalità dell'area centrale di Yerevan. La lettura critica degli aspetti contestuali (fattori ambientali, sistema esigenziale, Piani, progetti, archivi) e la parallela formulazione di ipotesi di evoluzione del Circular Park hanno permesso di proiettare non uno, ma più scenari variabili, anche combinabili tra loro, per riannodare o reinventare relazioni e connessioni tra usi del bene acqua, funzioni urbane e comportamenti degli utenti finali.

Con la fase di visioning si sono sperimentate le opportunità di sviluppo di varianti configurative condivise e alternative, attraverso attività di coinvolgimento laboratoriali; le indagini hanno interessato specifiche unità / sezioni di interfaccia spazio-ambientali. Sono state esplorate soprattutto le azioni, materiali e immateriali, con le quali recuperare, rafforzare o inserire l'elemento acqua dentro una visione organica del Circular Park come sistema di spazi e luoghi per il benessere, la socialità e la sicurezza urbana.

Nella fase di concettualizzazione le attività si sono concentrate su specifiche sotto-unità di interfaccia spazio-ambientali attraverso suggestioni finalizzate ad anticipare le modalità con cui l'agente acqua può integrarsi in modo coerente e responsivo con gli obiettivi e le ragioni prospettate nelle fasi di scenarizzazione e visioning: non si è definito un concept, bensì un processo integrato per trasmettere dati, informazioni e conoscenze utili per ragionare, decidere e intervenire sul Circular Park, anche con tempi e modalità differenziate.

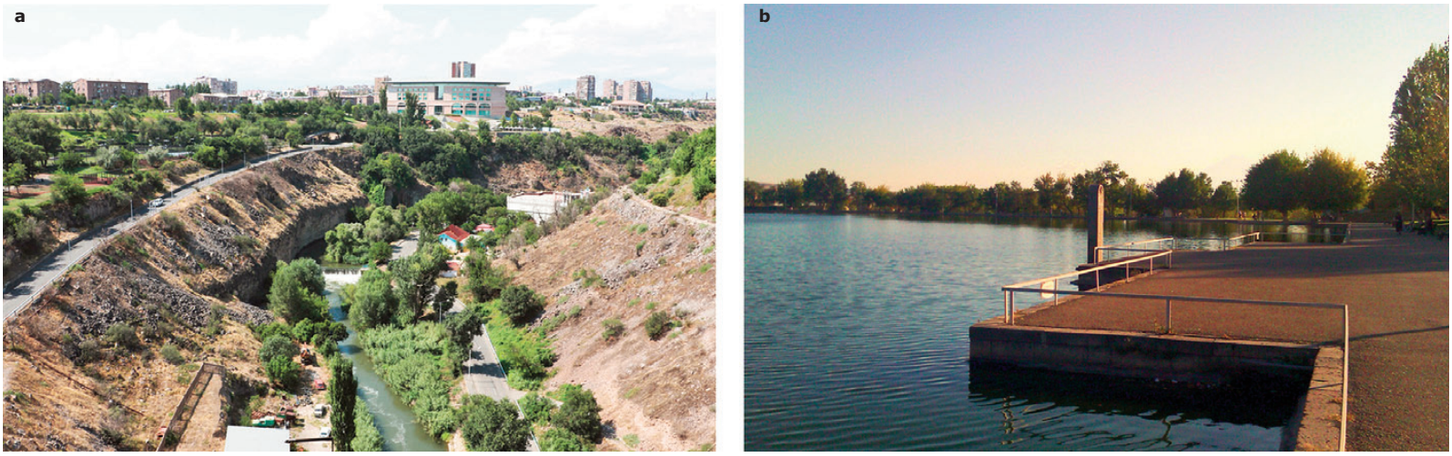


Fig. 4 | The parks: a) Tamanyan Park along the Hrazdan River; b) Lyon Park (source: Wikimedia Commons).



Fig. 5 | The squares and the parks: a) Pulpulak near Republic Square; b) Charles Aznavour Square; c) Zoravar Andranik Metro Station; d) Children Park (credits: Wikimedia Commons; F. Angelucci, 2025).

Risultati: modelli di riconnessione | L'approccio adottato ha permesso di rileggere la pratica metaprogettuale evidenziando la centralità delle componenti conoscitive e informazionali che possono favorire una progettualità di mediazione (Easterling, 2021) in casi di studio complessi come il Circular Park di Yerevan. I risultati dello studio possono essere sintetizzati attraverso tre principali modelli di sezione della promenade di ri-connessione che restituiscono il campo delle azioni entro i quali il trinomio acqua / città / comunità può esprimere le sue potenzialità evolutive preservando al tempo stesso i caratteri originari del Piano Tamanyan e rispetto alle esigenze della Yerevan contemporanea (UN, 2018; Fig. 9).

Il modello di riconnessione verticale 'acqua / verde / suolo' propone di intervenire sulle connessioni necessarie a restituire un Circular Park pubblico per attività sociali, culturali, ricreative da svolgersi all'aria aperta o indoor. Il modello prevede di ristabilire connessioni tra l'agente meteorologico acqua, le aree vegetate (da depavimentare, ri-permeabilizzare, decolonizzare dalle attrezzature non rimovibili, reintegrare con nuove piantumazioni) e il suolo con le sue stratificazioni artificiali (padiglioni, edifici, infrastrutture, percorsi) da immergere nel verde rendendolo accessibile anche mediante deviazioni della carrabilità.

Il modello di riconnessione obliqua, 'edifici / fontane / utenti suggerisce interventi per prevenire sia potenziali diminuzioni della disponibilità di risorse idriche sia eventuali effetti indotti dal cambiamento climatico o da eventi meteorologici estremi. Introducendo soluzioni tecnologiche, oggi non presenti, per il recupero, lo stoccaggio e il riuso delle acque meteoriche, si potrebbero integrare in una visione incentrata sull'acqua involucri edilizi e sottosuolo, nonché il sistema delle fontane (come attrattori per attività collettive pluristagionali), bacini di accumulo e altre risorse di regolazione / mitigazione dell'isola di calore.

Il modello di riconnessione orizzontale 'città / fiume / parco' ipotizza interventi più profondi di riattivazione del Fiume Getar come meso-ecosistema blu-verde che può coinvolgere almeno tre comparti (74% dei circa 275.000 mq) del Circular Park. Il Fiume torna a essere sistema strutturante di regolazione microclimatica e di mediazione tra aree verdi, architetture e attività collettive, inserito nel sistema più ampio del Parco, restituendo alla città superfici oggi dedicate al parcheggio carrabile, da trasformare in nuovi suoli per impianto vegetativo.

I modelli hanno permesso di prevedere differenti gradi di riconnettività del Circular Park, prendendo in considerazione anche programmi e progetti di livello nazionale e internazionale. Nella fase di scenarizzazione i gradi di riconnettività si ipotizzano rispetto ai quadri problematici contestuali e possono modificarsi in conseguenza delle volontà politiche, delle iniziative di pianificazione e delle condizioni economiche di intervento che potrebbero verificarsi nel breve, medio e lungo periodo (Fig. 10). Nelle attività di visioning le capacità riconnettive sono state esplorate rispetto alle condizioni di processo, performative e relazionali, attraverso un set di dodici descrittori (macro-requisiti di condizione) sintetici che ha permesso una prima valutazione quali-quantitativa dei miglioramenti apportabili con l'implementazione degli interventi per raggiungere gli SDG entro il 2030 (Fig. 11).

Gli stessi modelli di sezione della promenade sono stati inoltre utili per anticipare i caratteri spaziali, configurativi e funzionali di alcune significative sotto-unità di intervento; con questa ulteriore esplorazione i gradi di riconnettività del sistema sono stati espressi attraverso suggestioni multiple sulle soglie evolutive del Circular Park, ipotizzando una diversificazione biologica ed esperienziale mediante l'introduzione di situazioni spaziali di 'punteggiatura' (Sennett, 2019) con sequenze, passaggi, ripari, isole, oasi e frontiere di interfaccia (Fig.12).

Pur considerando le differenze riscontrabili nei vari settori del caso di studio, dalla sperimentazione si evidenziano alcune tematiche chiave ineludibili per raggiungere gli SDG dell'Agenda 2030 (Republic of Armenia, 2020):
– si rileva la necessità di ridurre la percentuale delle superfici impermeabilizzate a seguito delle attività di privatizzazione (da sostituire con pavimentazioni drenanti e attrezzature rimovibili) e di recuperare superfici permeabili (Ernst and Young, 2017) per riconnettere i cicli delle acque meteoriche con i processi di gestione di aree verdi e attrezzature collettive, riducendo i consumi di risorse idriche e effetti isole di calore (Vardanyan et alii, 2024);
– è importante conservare le differenze dei settori come valori che, nella continuità della struttura unitaria del Circular Park, contribuiscono ad arricchire le opportunità esperienziali per gli utenti, agendo per superare le attuali barriere spaziali e tecnologiche che ne inibiscono le condizioni di accessibilità inclusiva e combinando la presenza multiforme



Fig. 6 | Water as a catalyser of the collective life of Yerevan: a) a fountain within a residential courtyard of Kentron; b) a fountain in the Park of the 2,800th Anniversary; c-d-e) Swan Lake in the winter, during the spring Vardavar and in the summer (credits: F. Angelucci, 2024/25; Wikimedia Commons).

dell'acqua con la continuità dei percorsi pedonali e ciclabili;
– diventa prioritaria la riattivazione ove possibile del corso del Fiume Getar, ristabilendo una condizione di riverfront urbano dedicato alla regolazione microclimatica degli spazi aperti per usi collettivi e privati (Quennerstedt, Backman and Mikaels, 2025), al rafforzamento delle capacità di drenaggio delle acque meteoriche e alla costituzione di una green buffer-zone d'interfaccia tra parco e architetture pubbliche inserite nel Circular Park;
– risulta centrale ristabilire l'idea originaria di Tamanyan del Circular Park come sistema di giardini e architetture per uso collettivo (Heiko and Fehlings, 2023), cogliendo tutte le opportunità per mantenere le ampiezze delle sezioni delle promenade fra 20 e 42 metri e per aumentare le aree vegetate (Green City Network, 2018) cercando di avvicinarsi al 10-15% (almeno rispetto alla superficie urbana del centro di Yerevan) di spazi aperti verdi, senza edifici.

Discussione sui risultati | L'applicazione dei tre modelli è stata centrale non solo per esplorare le possibilità di implementazione della già citata strategia della sostenibilità forte auspicata dalla Stockholm Resilience Alliance (2010), ma soprattutto per ipotizzare diverse e alternative modalità di riorganizzazione del Circular Park seguendo i suggerimenti dell'Organizzazione Mondiale della Sanità sulle capacità salutogeniche delle risorse verdi e blu nello spazio antropizzato (WHO, 2021; Ak and Günes Gölbey, 2021).

Il lavoro per sezioni delle promenade può infatti costituire una valida opportunità per tradurre, in termini metaprogettuali, i cosiddetti fattori contestuali naturali e/o artificiali; tali fattori, in qualsiasi habitat umano, se visti nella loro reciproca interattività sono individuati dall'Organizzazione Mondiale della Sanità come variabili in grado di agire positivamente in senso abilitante (emancipazione e partecipazione) contribuendo a migliorare le condizioni di benessere psico-fisico delle persone; nel caso contrario gli stessi fattori determinano condizioni di esclusione, malessere, deprivazione.

La capacità abilitante, salutogenica e di supporto agli SDG 2030 del Circular Park emerge nella sua multidimensionalità dinamica, nel senso biologico, cronologico e spaziale (Mussinelli, Tartaglia and Castaldo, 2020; Roe and McCay, 2021) per varie ragioni. Si propina un progetto-visione dell'acqua che agisce per sezioni ampie e unitarie di interfaccia spazio-ambientali dove la risorsa acqua diventa agente principale di connessione fra eventi meteorologici (anche estremi), bisogni idrologici del Patrimonio verde del Circular Park (esistente e futuro) e degli abitanti e pratiche di utilizzo in cui l'acqua è elemento caratterizzante legato al paesaggio e al comfort urbano (pulpulak) o a eventi collettivi armeni (vardavar; Nahapetyan and Kirakosyan, 2025).

Nella sua potenziale replicabilità il processo metaprogettuale esperito permette diversi gradi di contestualizzazione al fine di evitare rischiose derive di standardizzazione e omologazioni di analisi e risultati. Sotto questo aspetto l'esperienza condotta a Yerevan delinea interessanti elementi metodologici trasferibili nel più generale ambito della progettualità complessa trans/inter-disciplinare perché può:
– favorire un approccio al progetto per criticità e contestualizzazioni del presente, proiettandole verso una cultura progettuale polidimensionale dei futuri che presentano capacità di riproducibilità e rigenerazione di suolo, acqua, aria e biocenosi;
– abilitare condizioni operative previsionali e decisionali per orientare le scelte progettuali incorporando fin dalle prime fasi i determinanti del benessere psicofisico delle persone, le possibilità di diversi gradi di partecipazione degli attori e la condivisione di obiettivi di sostenibilità integrati;
– supportare lo sviluppo delle attività di concettualizzazione non come semplice astrazione formale pre-progettuale, ma come produzione di conoscenze e informazioni essenziali per ripristinare relatività e connessioni tra dati, fattori contestuali, spazio fisico artificiale e beni comuni della città.

Avanzamento rispetto agli SDG dell'Agenda 2030 | L'esperienza condotta sul Circular Park di Yerevan può contribuire anche a rafforzare in modo integrato il processo di implementazione degli SDG dell'Agenda 2030. Adottando il modello della Stockholm Resilience Alliance che posiziona l'acqua tra gli elementi prioritari per il raggiungimento degli altri SDG, si possono determinare interessanti sinergie tra i vari obiettivi, così sintetizzabili:
– Filiera 1) in cui l'idea del Circular Park, ripensato secondo i tre modelli di riconnessione tra acqua, città e comunità, si pone come un'interfaccia in cui la qualità delle risorse idriche (SDG 6 e 14) contribuisce a riconnettere i processi ecosistemici naturali e umani nella quotidianità della vita urbana; si può attivare una filiera che irrobustisce e ren-

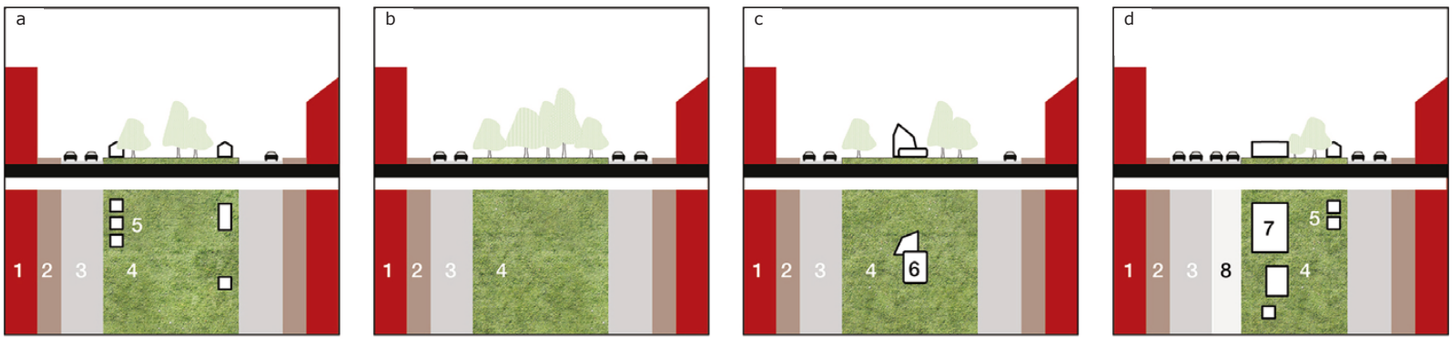


Fig. 7 | Typical cross sections of the promenade: a) equipped park; b) as a green belt; c) park for monumental public architecture; d) Circular Park transformed for private automobile use (credit: F. Angelucci and A. Shatvoryan, 2025).

de più reattiva, adattiva e resiliente i sistemi naturali e costruiti (SDG 11 e 13) e rivitalizza le componenti della sfera bio-fisica e produttiva (SDG 12 e 15; Fig. 13);
– Filiera 2) in cui la pratica metaprogettuale partecipativa su un sistema consolidato come il Circular Park (SDG 17) può supportare la diffusione della co-progettazione dei Beni comuni della città; una ulteriore filiera che parte dalla rigenerazione del Circular Park come sistema regolativo (SDG 6, 13, 14 e 15) può permettere forme responsabili di sviluppo economico (SDG 8), condizioni salutogeniche per la collettività (SDG 3), opportunità di rafforzamento culturale e appartenenza inclusiva (SDG 4 e 10; Fig. 14);

Limiti, criticità e replicabilità | Non mancano comunque alcune barriere economico-culturali che costituiscono fondamentali limiti per una completa implementazione del processo metaprogettuale sperimentato. Per primo è necessario considerare che, nonostante il Circular Park sia considerato un'importante traccia della storia urbana tuttora centrale per la vita sociale di Yerevan, il processo di privatizzazione prosegue quasi incontrastato: attività commerciali, di ristorazione e ricreative aumentano nella sottrazione di suolo pubblico o conservano il loro carattere stabile di colonizzazione dello spazio aperto anche in assenza di attività (esempio dei mini-luna park stagionali) frammentando la continuità ecosistemica.

Come secondo aspetto si rileva che le condizioni climatiche continentali e secche di Yerevan richiedono per un'intensa azione di rinverdimento consistenti quantità di acqua per irrigazione e alimentazione di piscine e fontane. Sebbene le risorse idriche oggi siano sufficienti, gli effetti del cambiamento climatico potrebbero porre problematiche nuove che richiederebbero, prima ancora di agire sul verde consolidato, interventi di limitazione dell'uso dell'acqua, nonché di selezione di specie vegetali resilienti e mix di terreni e pavimentazioni adatte ai nuovi assetti climatici (Vardanyan et alii, 2024).

Nonostante queste criticità la sperimentazione ha permesso di evidenziare la necessità di traslare l'esperienza metaprogettuale comunque in una dimensione partecipativa, corale e di co-progettazione (Ratti, 2014) senza le quali la ricchezza delle suggestioni e dei contenuti informazionali risulterebbe gravosamente impoverita, riproponendo i tradizionali approcci dall'alto ad effetto silos. Interessanti elementi emergenti si rilevano inoltre nell'articolazione metodologica dell'approccio sperimentato metaprogettuale che, nel suo iter flessibile e reticolare, è oggetto di approfondimenti in corso attraverso gli strumenti di AI (con potenziali applicazioni nella governance dei flussi inferenziali / conoscitivi di tipo booleiano o bayesiano).

L'ipotesi di agire in senso metaprogettuale e partecipativo sul Circular Park per un suo riorientamento come ecosistema urbano dinamico, presenta elementi di trasferibilità in altri contesti geografici e culturali, anche in assenza di aree verdi così ampie ed evocative come nel caso studio di Yerevan, perché:
– l'acqua, anche nelle sue forme di utilizzo e presenze ridotte in città, costituisce un importante elemento catalizzatore della vita comunitaria e moderatore (usato anche spontaneamente) degli effetti climatici;
– la riduzione degli spazi verdi è accelerata dai processi di privatizzazione in tutte le città che vivono la fase di estrema turistificazione e gentrificazione per evoluzione / espansione dei mercati immobiliari globalizzati;
– la domanda di integrazione di strategie di co-progettazione per rendere le città più adattive e resilienti è in aumento in tutte le dimensioni insediative urbane piccole, grandi e metropolitane;
– la partecipazione attiva ai processi decisionali e progettuali di diversi attori, esperti e non esperti, assume sempre più centralità per la produzione di valori condivisi con cui affrontare le nuove sfide della sostenibilità.

Tra le linee di sviluppo future si individuano due possibili traiettorie. La sperimentazione del processo andrebbe testata anche in casi di studio irrisolti, dove la disponibilità di risorse naturali e edilizie si confronta con condizioni di degrado e abbandono generate dai processi de-funzionalizzazione delle città. Inoltre il set dei dodici descrittori sintetici, rispetto ai quali sono state ora misurate solo le percentuali di incremento di superfici (verdi, blu, grigie, ecc.), dovrà essere integrato con indicatori sintetici che permettano una valutazione condivisibile fra figure progettuali esperte e non esperte.

Conclusioni | Lo studio condotto a Yerevan ha evidenziato la possibilità di innestare nelle dinamiche di sviluppo e di futura pianificazione della città configurazioni appropriate per riattribuire al Circular Park capacità di agire come sistema regolativo tra tessuto urbanizzato, natura e attività sociali, facendo leva sulla centralità dell'elemento acqua. Il 'sistema parco' può mantenere la propria funzione originaria di corridoio intermedio di connessione tra spazi verdi, attrezzature e edifici e al contempo può collocarsi come 'sistema in-between' tra il tessuto intensamente edificato, l'infrastrutturazione per la carrabilità particolarmente invasiva e il corridoio ecotopo di reinserimento del Getar.

Partendo dall'acqua non solo come elemento fisico-chimico di consumo, ma come agente con valore regolativo-connettivo fra società, città e dinamiche di sviluppo socioeconomico, la sperimentazione è stata fondamentale per reinquadrare il Circular Park entro una dimensione riconnettiva che va oltre la semplice ri-progettazione degli spazi aperti e verdi. Si delinea infatti la possibilità di intervenire per contribuire ad affrontare le problematicità legate alla sostenibilità della città, agli spazi pubblici e al loro rapporto con il Patrimonio edilizio e le risorse naturali a varie scale, tra cui l'uso intensivo dei suoli, il rischio delle risorse idriche per effetto dei cambiamenti climatici e le dinamiche di turistificazione di massa.

Il Circular Park potrebbe tornare così ad assumere centralità per almeno tre ragioni: 1) diventa sistema infrastrutturale ecologico strategico per reintegrare il Patrimonio verde esistente, ma anche per favorire la rigenerazione delle relazioni tra vita quotidiana e natura; 2) assume una nuova identità multipla per produrre, utilizzare, trasformare e gestire economicamente acqua e spazi verdi urbani e generare migliori condizioni di vivibilità per individui e comunità; 3) ricostruisce connessioni plurime per il mantenimento e l'evoluzione della ciclicità, delle relazioni, delle dipendenze, dei circuiti e della sussidiarietà tra componenti naturali e artificiali della città.

Gli avanzamenti disciplinari nel campo della cultura progettuale emersi attraverso questa esperienza riguardano diversi aspetti teorici, metodologici e operativi; uno di essi concerne la problematizzazione delle criticità connesse al degrado del Patrimonio naturale in habitat urbani che ormai sono in con-

tinuo cambiamento: gli interventi mirati ad aumentare la capacità di rigenerazione di suoli, acqua, aria, biocenosi non possono essere considerati come semplici azioni di naturalizzazione, perché necessitano di essere contestualizzati rispetto a esigenze, attori e pratiche che devono poter co-evolvere con elementi e processi naturali.

Un secondo aspetto coinvolge il riorientamento dei metodi di produzione del progetto di aree complesse come il Circular Park: le azioni previsionali multiple diventano fondamentali per orientare in senso partecipativo e condiviso le scelte progettuali e quindi indirizzare e determinare condizioni ad assetto variabile di benessere psicofisico delle persone.

Terzo, ma non meno importante aspetto, le azioni metaprogettuali non si fermano alla generazione di concetti che prefigurano le scelte progettuali: con il metaprogetto ci si colloca in una condizione di progetto continua e informazionale che indaga e produce conoscenze volta per volta appropriate per modificare il progetto stesso con il mutare delle condizioni di contesto.

In generale l'esperienza sul Circular Park si apre anche a successive applicazioni in ambito urbano laddove si possono evidenziare interazioni forti tra acqua, verde, suolo, Patrimonio costruito e collettività (Ferracuti, 1994). L'acqua svolge infatti un ruolo fondamentale come catalizzatore civico e sociale, ma allo stesso tempo ricopre una funzione essenziale ambientale e climatica e, su questo duplice carattere, può entrare a far parte di un più generale progetto di cura e manutenzione che coinvolge le dinamiche culturali, di aggregazione sociale, di benessere psicologico della vita comunitaria della città.

A integrazione di questo ampliamento della natura dell'acqua, da elemento fisico-chimico a elemento dalle molteplici capacità di mediazione fra natura e città, si colloca anche il tema del Patrimonio vegetale urbano: le azioni di inverdimento urbano assumono una connotazione tecnologico-ambientale e nei processi rigenerativi degli spazi verdi il paesaggio non può essere più statico, non è più semplice giardino e neanche parco: gli spazi verdi dovranno essere pensati per ripristinare e migliorare le funzionalità ecologiche, i valori estetici e le condizioni di benessere fisico delle comunità biotiche presenti nel tessuto urbano.

Le principali sfide portate all'attenzione attraverso questa esperienza riguardano la capacità di non limitarsi a proposte autoriali e unidirezionali, siano esse pubbliche o private, considerando invece più iniziative, istanze e ipotesi di riconnessione aperte. Portare il ragionamento sul valore delle connessioni significa lavorare per modelli in divenire e non per progetti chiusi; comporta considerare strategie di recupero e innovazione del sistema tecnologico ambientale, bilanciando esigenze pubbliche e private; vuol dire rintracciare le motivazioni delle azioni conservative o trasformative, concentrandosi non solo sulle informazioni tecniche del 'cosa fare', ma anche sulle conoscenze tecnologico-ambientali che possono orientare le modalità del 'perché, come, quando e dove fare'.

Alexander Tamanyan's 1924 plan for Yerevan was inspired by Ebenezer Howard's principles for a Garden City. The first version of the Plan contemplated a city of 150,000 inhabitants and aimed to satisfy their administrative, commercial and cultural needs as it made the new Armenian capital healthy, comfortable and beautiful (Tamanyan, 2000). However, this garden city did not present green spaces as in other experiences of that time (Nabila, 2021). Tamanyan took his inspiration from Howard's concentric schemes. He adopted a plan of radial rings that encircled the entire city facilitating transportation and movement from the centre toward all of its urban areas. The Circular Park was important in the radial plan, which was founded on an organic vision of soil, water, buildings, and the context's climate, as a system of public spaces with fountains, pools, streams, and playgrounds for children.

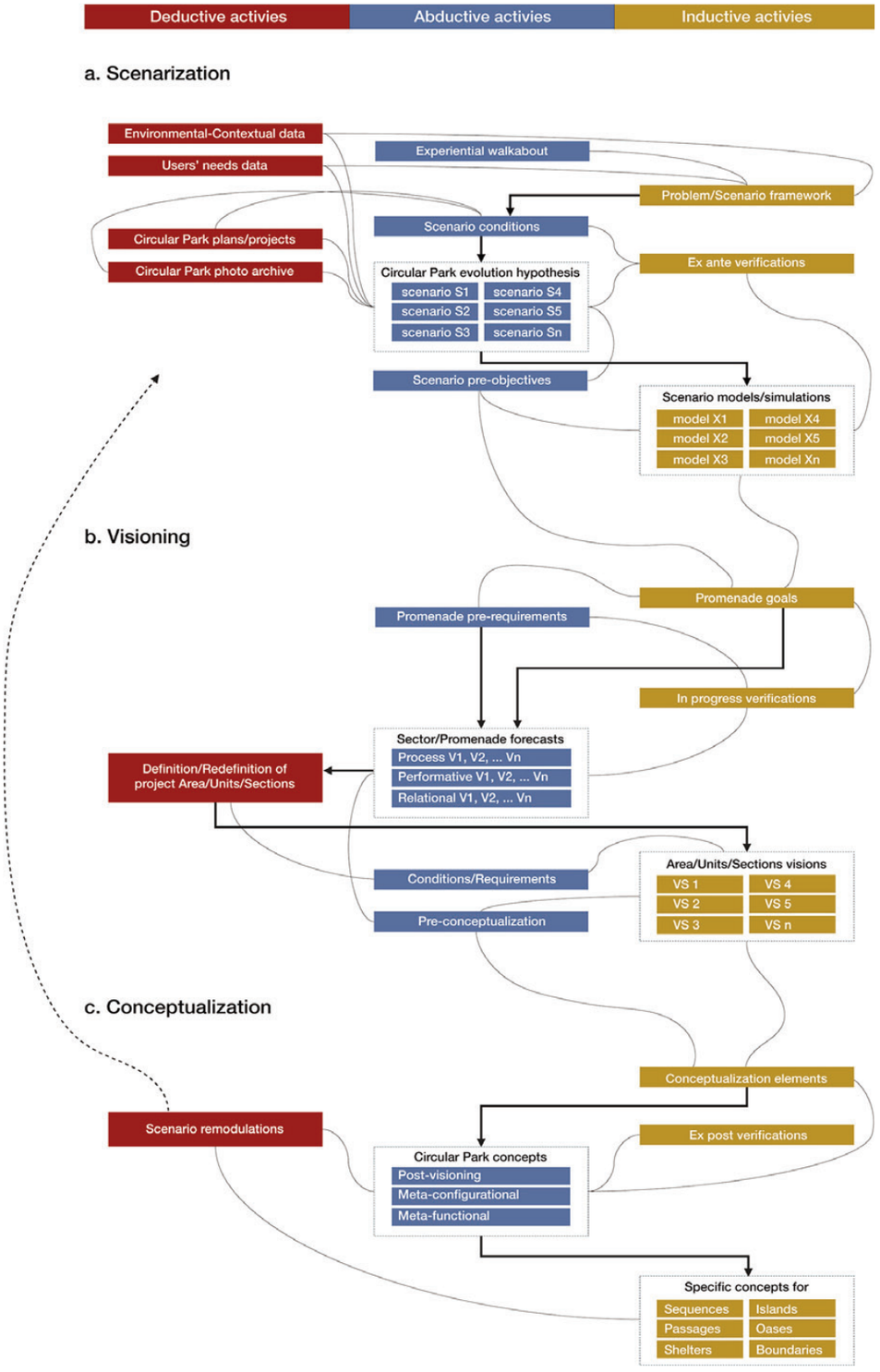


Fig. 8 | Experimental meta-design activity for the Circular Park (credit: F. Angelucci and A. Shatvoryan, 2025).

The Circular Park remains today a catalyst for social activities and functions, both recreational and ecological (Russian Federation – Ministry of Finance of the Slovak Republic and UNPD, 2021), an important legacy of the garden city, and among the few examples based on a radial model. The increasing attractiveness of the Armenian capital since 1991 risks the loss of this common resource which has contributed to an equilibrium between water, vegetation and urban context, as there is a transformation toward exclusive and private use (Harutyunyan, 2023). The emerging problem concerns the connections between architectonic, technological, environmental, urbanistic, and socio-economic aspects.

Regarding this subject, two research projects, financed by the European Union[1] and extended to cover non-communitary realities, have furnished an opportunity to reopen the debate regarding possible futures for the Circular Park. The experimental activity has allowed us to explore methodological, technological-environmental approaches and instruments to redefine the value of the Circular Park in Yerevan today, taking on two challenges in which water has a double role in relation to the objectives of Agenda 2030 (UN, 2015). First, water is a fundamental vector reconnecting the severed relations between public spaces, green areas and dwellings: in this area we aim to re-establish the relations between water, city and community to improve the collection, the use and the sustainable reuse of water resources (SDG 6) bolstering accessibility and inclusivity in public spaces and adapting to the changing climate (SDG 11; Capolongo et alii, 2018).

Secondly, water is an attractor agent that can help improve the psycho-physical quality and economic well-being of the community's people. From this point of view, the relationship between water, the city, and the community can influence healthy habits (Maass, Lillefjell, and Arild Espnes, 2017) in city life (SDG 3) and the development of creative, cultural-touristic, and sustainable recreational activities for the urban ecosystem (SDG 8).

Considering the potential transdisciplinary interest of the subject, this contribution will take a holistic approach to both the general and specific issues regarding the Circular Park; the thesis of the trinomial water / city / community as a generator of urban well-being, the meta-design experimentation carried out for regulative interfaces and the critical aspects of the elements and the replicability of the experience. The most impactful objectives are in two areas. The meta-design approach is not limited to the preparatory phases of the project but can be used as a continuative practice to produce knowledge for open and adaptive design that aims to generate variable conditions of psycho-physical well-being. Furthermore, references to the Garden City and to open spaces are not considered in terms which are exclusively conservative or green-blue infrastructure; the Circular Park has been brought up to date as a strategic system capable of regulating an evolving climate which integrates buildings, roads, and open spaces, as well as individual and collective practices.

State of the art: a diachronic reading of the Circular Park | State of the art regarding the Circular Park and, in general, 'garden cities' is diachronic in character. In fact, one reading is the original Plan for the Circular Park and how it has transformed over time. From this point of view, it is possible to trace elements attesting to a consolidated relation with water, public and green spaces, and the collectivity. In fact, the Tamanyan Plan is the first moment in which the city of Yerevan is given a tool that goes beyond the planning of pre-Soviet zoning (Musheghyan Plan 1905-1911, Fig. 1a), setting out from

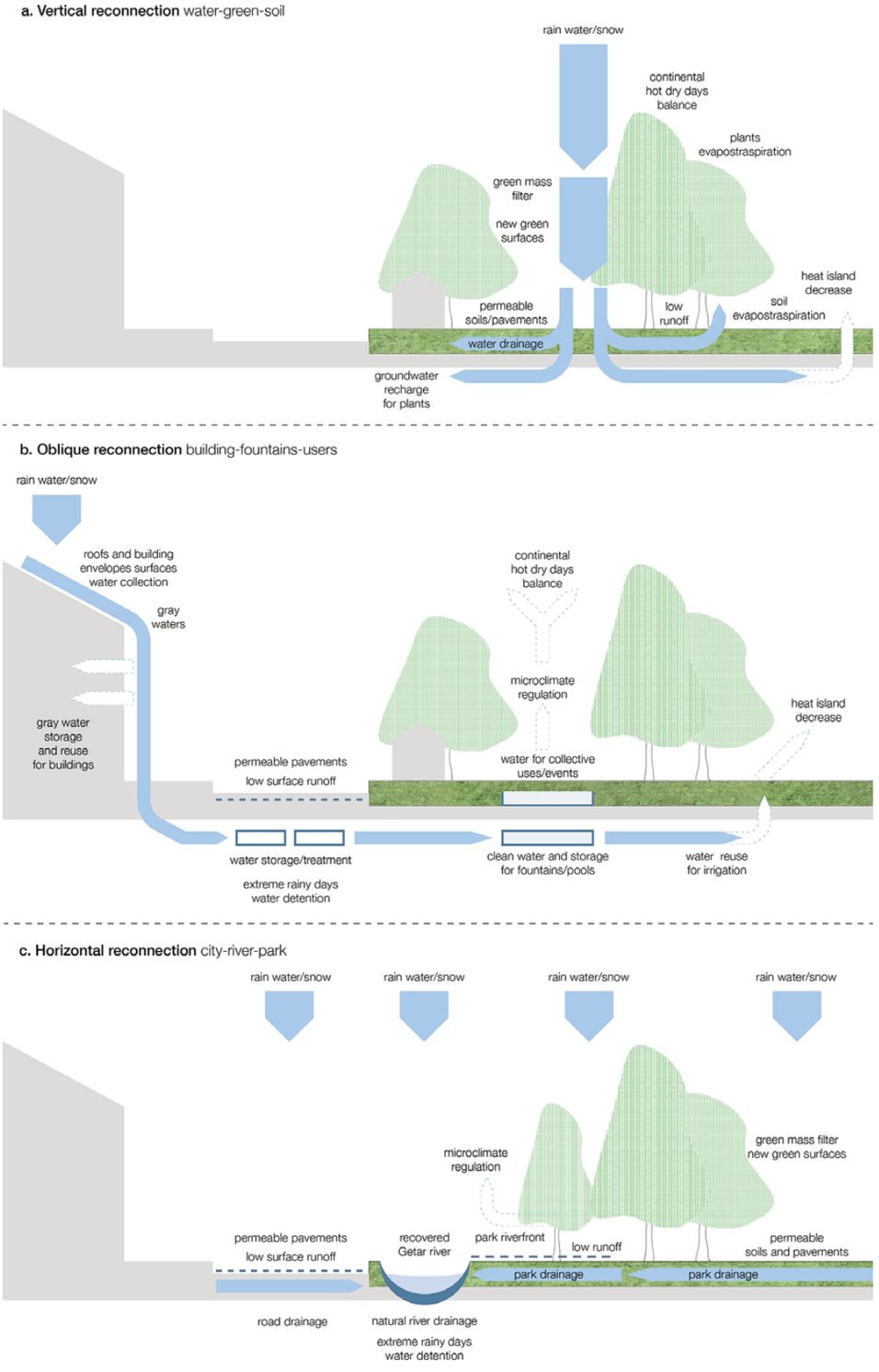


Fig. 9 | Vertical, oblique and horizontal reconnection models (credit: F. Angelucci and A. Shatvoryan, 2025).

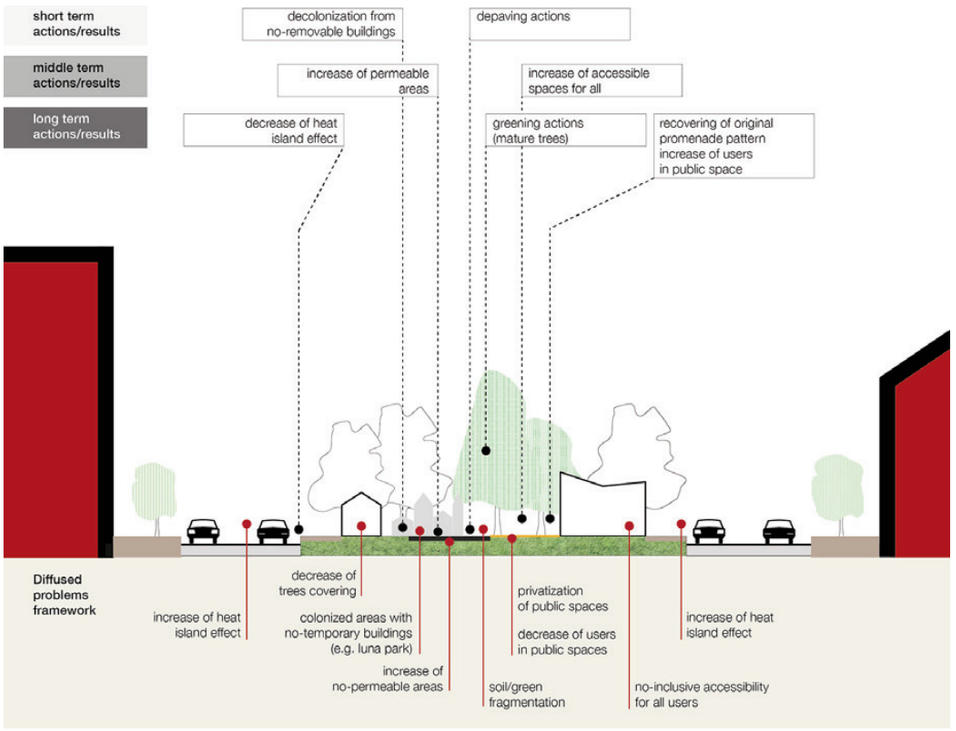


Fig. 10 | An example of a re-connective scenario in a typical section of the promenade of the Circular Park (credit: F. Angelucci and A. Shatvoryan, 2025).

1924 to integrate green spaces, water and built-up spaces, on the model of a Garden City. Up until 1932, one can recognise in the Tamanyan Plan the logic of reconnecting garden and natural spaces using a large circular garden (Fig. 1b).

Following World War Two, in the western part of the park which had not been built, one already notes built-up areas in which the only thing that remains of the circular garden are the geometric shapes, however, in the eastern wing's robust connection with the Getar River, the bodies of water and the green spaces are still quite visible in three of the four sectors (Fig. 1c). This arrangement appears as the general tendency in the Master Plan 2005-2020, even though it was not totally carried out both as regards the continuity of the water element within all the sectors of the Circular Park, and for the objective of creating green surface pro-capita of 17% (Fig. 1d).

Regarding the percentage of green space pro-capita, the recent Master Plan 2024-2025, approved by the Yerevan Council of Elders confirms the objective of bringing the percentage from 8.3% to 10% by 2030; the Yerevan Green City Action Plan (2017-2030) developed with the EU Covenant of Mayors that pushes for an integration of the green system with water, air, soil, transport systems, as they note the need to move toward WHO's pre-established objective of 50% of green space pro-capita.

On a different level of comparison between the past and the present are the elements of continuity that characterise the Circular Park and make up important specificities, also with respect to other experiences influenced by Howard's Garden City. In fact, there are few and dated cases that are traceable to the concentric / circular scheme.

In the first group, the concentric model is adopted to project a futuristic vision of a garden city with a low density and to support the maximum concentration of buildings, functionality and urban infrastructure in newly founded cities or districts, among these are Connaught Place in New Delhi (1933) by R Tor Russell, Circular Economy Park Middle East (2021) by McGregor Coxall or the Demonstrative Masterplan Jardin Siti by Houseal Lavigne (2023); in this group, the Garden City seems to live again as the matrix of green areas into which to immerge the built-up part of the city. The second group includes examples such as Nærum Oval Allotment Gardens (1948) by C. T. Sørensen and Brøndby Garden City (1964) by Erik Mygind: the circular scheme is mainly used as a geometric element to formalise the private green spaces of the dwellings within the matrix of a rural settlement.

Concerning the prospective of developing and updating of the Garden City model, and this not only on a radial plan, one tends to integrate holistically: water, green, community, infrastructure and socioeconomic-cultural activities to confront the new challenges and emergencies of climate, ecological and health changes (Vernet and Coste, 2017; Swensen and Krokann Berg, 2020; Nikologianni and Larkhan, 2022; Khavarian-Garmsir et alii, 2023; Coskun, 2024). As regards this last scientific position, it is important to point out two recent international group research projects involving the Circular Park.

The project, Memory of a River – Getar by the Cultural and Social Narratives Laboratory NGO, is among the initiatives of the Civil Society Support for Ensuring Impact on Reforms (financed by the Eurasia Partnership Foundation and the Swedish government). The project is important for its transdisciplinary approach, which is fundamental both for its meta-design approach and for its interpretation of the water element of the Getar River, brought back to light as an active part of a wider vision that interconnects relations between the urban project and anthropological, cultural and environmental aspects (Amiryan and Galstyan, 2023).

The Yerevan Green City Action Plan (2017-2030) is a second relative case study (developed and financed by Ernst & Young, European Bank for Reconstruction and Development, the Czech Government's Official Development Assistance, Technical Cooperation Fund of the City of Yerevan) that aside from bringing together a unitary vision of the components of previous plans involving the Circular Park, proposes a process of medium and long term interventions with which to integrate on several levels; water, soil, ecosystems and the city's energy (Ernst & Young, 2017).

Objectives: reconnecting the dimensions of the water / city / community trinomial | In recent years, the original character of the Circular Park as a common resource for the collectivity has run the risk of being cancelled. As in other urban realities in the circuit of mass tourism, green spaces have been sacrificed for sports and recreation activities managed by private operators who have been granted concessions – favoured by the scarce availability of public economic resources – that through construction (though small and temporary) have put in motion irreversible changes colonising the pertinent open spaces (De Cauter, 2004; Harutyunyan, 2021, 2023). In some cases, to reduce road traffic and to make space for buildings and their relative private parking, the Getar River has even been channelled underground (Hovhannisyan, 2017; Amiryan and Galstyan, 2023; Fig. 2).

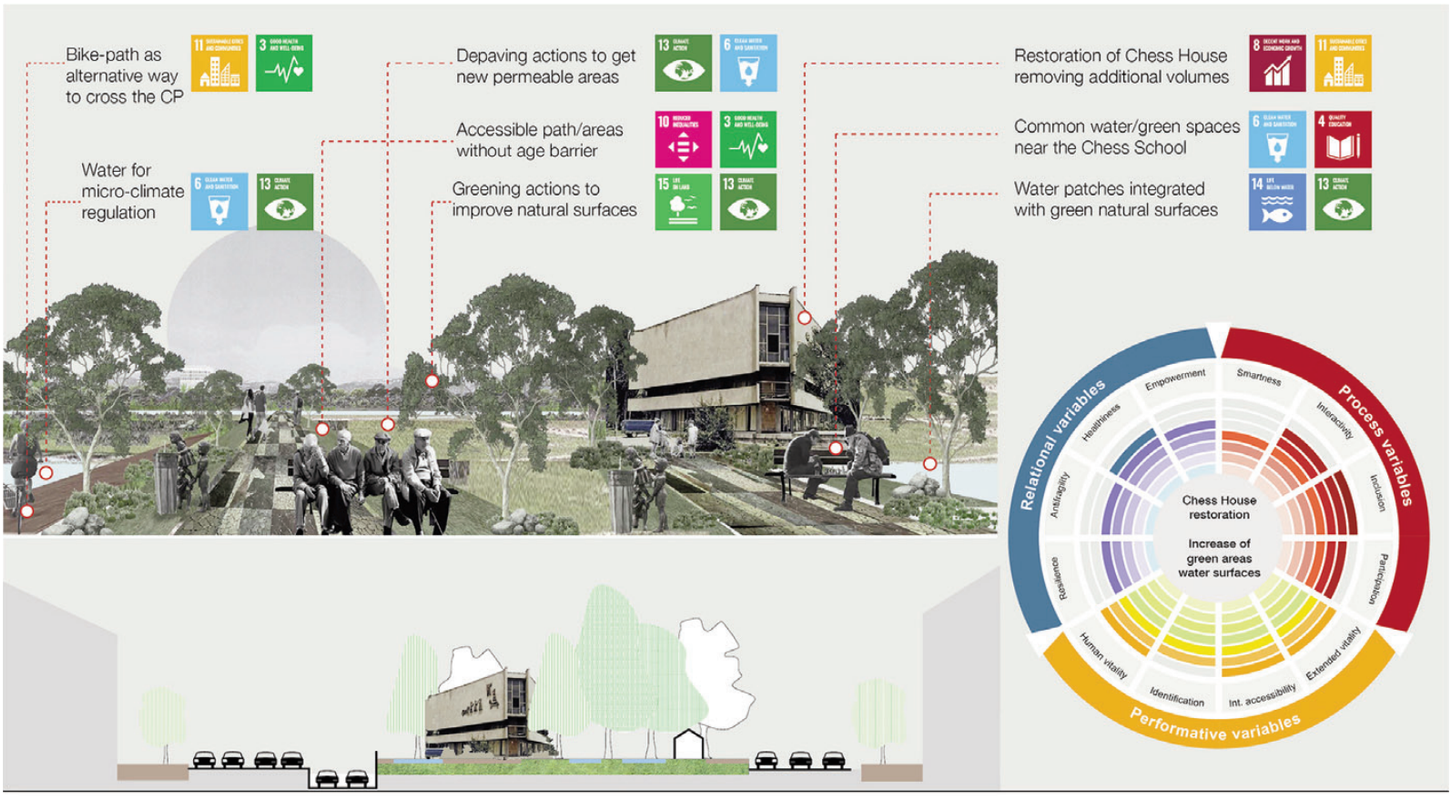
Today this process is found in four sectors (Fig. 3) with effects that are more or less serious, which indicate the criticality of the relationship that risks losing itself among the water resource, the city's technological-environmental components (natural and modified soils, buildings, infrastructure, etc.) and the community of inhabitants and those who use the Circular Park. We delineate the need and ways to intervene to restore, regenerate and improve the assets of the Circular Park, going beyond a reductive aesthetic-figurative or preservative meaning.

Tamanyan's idea for the Circular Park was to create an open-air 'promenade architecturale' we-

aving around the city, among collective installations (monuments, fountains, pools, squares, schools, university buildings, and buildings of public interest). Water is considered a physical-chemical attractor that, together with the green spaces, anticipates later developments and paradigms of urban sustainability. It improves the city's quality of life because of the several collective activities it offers and its various age-group targets. Moreover, given the articulation of the Tamanyan Plan, based on the theme of urban 'promenade' (Kertmenjian, 2019), the Circular Park constitutes, once again, an anticipatory experience whose finality we attribute today to blue, green and grey infrastructure. Water becomes the central vector for safety, resilience, and water supply. It is an essential resource for the vitality of the ecosystem and is embedded in the city's metabolic flows (Stockholm Resilience Alliance, 2010), where it assumes strategic value in maintaining the sustainability of Yerevan.

It is in this direction that the relationships between water, green, public spaces, and the collectivity emerge as the important characters of the Circular Park, deserving consideration when looking at future directions for this city. Still today it is possible to have direct contact with river / lake water and public spaces throughout Yerevan (Fig. 4): water integrates with the city's architecture and infrastructure at various levels – from general precise elements like 'pulpulak' and fountains to those which extend aerially – and function as attractor elements in several strategic polarities of the Armenian capital (Fig. 5). Last but not least, the presence of water continues to be an essential catalyser of Yerevan's collective life in the various seasons and climate conditions, as an agent that micro-regulates urban comfort conditions (Fig. 6).

Given the above, the objectives of the experiment have been oriented toward exploring two main reconnective dimensions of the trinomial water / city / community, tending toward interventions that do not deny the permanence of the original matrix of



Relational variables	**Resilience** Conditions for revitalizing the reactive capacity of natural components and addressing the extreme effects of ecological and climate transitions	**Antifragility** Conditions for activating flexible levels of adaptation and transformation of park systems, artifacts, infrastructures, and facilities during unprevieved events	**Healthiness** Conditions for strengthening the health and hygiene quality of public spaces by regulating interactions between the park and climate factors	**Empowerment** Conditions for supporting people's physical and mental health and their adaptation through changing environmental, social, and economic conditions
Process variables	**Smartness** Conditions for supporting and enabling different forms of traditional and digital intelligence and creativity in the use of park spaces	**Interactivity** Conditions for supporting forms of interaction between people with the natural and artificial environment through sharing and networking activities	**Inclusion** Conditions for enabling (not limiting) and including (not excluding) different users' targets during their individual and collective activities in the park	**Participation** Conditions for encouraging and supporting people's participatory activities during cultural, collective, and social events and public initiatives
Performative variables	**Human vitality** Conditions for supporting and regenerating park spaces to accommodate productive, cultural, educational, recreational, and exchange activities	**Identification** Conditions for supporting different states of symbiosis between people, natural, social, and cultural resources through past, present, and future	**Integrated accessibility** Conditions for determining multiple access to light, shade, air, greenery, water, and silence, even in the presence of environmental contextual variations	**Extended vitality** Conditions for maintaining, regenerating, and reintegrating plant life, hydrological flows, and also the reproduction of animal species

Fig. 11 | An example of a re-connective vision in section C of the Circular Park with SDG specifics from the Agenda 2030 and pre-evaluation with synthetic descriptors (credit: NUACA LabWorkshop; adapted by F. Angelucci and A. Shatvoryan, 2024).

the Plan, preserved across its evolutions from 1924 to 1932.

The first assumption concerns the bringing back of the objectives of the Tamanyan Plan to satisfy the current and future needs of a continually evolving city: the trinomial water / city / community must take on spatial configurations aimed at a qualitative improvement of the Circular Park in terms of recovery and regeneration of the conditions for the people's psycho-physical well-being. The second assumption concerns Tamanyan's idea to consider the Circular Park as a system that regulates the city's climate: the entire system should reorient itself toward the idea of a promenade, maintain the width of the sections within the appropriate dimensions to balance the contemporary presence of buildings, roads, pedestrian paths and open spaces, preserving the principle of a minimum of at least 9-10 sqm per person (Tamanyan, 1960).

Methodology: act on regulating space-environment interfaces | The issue that emerges from the diachronic reading of the Circular Park and from the hypotheses to use the reconnective capabilities of the trinomial water / city / community concerns the role of design in the evolving dynamics of the urban habitat. We started from the assumption that, before thinking in terms of the Plan, programs and projects, it is necessary to develop meta-design trajectories to identify alternative scenarios, project multiple visions and elaborate informational concepts (Gausa, 2024) to understand the 'reasons for the project': with the meta-design one can get over the logic of the action of the object, building and infrastructure themes. The resource water is not only a material characterising green-blue infrastructure, it is a common good that acts in widespread and multi-objective sustainability in the urban habitat, symbiotically with other natural, human and cultural capital such as soil, the earth below the surface, vegetation, contextual factors, buildings and intangible heritage (D'Ambrosio, Di Martino and Rigillo, 2022).

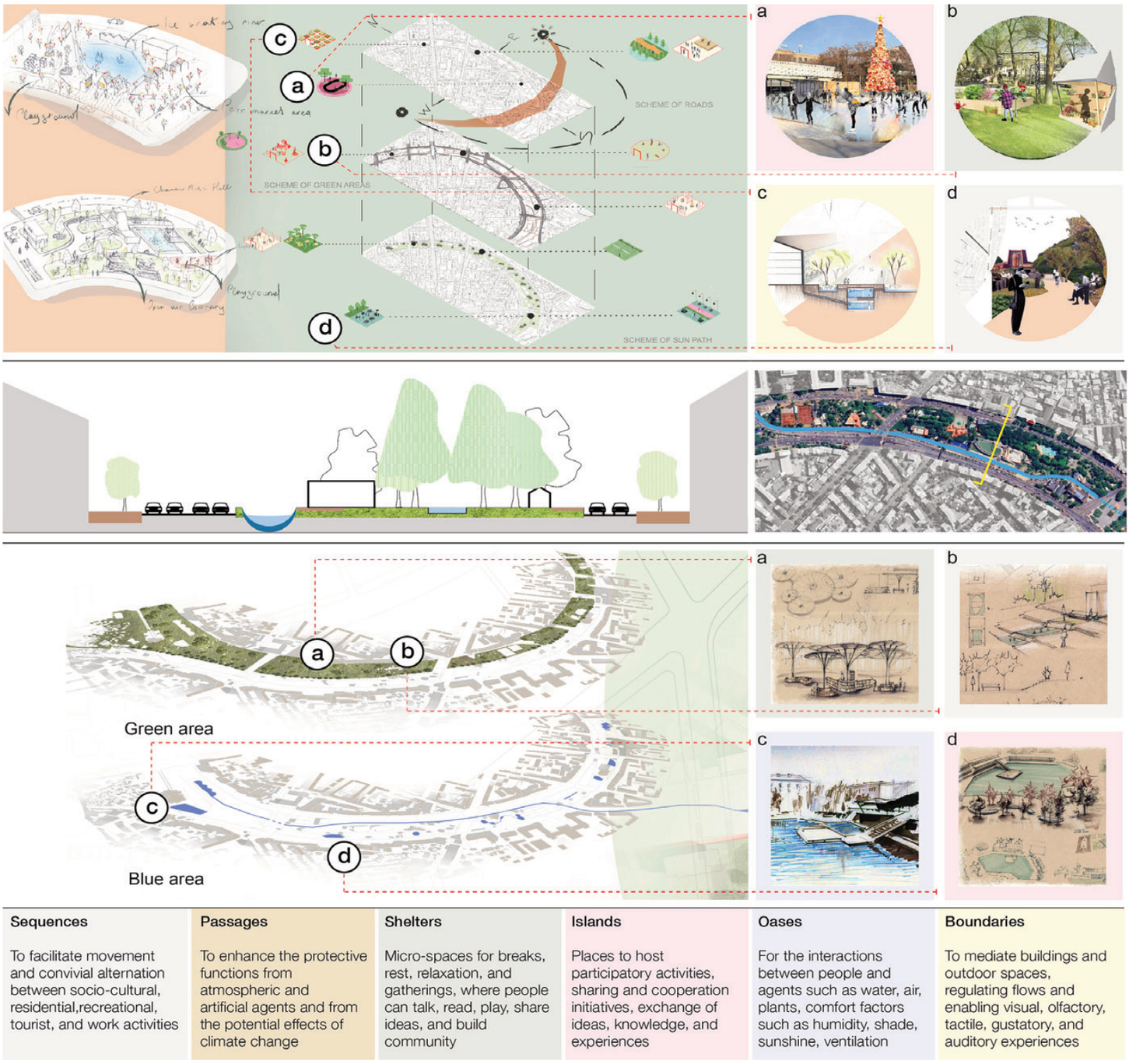


Fig. 12 | An example of a re-connective conceptualisation with an indication of possible 'intermittent' interventions for section C of the Circular Park, hypotheses for the reactivation of the Getar River (credit: NUACA LabWorkshop; adapted by F. Angelucci and A. Shatvoryan, 2025).

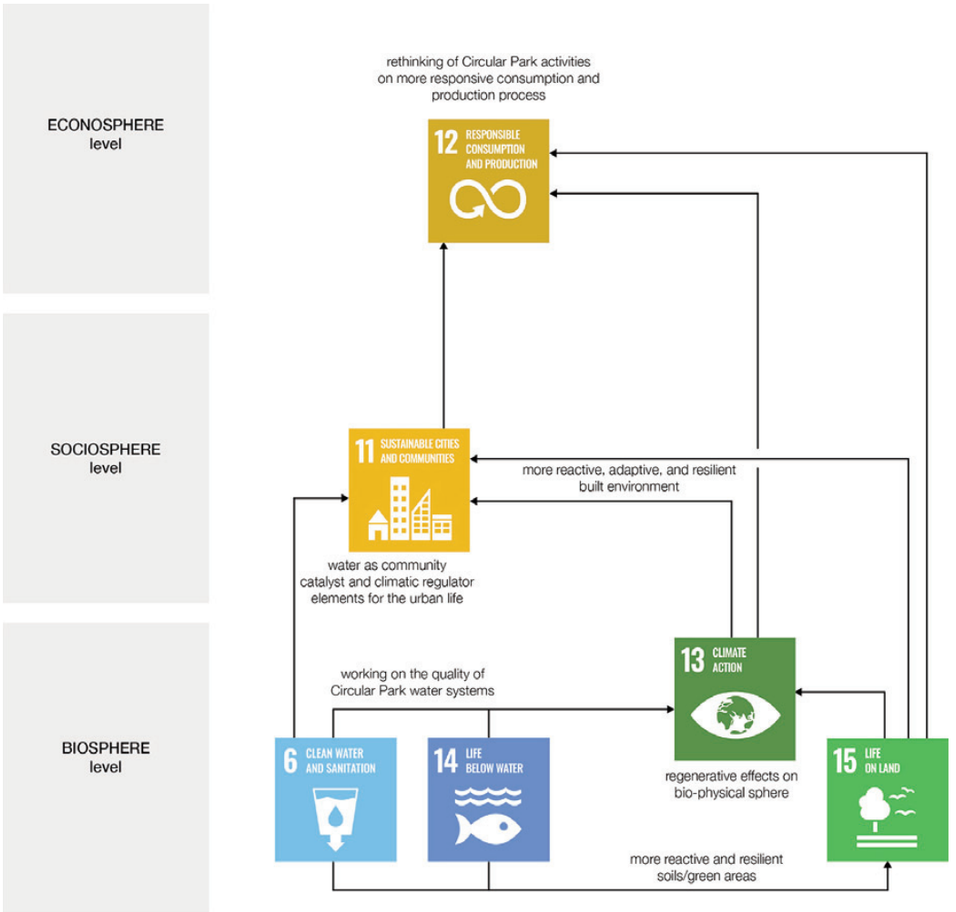


Fig. 13 | Flow chart 1 of the synergies that can be activated with the SDG of Agenda 2030 (credit: F. Angelucci, 2025).

In the experiment carried out in Yerevan[2], we explored scenarios, visions and intervention concepts starting from cross-sections of the promenade from Tamanyan's Plan, investigating the multiple levels of relational, performative or procedural connections that can be recovered or established by acting on the trinomial water / city / community. Some sections of the promenade still today characterise the Kentron area of Yerevan, while others are precisely those with the highest level of criticality of the Circular Park (Fig. 7).

The entire meta-design experience considered both the technological and environmental components of the various sectors of the Circular Park, examining the different and changing symbiotic, chronological, and spatial interactions recognisable in sections of the spatial-environmental interfaces. This approach has allowed us to observe the Circular Park from both the interior and the exterior, as a regulative socio-bio-techno-ecosystemic interface. By choosing to work with progressively more insightful views of the spatial-environmental regulatory interfaces, the approach has taken on a heuristic course.

In each meta-design phase, for each sector or section, we used heterogeneous data, parameters and elaborated elements, following both qualitative logic based on the evidence and quantitative logic based on performance. The process was also characterised by its inferential imposition, pausing to look at how we asked our questions (who, where, how, when, why, etc.) to redefine the ideative and decisional reasons of the possible transformative actions (Gehl and Svarre, 2013), using at the same time deductive / thesis, abductive / hypothesis and inductive / synthesis activities (Fig. 8).

The scenario phase looked at the entire Circular Park as a spatial-environmental interface setting that crosses the totality of central Yerevan. A critical reading of the contextual aspects (environmental factors, necessary systems, plans, projects, archives) and the parallel formulation of the evolution of the Circular Park have allowed us to project not one, but several variable scenarios, which can be combined, to reconnect or reinvent relationships and connections regarding the use of water, urban functions and behaviours of the final users.

In the visioning phase, we experimented with the utility of developing shared and alternative configurative variants through a laboratory-based involvement activity. Our investigations concerned specific units / sections of the spatial-environmental interface. We looked, above all, at the material and immaterial actions through which we could recover, strengthen, or insert the water element into an organic vision of the Circular Park as a system of spaces and places for urban well-being, sociality, and safety.

In the conceptualisation phase, the activities focused on the interface between specific spatial-environmental subunits, using suggestions intended to anticipate how the agent water can integrate coherently and respond to the objectives and reasons prospected in the scenario and visioning phases. We did not define a concept, but rather an integrated process for transmitting data, information and knowledge useful for reasoning, decision-making and intervention in the Circular Park, even if these interventions are carried out at different times.

Results: reconnection models | The approach we adopted has allowed us to reread the meta-design practice, highlighting the centrality of the cognitive and informational components that can favour a mediation of design (Easterling, 2021) in complex case studies such as the Circular Park of Yerevan. The study's results can be synthesised using three main models of cross-sections of the promenade of reconnection, which would restore the field of action within which the trinomial water / city / community can express its evolutive potential, conserving at the same time both the original idea of the Tamanyan Plan and satisfy the needs of contemporary Yerevan (UN, 2018; Fig. 9).

The vertical reconnection model 'water / green / soil' proposes intervening on the necessary connections to restore the Circular Park for public, social, cultural, and recreational activities, whether outdoors or indoors. The model foresees the re-establishment of connections between the meteorological agent water, the areas with vegetation (removing paving, making land permeable to water again, to decolonise non-removable equipment, reintegrate vegetation with new plantings) and the soil with its artificial stratification (pavilions, buildings, infrastructure, paths) to immerse them in the green also facilitating access to them by modifying local traffic.

The model for oblique reconnection, 'buildings / fountains / river / park', suggests interventions to avoid both potential decreases in the availability of the water resource and the possible effects of climate change or extreme meteorological events through the introduction of technological solutions that are not present today. By recovering, storing, and reusing meteorological water, one could integrate this into a vision centred on water-recycling buildings and groundwater, as well as the fountain system (a multi-seasonal attractor for collective activities), reservoirs, and other regulation and mitigation resources for the heat island.

The horizontal reconnection of the 'city / river / park' hypotheses deeper interventions to reactivate the Getar River as a blue-green meso-ecosystem that can involve at least three sections (74% measuring about 275,000 sqm) of the Circular Park. The river would once again become a structural system of micro-climate regulation and of mediation among green areas, architecture and collective activity, inserted into the wider park system, restoring to the city spaces used for vehicle parking that would be transformed into soil covered in vegetation.

The models have allowed us to foresee various degrees of re-connectivity of the Circular Park, taking into consideration both national and international programs and projects. In the scenario phase the degree of re-connectivity is hypothesised as regards the contextual issue framework and can change following political decisions, zoning initiatives and the economic conditions of the intervention that can arise over the short, medium or long term (Fig. 10). In the visioning activity, reconnective abilities were explored as respects the conditions of the performative and relational processes, utilizing a set of 12 synthetic descriptors (macro-requirements of conditions) which allowed us to make a first qualitative-

quantitative evaluation of the improvements which can be carried out with the implementation of the interventions to reach the SDG by 2030 (Fig. 11).

The same cross-section models of the promenade were also used to examine the spatial, configurative, and functional characteristics of some significant subunits of the intervention. With this further exploration, the system's degree of re-connectivity was expressed using multiple suggestions on the evolutive thresholds of the Circular Park, hypothesising a biological and experimental diversification by introducing 'intermittent' spatial situations (Sennett, 2019) with sequences, passages, shelters, islands, oases and interface boundaries (Fig. 12).

Through considering the differences found in the various sectors of the case study, by experimenting, we have identified some key unavoidable themes if one wishes to reach the SDG of the Agenda 2030 (Republic of Armenia, 2020):
– it is necessary to reduce the percentage of the surface that has been paved with asphalt or cement following privatising (to be substituted by draining paving and removable equipment) and the recovery of permeable surfaces (Ernst and Young, 2017) to reconnect the cycles of meteorological water with the processes of managing the green areas and collective equipment, reducing the consumption of water and effects on the heat island (Vardanyan et alii, 2024);
– it is crucial to maintain the differences of the sectors regarding value that, in the continuity of the unitary structure, the Circular Park contributes to enriching the users' experience opportunities, acting to overcome current spatial and technological barriers that hinder the conditions for inclusive accessibility, combining a multiform presence of water with a continuity of pedestrian and bicycle paths;
– reactivating the flow of the Getar River is a priority, re-establishing an urban riverfront whose function is the regulation of the microclimate of the open spaces for collective and private use (Quennerstedt, Backman and Mikaels, 2025), to bolster the drainage capacity of meteorologic water and to set up a green buffer zone interface between the park and the public architecture present in the Circular Park;
– it is fundamental to restore Tamanyan's original idea for the Circular Park as a system of gardens and architecture for collective use (Heiko and Fehlings, 2023), taking every opportunity to maintain the width of the sections of the promenade between 20 and 42 meters and to increase the area with vegetation (Green City Network, 2018), seeking to get close to the 10-15% (at least for the centre of Yerevan) of open green spaces, without buildings.

Discussion of the results | The application of the three models has been key, not only to explore the implementation possibilities of the above mentioned strategy of strong sustainability called for by the Stockholm Resilience Alliance (2010), but, above all, to hypothesise differing and alternative ways of re-organising the Circular Park following the suggestions of the WHO on the health benefits of the green-blue resource in anthropised space (WHO, 2021; Ak and Gunes Gölbey, 2021).

In fact, work on the sections of the promenade gives a valid opportunity to translate, in meta-design terms, so-called natural and/or artificial contextual factors. These factors, in any human habitat, if viewed in their reciprocal interactivity, are identified

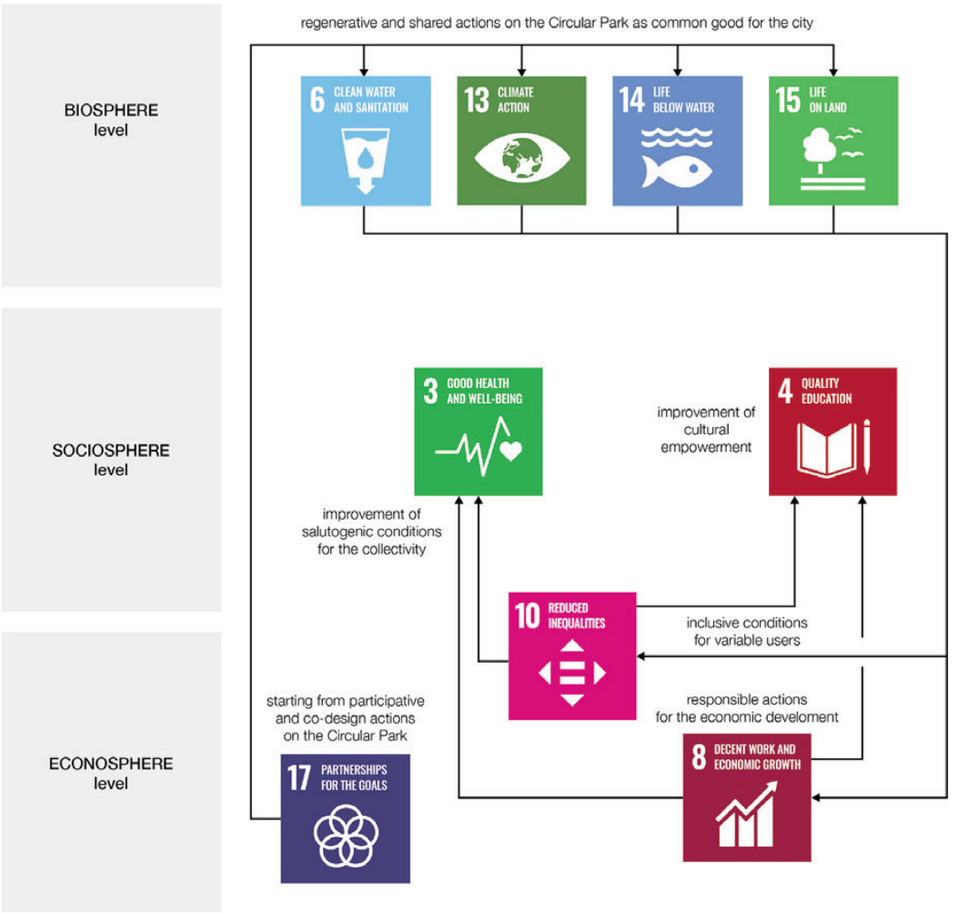


Fig. 14 | Flow chart 2 of the synergies that can be activated with the SDG of Agenda 2030 (credit: F. Angelucci, 2025).

by WHO as variables which act positively, in an enabling way (emancipation and participation), contributing to improving people's psycho-physical well-being; if the opposite is the case, these same people feel a sense of exclusion, uneasiness and deprivation. Its enabling capacity, health benefits, and support for the SDGs of the 2030 Agenda make the Circular Park emerge, for various reasons, in its multidimensional dynamic, in biological, chronological, and spatial senses (Mussinelli, Tartaglia and Castaldo, 2020; Roe and McCay, 2021). We offer a project-vision of water that acts over ample and unitary sections with a spatial-environmental interface where the water resource becomes a principle connecting agent among meteorological events (also extreme), water needs of (present and future) vegetation in the Circular Park, of the inhabitants and of practices in which water is a central element linked to the landscape and to urban comfort (pulpulak) or to collective Armenian events (vardavar; Nahapetyan and Kirakosyan, 2025).

In terms of replicability, the meta-design process experience allows for varying degrees of contextualisation, to avoid risky drift toward standardisation and the homogenisation of analyses and results. From this point of view, the experience carried out in Yerevan brings out interesting methodological elements transferable to the more general environment of complex trans/interdisciplinary design, as it can:
– favour an approach to the project that looks at criticalities and contextualisation of the present as it projects toward a poly-dimensional project culture of futures that can reproduce and have the capacity to regenerate soil, water, air, and biocenosis;
– enable provisional and decisional operating conditions to orient design choice incorporating determinants, right from the first phases; people's psycho-physical well-being, the possibility of several degrees of participation by actors and the sharing of the objectives of integrated sustainability;
– bolster the development of the activities of conceptualisation, not as a simple formal pre-design abstraction, but as a product of essential knowledge and information to bring back relativity and connections among the data, contextual factors, artificial physical space and a city's common goods.

Progress toward the SDG of the Agenda 2030 | The experience carried out on the Circular Park in Yerevan can contribute to strengthening, in an integrated way, the implementation of the SDG of the Agenda 2030. Adopting the Stockholm Resilience Alliance model, which prioritises water alongside other elements in seeking to achieve the other SDGs, reveals interesting synergies among the various objectives. These can be synthesised as:
– chain 1) in which the idea of the Circular Park, reconsidered according to the three models of reconnection among water, city, community are seen as an interface in which the quality of the water resource (SDG 6 and 14) contributes in reconnecting the natural and human ecosystem processes in the everyday of urban life, one can activate a group (SDG

11 and 13) that bolsters the natural and constructed systems making them more reactive, adaptive and resilient and revitalise the components of the bio-physical and productive sphere (SDG 12 and 15; Fig. 13);
– chain 2) in which meta-design participative practices on a consolidated system, such as the Circular Park (SDG 17), can help in the spreading of the co-design of common goods like cities, a further group that originates from the regeneration of the Circular Park as a regulative system (SDG 6, 13, 14, and 15) can allow responsible forms of economic development (SDG 8), healthful conditions for the collectivity (SDG 3) and opportunities to strengthen cultural and inclusive belonging (SDG 4 and 10; Fig. 14).

Limits, criticalities, and replicability | There were, however, some economic-cultural barriers that created fundamental limits for the complete implementation of the experimented meta-design process. First, it is necessary to consider that, though the Circular Park is regarded as an essential element of its urban history and still today central to the Yerevan's social life, the process of privatisation has continued almost unchallenged: commercial catering and recreational activities increase in removing the soil from the public domain or maintain their fixed character of colonisation of the open space even in the absence of activity (e.g. a small seasonal amusement park) breaking up the continuity of the ecosystem.

A second aspect is Yerevan's continental and dry climate. To implement intensive greening measures, significant amounts of water would be needed for irrigation and to fill swimming pools and fountains. Though sufficient water resources are available today, the effects of climate change could pose new issues that would require, first, to act on the consolidated green, intervene to limit water use, a choice of species of resilient vegetation and a mix of terrain and paving adapted to a new climate situation (Vardanyan et alii, 2024).

Notwithstanding these criticalities, the experiment has allowed us to identify the necessity of translating the meta-design into participative, choral, and co-design dimensions (Ratti, 2014), without which the wealth of suggestions and informational content is seriously impoverished, leading to a fallback to reproposing traditional top-down approaches with a silo effect. Interesting emerging elements are found in the methodological articulation of the experimented meta-design approach that, in its flexible and reticular iter, is the object of ongoing insights with AI instruments (with potential applications in the governance of inferential / cognitive flows of a Boolean or Bayesian type).

The hypothesis of acting in a meta-design and participative way on the Circular Park to reorient it toward a dynamic urban ecosystem, shows elements of transferability to other geographical and cultural contexts, even in the absence of such large and evocative green areas as in the case study of Yerevan, because:
– water, even in the form in which it is used and its reduced presence in cities, constitutes a crucial catalysing element in community life and a moderator (even when used spontaneously) of climate effects;
– the reduction of green spaces has been accelerated by the privatisation process in cities with extreme levels of tourism (spreading of short-term rents) and gentrification because of the evolution / expansion of global real estate markets;
– a demand for integrated co-production strategies to make cities more adaptive and resilient has increased in settlements of all dimensions, small, large and metropolitan areas;
– the active participation in the decisional and design processes of the several actors, experts and non-experts, has become increasingly central in the production of shared value with which we are facing the new challenges of sustainability.

Within future development, we can identify two possible trajectories. The experimentation of the process should be tested even in cases of unresolved studies, where the availability of natural and built-up resources is confronted with degradation, general abandonment, and the dysfunctionality of a city's processes. Further, the set of 12 synthetic descriptors – with respect to which, to date, only percentage increases in surface area (green, blue, grey, etc.) have been measured – should be integrated with synthetic indicators that would enable shared valuation among design experts and non-experts.

Conclusions | The study conducted in Yerevan has highlighted the possibility of nesting appropriate configurations into future city planning to reattribute the Circular Park's ability to act as a regulatory system between the urban fabric, nature, and social activity, leveraging the centrality of the water element. The 'park system' can retain its designated original function as an intermediary corridor connecting green spaces, equipment, and buildings, while at the same time serving as an 'in-between system' between the intensively built-up city, particularly invasive traffic infrastructure, and the ecotope corridor of the reinsertion of the Getar River.

Starting from water, not only as a consumable physical-chemical element but also as an agent with regulative-connective value between society, cities, and the dynamics of socio-economic development, the experiment was fundamentally to reframe the Circular Park within a re-connective dimension that goes beyond a simple redesign of green or open spaces. In fact, it delineates the possibility of intervening to contribute to tackling the issues linked to the sustainability of the city, its public spaces and its relationship with the architectural heritage and natural resources on various scales, among which are the intensive use of soil, the risks to its water resources due to climate change and the dynamics of mass tourism.

The Circular Park should return to take on its central role for at least three reasons: 1) it becomes a strategic ecological infrastructure system to reintegrate the existent green heritage, but also favours a regeneration of the relationship between daily life and nature; 2) it takes on a new multiple identity to produce, use, transform and manage economically water and green urban spaces and generate the best possible living conditions for individuals and the community; 3) it reconstructs a plurality of connections for the maintenance and the evolution of the cyclicality, the relations, the dependencies, the circularities, and the subsidiarity among the city's natural and artificial components.

Disciplinary progress in the field of cultural design has emerged from this experience, which has examined several theoretical, methodological and operational aspects. One of these concerns is the problematisation of the criticalities connected to the degradation of the natural heritage in urban habitats that are continuously changing: targeted interventions that increase the soil's regeneration capabilities, water and biocenosis cannot be considered as simple actions of re-naturalisation, because they need to be contextualised with the needs, actors and practices that must be co-evolved with natural elements and processes.

A second aspect involves the reorientation of the methods for designing complex areas like the Circular Park: the multiple provisional actions become fundamental for orienting design choices toward a shared, participative goal that addresses and shapes the effects on people's variable psycho-physical well-being.

A third, but no less important aspect, the meta-design actions do not stop at the generation of concepts that lay out the chosen design: meta-designs are continually in a design and informational mode that investigates and produces knowledge, which from time to time is used to modify the design itself as the conditions of the context change.

In general, the experience of the Circular Park can be extended to successive applications in urban environments, where one can highlight strong interactions between water, green spaces, soil, built-up heritage, and the collectivity (Ferracuti, 1994). In fact water carries out a fundamental role as a civic and social catalyser, but at the same time it carries out an essential environmental and climate function and, in this double role, it can enter as part of a more general project to cure and maintain, that involves the cultural dynamics of social aggregation, of psychological well-being and of community life in cities.

The integration of this widening of the nature of water, from physical-chemical element to an element with a multiplicity of mediations between nature and city, one introduces the theme of urban green heritage: urban greening actions take on a technical-environmental connotation and in the regenerative processes of green spaces the landscape can no longer be static, it is no longer a simple garden or park. Green spaces must be designed to restore and enhance ecological function, aesthetic values, and the physical well-being of the biotic communities present in the urban fabric.

The main challenges brought to our attention through this experience concern the capacity not to limit oneself to authorial and unidirectional proposals, whether public or private, and to consider instead open, divergent initiatives, instances and hypotheses of reconnection. Bringing this reasoning to the value of the connection means, first of all, working toward evolving models and not on closed projects; but also means considering recovery strategies and innovation in the technological environmental system, weighing public and private needs, tracking down the reasons of the preservative and transformative actions, concentrating not only on technical information of 'what to do', but also on technological-environmental knowledge that can orient us in the ways of the 'why, when and where to do'.

Acknowledgements

The article is the result of a joint elaboration of the authors, notwithstanding that, the introductive paragraphs, 'Objectives: reconnecting the dimensions of the water / city / community trinomial', 'Methodology: act on regulating space-environment interfaces' and 'Results: reconnection models' are to be attributed to F. Angelucci and A. Shatvoryan; the paragraphs, 'State of the art: a diachronic reading of the Circular Park' and 'Discussion of the results' to A. Shatvoryan; the paragraphs 'Progress toward the SDG of the Agenda 2030' and 'Limits, criticalities, and replicability' to F. Angelucci.

Notes

1) Research funded by EU TACEESM – Transforming Architectural and Civil Engineering Education toward a Sustainable Model (2020-23) and Research sponsored by EU EX-Mind, Extended Mind Models for the Design of Human Environment (2024-in progress).

2) An initial experiment of this approach was developed in 2023 within the case study of the 'Cascade' of Yerevan. Later, the general elements of the study on the Circular Park were presented in Angelucci and Shatvoryan (2024).

References

Ak, M. and Güneş Gölbey, A. (2021), "The Role of Urban Green Spaces in Sustainable Urban Planning", in *Journal of Urban and Landscape Planning*, vol. 6, issue 2, pp. 85-97. [Online] Available at: julpreview.ro/files/JULP6_2021-Mehmetali-AK-p85_97.pdf [Accessed 30 September 2025].

Amiryan, T. and Galstyan, H. (eds) (2023), *Getar – Memory of a River*, Cultural and Social Narratives Laboratory, Yerevan.

Angelucci, F. and Shatvoryan, A. (2024), "New Perspectives for Yerevan's Circular Garden in View of the Environmental Transitional Challenges", in *Journal of Architectural and Engineering Research*, vol. 7, pp. 118-131. [Online] Available at: doi.org/10.54338/27382656-2024.7-010 [Accessed 30 September 2025].

Capolongo, S., Rebecchi, A., Dettori, M., Appolloni, L., Azara, A., Buffoli, M., Capasso, L., Casuccio, A., Oliveri Conti, G., D'Amico, A., Ferrante, M., Moscato, U., Oberti, I., Paglione, L., Restivo, V. and D'Alessandro, D. (2018), "Healthy Design and Urban Planning Strategies, Actions and Policy to Achieve Salutogenic Cities", in *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 15, issue 12, article 2698, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/ijerph15122698 [Accessed 30 September 2025].

Coskun, H. (2024), "From Modern Ideas-Theories and Pandemic, Garden-Cities of To-Morrow and Today", in *International Journal of Architecture, Arts and Applications*, vol. 10, issue 4, pp. 64-75. [Online] Available at: doi.org/10.11648/j.ijaaa.20241004.11 [Accessed 30 September 2025].

D'Ambrosio, V., Di Martino, F. and Rigillo, M. (2022), "Tecnologie geocomputazionali digitali per il metaprogetto di infrastrutture verdi urbane | Digital geocomputational technologies for the metaproject of urban green infrastructures", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 162-171. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11142022 [Accessed 30 September 2025].

De Cauter, L. (2004), *The Capsular Civilization – On the City in the Age of Fear*, NAi Publishers, Rotterdam.

Easterling, K. (2021), *Medium Design – Riprogettare il mondo*, Treccani Libri, Roma.

Ernst and Young (2017), *Yerevan's Green City Action Plan*. [Online] Available at: ebrdgreencities.com/assets/Uploads/PDF/Yerevan-GCAP.pdf [Accessed 30 September 2025].

Ferracuti, G. (1994), *Tempo, Qualità, Manutenzione – Scritti sulla manutenzione edilizia, urbana e ambientale,* Alinea Editrice, Firenze.

Gausa, M. (2024), "Complessità, n-città e sistemi dinamici multilivello – Verso una (geo)urbanità in rete e in reti | Complexity, n-city, and multilevel dynamic systems – Towards a networked (geo)urbanity and networks", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design,* vol. 16, pp. 16-29. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1612024 [Accessed 30 September 2025].

Gehl, J. and Svarre, B. (2013), *How to Study Public Life*, Island Press, Washington (DC).

Green City Network (2018), *Green City Guidelines – The Green City Network*. [Online] Available at: greencitynetwork.it/wp-content/uploads/Green-City-Guidelines.pdf [Accessed 30 September 2025].

Harutyunyan, M. (2023), "Yerevan's Gardens, Parks and Green Areas – Analysing Architectural Design, Environment and Issues (Yerevan's Circular Park)", in *Polish Journal of Science,* vol. 64, pp. 3-7. [Online] Available at: doi.org/10.5281/ZENODO.8153518 [Accessed 30 September 2025].

Harutyunyan, M. (2021) "Architectural design enhancement of gardens / parks in Yerevan", in *Heritage and Sustainable Development*, vol. 3, issue 2, pp. 148-153. [Online] Available at: doi.org/10.37868/hsd.v3i2.72 [Accessed 30 September 2025].

Heiko, C. and Fehlings, S. C. (2023), "The Transformation of Green Zones in Yerevan, Armenia – Domestication of Nature, Times of Ruination and the Idea of New Hanging Gardens", in *Global Environment*, vol. 16, issue 2, pp. 291-324. [Online] Available at: doi.org/10.3197/ge.2023.160205 [Accessed 30 September 2025].

Hovhannisyan, A. (2017), *Impact of transition on transformation of public green spaces in Yerevan*, Master Thesis, Erasmus University Rotterdam, Netherlands, MSc Programme in Urban Management and Development. [Online] Available at: hdl.handle.net/2105/42360 [Accessed 30 September 2025].

Kertmenjian, D. (2019), "The Promenade in Contemporary Architecture of Yerevan", in Pirumyan, N. (ed.), *Contemporary Problems of Architecture and Construction – Selected, peer reviewed papers from the 11th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction, NUACA University, Yerevan, Republic of Armenia, October 14-16, 2019*, NUACA University, Yerevan, pp. 61-69. [Online] Available at: nuaca.am/wp-content/themes/nuaca/images/Proceedings.pdf [Accessed 30 September 2025].

Khavarian-Garmsir, A. M., Sharifi, A., Hajian Hossein Abadi, M. and Moradi, Z. (2023), "From Garden City to 15-Minute City – A Historical Perspective and Critical Assessment", in *Land*, vol. 12, issue 2, article 512, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/land12020512 [Accessed 30 September 2025].

Maass, R., Lillefjell, M. and Arild Espnes, G. (2017), "The Application of Salutogenesis in Cities and Towns", in Mittelmark, M. B., Sagy, S., Eriksson, M., Bauer, G. F., Pelikan, J. M., Lindström, B. and Espnes, G. A. (eds), *The Handbook of Salutogenesis*, Springer, Cham, pp. 171-179. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-04600-6_18 [Accessed 30 September 2025].

Mussinelli, E., Tartaglia, A. and Castaldo, G. (2020), "Il tempo della città tra natura e artificio | The Time of the City between Nature and Artifice", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 20, pp. 131-139. [Online] Available at: doi.org/10.13128/techne-8243 [Accessed 30 September 2025].

Nabila, N. (2021), "The Concept of Garden City and its Relevancy in Modern City Planning", in *Southeast University Journal of Architecture*, vol. 1, issue 1, pp. 1-7. [Online] Available at: old.seu.edu.bd/seuja/downloads/vol_01_issue_01_Jun_2021/SEUJA-Vol01Issue01-1.pdf [Accessed 30 September 2025].

Nahapetyan, G. and Kirakosyan, L. (2025), "The Ideological Content and Architectural Features of Drinking Fountains", in *Journal of Architectural and Engineering Research*, special issue 1, pp. 36-44. [Online] Available at: doi.org/10.54338/27382656-2025.si.1-04 [Accessed 30 September 2025].

Nikologianni, A. and Larkham, P. J. (2022), "The Urban Future – Relating Garden City Ideas to the Climate Emergency", in *Land*, vol. 11, issue 2, article 147, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/land11020147 [Accessed 30 September 2025].

Quennerstedt, M., Backman, E. and Mikaels, J. (2025), "Returning to the river – The salutogenic model as a theory to explore the relation between outdoor activities and health", in *Journal of Adventure Education and Outdoor Learning*, vol. 25, issue 1, pp. 245-260. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14729679.2024.2342305 [Accessed 30 September 2025].

Ratti, C. (2014), *Architettura Open Source – Verso una progettazione aperta*, Einaudi, Torino.

Republic of Armenia (2020), *Sustainable Development Goals – Voluntary National Review Report*. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/content/documents/26318Armenia_VNRFINAL.pdf [Accessed 30 September 2025].

Roe, J. and McCay, L. (2021), *Restorative Cities – Urban design for mental health and wellbeing*, Bloomsbury Publishing, London.

Russian Federation – Ministry of Finance of the Slovak Republic and UNDP (2021), *Socio-Spatial Analytics of Yerevan*. [Online] Available at: undp.org/armenia/publications/socio-spatial-analytics-yerevan [Accessed 30 September 2025].

Sennett, R. (2019), *Building and Dwelling – Ethics for the City*, Penguin Books, London.

Stockholm Resilience Alliance (2010), *Assessing Resilience in Social-Ecological Systems – Workbook for Practitioners*. [Online] Available at: resalliance.org/files/ResilienceAssessmentV2_2.pdf [Accessed 30 September 2025].

Swensen, G. and Krokann Berg, S. (2020), "The 'garden city' in the Green Infrastructure of the Future – Learning from the Past", in *Landscape Research*, vol. 45, issue 7, pp. 802-818. [Online] Available at: doi.org/10.1080/01426397.2020.1798365 [Accessed 30 September 2025].

Tamanyan, A. (2000), *A Collection of Documents and Materials (1878-1936)*, Gitutyun, Yerevan.

Tamanyan, A. (1960), *Articles, Documents, Contemporaries about Him*, Publishing House of the Academy of Sciences of the Armenian SSR, Yerevan.

UN – United Nations (2018), *SDG Implementation Voluntary National Review (VNR) Armenia – Report for the UN High-level Political Forum on Sustainable Development (transformation towards sustainable and resilient societies) 9-18 July, 2018*. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/content/documents/19586Armenia_VNR_2018.pdf [Accessed 30 September 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, document A/RES/70/1. [Online] Available at: docs.un.org/en/A/RES/70/1 [Accessed 30 September 2025].

Vardanyan, Z., Nersisyan, G., Przybysz, A., Elbakidze, M., Sayadyan, H., Grigoryan, M., Ktrakyan, S., Avetisyan, G. and Muradyan, N. (2024), "Improvement in the Adaptation and Resilience of the Green Areas of Yerevan City to Climate – Ecological Challenges", in *Atmosphere*, vol. 15, issue 4, article 473, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/atmos15040473 [Accessed 30 September 2025].

Vernet, N. and Coste, A. (2017), "Garden Cities of the 21st Century – A Sustainable Path to Suburban Reform", in *Urban Planning,* vol. 2, issue 4, pp. 181-196. [Online] Available at: doi.org/10.17645/up.v2i4.1104 [Accessed 30 September 2025].

WHO – World Health Organization (2021), *Green and Blue Spaces and Mental Health – New Evidence and Perspectives for Action*. [Online] Available at: iris.who.int/bitstream/handle/10665/342931/9789289055666-eng.pdf?sequence=1 [Accessed 30 September 2025].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 178-195
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/1892025

Article Info

Received 10 September 2025
Revised 25 October 2025
Accepted 27 October 2025
Published 30 December 2025

PROGETTARE CON L'ACQUA
Strategie, protocolli e progetti nell'architettura e per le città

DESIGNING WITH WATER
Strategies, protocols, and projects in architecture and for cities

Tiziana Campisi, Luisa Lombardo

Abstract

La gestione dell'acqua è sempre più centrale nel progetto di architettura e di rigenerazione urbana, sia per le nuove costruzioni che per il Patrimonio esistente. La carenza globale di acqua dolce, aggravata dalle ricorrenti siccità, ne richiede un ripensamento radicale dell'uso, in linea con il riconoscimento delle Nazioni Unite dell'accesso all'acqua come diritto umano. Promuoverne l'efficienza richiede strategie integrate come la raccolta e il riciclo dell'acqua piovana, i sistemi di infiltrazione e le tecnologie di monitoraggio avanzate. La progettazione deve adottare materiali sostenibili che minimizzino i consumi e garantiscano un'efficienza a lungo termine. Questo articolo analizza le pratiche attuali e i casi di studio, proponendo protocolli e buone pratiche replicabili. L'acqua diventa non solo una risorsa gestita ma anche un generatore di valore, resilienza e benessere a supporto dell'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile.

Water management is becoming increasingly central to both architectural design and urban regeneration, encompassing not only new developments but also the preservation and adaptation of existing heritage. The global scarcity of freshwater, exacerbated by recurrent droughts, necessitates a radical rethinking of water use, aligned with the United Nations' recognition of access to water as a fundamental human right. Improving water efficiency demands integrated strategies such as rainwater harvesting and reuse, infiltration systems, and advanced monitoring and control technologies. Architectural design must incorporate sustainable materials and systems that minimise resource consumption while ensuring long-term performance, durability, and efficiency. This paper analyses current practices and case studies, proposing transferable protocols and best practices. In this context, water emerges not merely as a managed resource but as a generator of environmental, social, and economic value, resilience, and well-being, supporting the objectives of the 2030 Agenda for Sustainable Development.

Keywords

gestione dell'acqua, architettura sostenibile, rigenerazione urbana, conservazione dell'acqua, progetto resiliente

water management, sustainable architecture, urban regeneration, water conservation, resilient design



Tiziana Campisi, Architectural Engineer and PhD, is a Full Professor of Architectural Engineering at the Department of Architecture, University of Palermo (Italy). Her research focuses on architectural construction techniques, with particular attention to the sustainable and compatible rehabilitation of traditional architecture. E-mail: tiziana.campisi@unipa.it

Luisa Lombardo, Engineer and Europeaus-PhD in Architecture, Arts, and Planning, Junior Researcher at the Department of Architecture, University of Palermo (Italy). Her research focuses on sustainable heritage rehabilitation and smart villages, integrating architecture, cultural heritage, and project sustainability strategies. E-mail: luisa.lombardo01@unipa.it

Negli ultimi decenni l'attività antropica ha accelerato processi di alterazione climatica ed ecosistemica senza precedenti, favorendo la manifestazione di eventi estremi quali ondate di calore, inondazioni, siccità e incendi diffusi (Barnett, 2006). Tale scenario, aggravato dalla crescita demografica globale, mette a rischio gli equilibri vitali della biosfera, compromettendo la resilienza dei sistemi naturali e sociali e colpendo in modo sproporzionato le comunità più vulnerabili (IPCC, 2023). Parallelamente la perdita di biodiversità indebolisce la stabilità degli ecosistemi, mentre l'omogeneizzazione dei sistemi socioeconomici – guidata da logiche di efficienza e profitto – riduce la capacità collettiva di adattamento e la resilienza agli shock ambientali (Javanroodi, Nik and Scartezzini, 2021).

In questo contesto l'acqua emerge come risorsa strategica, intimamente connessa ai cicli naturali e assolutamente determinante non solo per l'adattamento climatico, ma anche per la promozione della giustizia ambientale. Il diritto all'accesso all'acqua e il suo uso consapevole sono ormai concepiti non solo come obiettivi di conservazione, ma come leve progettuali e tecnologiche in grado di migliorare le prestazioni edilizie, di modulare i microclimi urbani (Valente et alii, 2024) e di supportare strategie integrate di resilienza (Matthies and Menne, 2009). Le politiche urbane più avanzate degli ultimi anni enfatizzano approcci integrati in cui energia, acqua e infrastrutture verdi convergono in spazi multifunzionali – quali scuole, giardini, centri civici e hub comunitari – fungendo da catalizzatori per la rigenerazione sociale e ambientale (Blecic et alii, 2024).

Le risposte contemporanee all'emergenza climatica tendono a concentrarsi prevalentemente sulla decarbonizzazione (Ness, 2024) e sulle energie rinnovabili, trascurando spesso l'impatto delle risorse materiali necessarie alla costruzione di tali infrastrutture, che comportano rilevanti consumi energetici e contributi emissivi (Olatunde et alii, 2024). Un approccio progettuale realmente efficace richiede quindi un ampliamento del focus tecnico-scientifico, includendo una gestione razionale delle risorse non rinnovabili e integrando le azioni nel quadro degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) delle Nazioni Unite, in particolare degli Obiettivi 6, 9, 11 e 13 (Hendawy, Junaid and Amin, 2024). Tecnologia, energia e tempo, intrecciati da tempo immemore in ogni genere di Rivoluzione Industriale, hanno plasmato le società moderne, nelle quali la disponibilità continua di energia e servizi è data per scontata, condizionando comportamenti individuali e collettivi.

L'iperconnessione e la domanda costante di flussi energetici intensificano le pressioni sulle risorse naturali, rendendo imprescindibile un ripensamento del rapporto tra architettura e risorsa idrica: progettare con l'acqua implica superare logiche lineari ed estrattive, adottando approcci sistemici in cui energia, risorse idriche e cicli sociali si coordinano in strategie integrate di resilienza ecologica e sociale.

Il progetto architettonico assume un ruolo cruciale nel tradurre principi derivati dalla permacultura, dalle strategie low-tech e da visioni speculative come il Solarpunk in pratiche spaziali concrete (Crosby, 2023). Alla stregua di un vero e proprio 'dispositivo progettuale', tra performance ambientale e sperimentazione architettonica, l'uso dell'acqua assume una duplice funzione, al contempo simbolica e funzionale, configurandosi come elemento regolatore dei microclimi, mediatore dell'esperienza spaziale e componente attiva nei sistemi energetici sostenibili (Brisotto et alii, 2023). Gli edifici non sono più entità statiche, ma dispositivi ambientali dinamici, capaci di interagire con il contesto climatico e sociale; in questa prospettiva l'acqua si configura come catalizzatore di innovazione ambientale, tecnologica e culturale.

Storicamente, l'acqua ha favorito il dialogo tra costruito e paesaggio naturale, come mostrano la Fallingwater di Frank Lloyd Wright (1935-1937), integrata strutturalmente con il corso d'acqua, e la Farnsworth House di Mies van der Rohe (1951), sopraelevata per affrontare esondazioni stagionali. Dagli anni Settanta il suo ruolo evolve da simbolico a performativo, con soluzioni basate su accumulo termico e tecnologie solari passive (Peng et alii, 2023): progetti come il Blur Building di Diller Scofidio + Renfro (2002), il Digital Water Pavilion di Carlo Ratti e MIT (Expo Saragozza, 2008) e l'IceHotel di Jukkasjärvi (1991) esplorano l'acqua come medium esperienziale e interattivo.

La ricerca tecnologica ha sviluppato sistemi avanzati di regolazione termica e adattamento climatico (Sposito, 2017). Esempi più datati includono i Water Drum Walls degli anni Quaranta del XX secolo e si ricordano, negli anni Settanta-Ottanta dello stesso secolo, le soluzioni di Steve Baer, John Hammond e Marshall Hunt, applicate in ambito residenziale e agricolo, sino ai contenitori modulari translucidi realizzati dalla Kalwall Corporation e dal Water Wall Engineering Group, per arrivare infine ai più recenti dispositivi quali le Transparent Water Storage Envelopes (TWSE) o ai sistemi ceramici porosi che permettono una gestione stagionale avanzata del comfort termo-igrometrico, con incrementi di efficienza energetica tra 25% e 88% (Xiangfeng and Tianxing, 2007). Permangono criticità legate all'energia incorporata, spesso trascurata da protocolli come LEED, BREEAM, Passivhaus e ActiveHouse (Vosoughkhosravi et alii, 2022).

Le strategie emergenti puntano a un approccio sistemico, integrando efficienza, multifunzionalità e adattabilità (Butera, 2024): l'acqua diventa componente attiva e adattiva, permettendo edifici climaticamente responsivi, sostenibili e tecnologicamente innovativi, capaci di coniugare qualità ambientale, prestazioni energetiche e sperimentazione architettonica.

Alla luce delle premesse esposte il contributo ha l'obiettivo di definire strategie e protocolli progettuali per la gestione integrata della risorsa idrica nei contesti urbani e nel Patrimonio costruito, con particolare attenzione alla sostenibilità, alla resilienza e alla replicabilità delle soluzioni. Il contributo è strutturato in tre sezioni principali: una prima parte teorico-metodologica che inquadra il tema, le criticità e le opportunità di intervento; una seconda parte dedicata all'analisi critica di casi studio internazionali e locali, evidenziandone punti di forza, limiti, criteri di selezione e trasferibilità; una terza parte in cui vengono proposti protocolli, indicatori di performance (KPI) e diagrammi operativi per supportare la progettazione resiliente dell'acqua.

L'originalità dello studio risiede nell'approccio analitico sistemico, che integra tecnologie avanzate, materiali sostenibili, gestione delle risorse e impatto sociale, mentre l'impatto atteso riguarda la proposizione / definizione di linee guida replicabili e misurabili, capaci di informare politiche urbane e pratiche progettuali innovative. Il contributo fornisce inoltre una riflessione critica sui limiti e sulle barriere (culturali, economiche e normative) che ostacolano la diffusione delle buone pratiche e sugli scenari di trasferibilità dei risultati ad altri contesti socio-ambientali, contribuendo al dibattito scientifico sugli SDG 6, 9, 11 e 13 e alle sinergie possibili con gli altri Obiettivi.

Stato dell'arte | La gestione integrata delle risorse idriche urbane è oggi una sfida prioritaria per la sostenibilità ambientale, sociale ed economica (Badarnah, 2016). La letteratura evidenzia la necessità di superare i tradizionali sistemi lineari di drenaggio e accumulo, favorendo modelli idricamente sensibili, orientati a conservazione, riuso e resilienza (Zacharias, Dimitriou and Koussouris, 2003). In questo contesto, il Water Sensitive Urban Design (WSUD) integra il controllo delle acque meteoriche con spazi verdi multifunzionali, migliorando benessere urbano, resilienza climatica e microclima (Donofrio et alii, 2009).

La trasformazione da città impermeabili a 'città-spugna' promuove l'infiltrazione naturale, la riduzione del rischio idraulico e la disponibilità di acqua non potabile tramite sistemi diffusi di captazione, stoccaggio e trattamento naturale, attraverso tecnologie chiave che includono coperture e facciate verdi, pavimentazioni permeabili e sistemi di fitodepurazione (Vacanti and Leonardi, 2024). Il Sustainable Drainage Systems (SuDS) e l'approccio SuDS / WSUD risultano scalabili dalla scala edilizia a quella urbana, con tecniche come trincee filtranti, canali vegetati, bioritenzione, bacini di detenzione, stagni artificiali e fitodepurazione (Ferrans et alii, 2022), la cui scelta dipende da obiettivi specifici di sicurezza idraulica, depurazione e riuso, incremento della biodiversità o rigenerazione urbana.

Protocolli di certificazione ambientale promuovono sistemi a basso consumo idrico e sensori intelligenti per la gestione digitale dei flussi e l'efficienza energetica e studi recenti sottolineano la necessità di concepire edifici e spazi pubblici come sistemi attivi e interattivi, capaci di regolare microclimi, accumulare energia, promuovere biodiversità e incentivare pratiche comunitarie sostenibili (Berizzi, Mazurkiewicz and Terlicher, 2025).

Questi sistemi idro-ecologici favoriscono la coevoluzione tra natura e ambiente costruito, contribuendo alla resilienza urbana, tuttavia la gestione resta spesso frammentata e le dimensioni sociali, educative e culturali sono raramente integrate, evidenziando l'urgenza di un approccio sistemico e multidisciplinare che integri progettazione urbana, ingegneria, architettura, ecologia e partecipazione civica. In questo quadro l'acqua diventa elemento progettuale centrale e l'innovazione risiede nell'integrazione sinergica di infrastrutture idriche, energetiche e sociali per modelli replicabili di architettura resiliente e sostenibile.

Obiettivi, metodologia e fasi della ricerca | Gli obiettivi della ricerca riguardano la definizione di un framework integrato per la gestione sostenibile delle risorse idriche in ambito urbano ed edilizio, l'integrazione tra sistemi idrici, dispositivi energetici e spazi pubblici multifunzionali, la strutturazione di un protocollo operativo replicabile per supportare progettisti, amministratori e stakeholder locali. La ricerca adotta un approccio metodologico qualitativo-analitico, articolato in tre fasi, finalizzato alla definizione del citato un framework, con l'obiettivo di valorizzare l'acqua come elemento attivo nella generazione di performance ambientali, sociali e tecnologiche (Rahman et alii, 2019).



Fig. 1 | West Village (2013), University of California Davis (credit: Sherwin-Williams, 2015).

La prima fase è l'analisi critica e la revisione sistematica della letteratura scientifica, normativa e tecnica su sistemi di gestione idrica urbana (WSUD), comunità energetiche e infrastrutture blu-verdi. La revisione della letteratura è stata condotta su database scientifici peer-reviewed (Scopus, Web of Science, ScienceDirect) per il periodo 2010-2025, utilizzando parole chiave quali 'urban water management', 'WSUD', 'green-blue infrastructure', 'stormwater harvesting' e 'sustainable architecture'. Sono stati selezionati studi peer-review con dati sperimentali, linee guida tecniche, casi studio replicabili e report istituzionali, privilegiando pubblicazioni focalizzate su tecnologie integrate per il controllo dei flussi idrici e l'efficienza energetica, con particolare attenzione a tecnologie per la raccolta, il trattamento e il riuso delle acque meteoriche, SuDS, coperture e facciate verdi, superfici permeabili, dispositivi di fitodepurazione e strumenti digitali per il monitoraggio in tempo reale dei flussi idrici.

La seconda fase è la comparazione dei casi studio nella quale si prevede l'analisi critica di casi studio nazionali e internazionali; questa fase costituisce il fondamento teorico su cui si innesta l'analisi comparativa dei casi studio, in quanto indagine critica capace di individuare le buone pratiche nell'integrazione tra infrastrutture idriche, dispositivi energetici e spazi pubblici resilienti.

La comparazione è stata condotta secondo quattro categorie interpretative principali: 1) scala e contesto che rimandano alla dimensione degli interventi, al bacino d'utenza e alle caratteristiche territoriali; 2) funzionalità intesa come configurazione dei sistemi integrati di gestione idrica, efficienza energetica e servizi accessori; 3) impatto ambientale valutato in termini di riduzione delle emissioni, resilienza idrica e regolazione microclimatica; 4) integrazione sociale con riferimento al grado di partecipazione civica, all'inclusione educativa e all'attivazione di pratiche comunitarie.

La terza fase è l'elaborazione di protocolli operativi replicabili, nella quale sono stati individuati strumenti progettuali e strategie integrate per la gestione sinergica di acqua ed energia, applicabili sia al retrofit ambientale sia a nuovi interventi edilizi. I protocolli sono concepiti per supportare progettisti, amministratori e stakeholder locali e le strategie individuate sono orientate non solo a migliorare le prestazioni ambientali, tecnologiche e sociali, ma anche a valorizzare il Patrimonio architettonico esistente, promuovendo resilienza climatica, equità sociale ed efficienza tecnologica. L'approccio metodologico deduttivo consente così di colmare il divario tra teoria e pratica, ponendo l'acqua non solo come dispositivo progettuale, ma anche come vettore di innovazione sistemica in architettura (Mecca, Gaballo and Todella, 2023).

Lo studio si caratterizza quindi per il suo approccio integrato e sistemico alla gestione dell'acqua in contesti urbani e edilizi, tema ancora poco approfondito nella letteratura corrente, che tende a trattare separatamente le dimensioni tecnologica, sociale o ambientale. L'originalità della ricerca deriva dalla combinazione tra analisi critica della letteratura, comparazione dei casi studio e sviluppo di protocolli operativi, permettendo di identificare buone pratiche trasferibili in contesti diversi. Assecondando tali presupposti lo studio vuole colmare una lacuna significativa nella gestione integrata delle risorse idriche, stimolando da un lato il dibattito sul tema presso la comunità scientifica e professionale, dall'altro ulteriori ricerche su strategie sostenibili e innovative per la valorizzazione dell'acqua come elemento attivo e generatore di resilienza e coesione sociale.

Casi studio | Per comprendere l'applicazione dei principi di gestione integrata dell'acqua, i casi studio sono stati organizzati in tre macrocategorie – extraeuropei, europei e italiani – al fine di evidenziarne differenze di scala, approcci tecnologici e strategie di integrazione con energia e spazi pubblici.

Partendo dai casi extraeuropei, negli Stati Uniti il Campus West Village dell'Università della California Davis (Fig. 1) rappresenta un esempio virtuoso di comunità 'net zero energy' dove sistemi fotovoltaici, accumulo energetico e digestione anaerobica dei rifiuti sono integrati con la raccolta e il riuso dell'acqua grigia e piovana. La capacità complessiva di stoccaggio idrico, pari a 1,2 milioni di litri, viene utilizzata per irrigazione e servizi comuni: sensori e sistemi di monitoraggio intelligente ottimizzano in tempo reale i flussi idrici e la gestione energetica, con una riduzione del 50% del consumo idrico rispetto a edifici con caratteristiche analoghe. La gestione digitale coordina anche il fabbisogno energetico dei pannelli fotovoltaici e dei sistemi di digestione anaerobica: l'acqua è concepita come vettore di efficienza energetica e sostenibilità edilizia (Maziotis, Sala-Garrido and Molinos-Senante, 2024). In India il Solar Canal Project (Fig. 2) integra risorse idriche e produzione energetica; l'acqua presente nei canali è essa stessa sistema di raffreddamento dei pannelli fotovoltaici galleggianti, incrementandone l'efficienza, riducendo l'evaporazione e ottimizzando l'uso dell'acqua per il territorio agricolo (Sananse et alii, 2023). A Singapore i Water Gardens (Fig. 3), progettati da Peter Walker & Partners, dimostrano l'integrazione di bacini d'acqua in contesti urbani ad alta densità che combinano stoccaggio delle acque piovane, raffrescamento naturale e micro-climatizzazione urbana, generando spazi pubblici resilienti e multifunzionali, capaci di supportare attività ricreative e sociali (Yap and Koh, 2010).

In Nord America e Giappone numerosi edifici residenziali impiegano bacini e canali come 'serbatoi di calore' naturali, sfruttando la capacità termica dell'acqua per accumulare calore durante il giorno e rilasciarlo di notte, migliorando l'efficienza energetica degli impianti di riscaldamento e raffrescamento (Kepekci and Asma, 2020). La gestione integrata dell'acqua svolge un ruolo strategico nella sostenibilità idrica, ma anche nell'ottimizzazione energetica e nel miglioramento delle condizioni microclimatiche interne ed esterne degli edifici (Corradi et alii, 2024).

In Europa l'integrazione tra infrastrutture bluverdi e progettazione urbana rappresenta un approccio consolidato per la gestione sostenibile delle acque e la resilienza ai cambiamenti climatici. Nei Paesi Bassi il Waterplein Benthemplein a Rotterdam dimostra come le piazze urbane possano trasformarsi in bacini temporanei durante eventi pluviometrici intensi grazie a pavimentazioni permeabili, aree verdi multifunzionali e sensori per il monitoraggio dei livelli idrici, consentendo il drenaggio modulato e la riduzione del rischio di allagamenti (Prestamburgo et alii, 2021).

A Copenhagen il Cloudburst Management Plan si caratterizza per un approccio digitale avanzato alla gestione delle acque meteoriche con bacini temporanei, parchi urbani e sistemi di drenaggio sostenibile per precipitazioni fino a 100 mm/h: sensori pluviometrici, sistemi SCADA e modellazione predittiva permettono il controllo in tempo reale dei flussi idrici, mentre superfici permeabili e bacini sotterranei garantiscono l'accumulo e il rilascio graduale dell'acqua.

Altri esempi includono l'Eden Project a Cornwall (Fig. 4) e l'Aquatic Centre di Londra (Fig. 5), in cui l'acqua si configura quale elemento di regolazione del microclima interno, illuminazione naturale e irrigazione vegetale. In Svizzera il Blur Building (Fig. 6) sfrutta nebbie generate da getti d'acqua controllati digitalmente per esperienze sensoriali e analisi termodinamiche, mentre l'Ice Hotel in Svezia (Fig. 7) è un esempio di uso temporaneo dell'acqua congelata per costruzioni stagionali che promuove sostenibilità e innovazione architettonica (Ciccarese and Fino, 2004).

I casi europei di Copenhagen, Rotterdam e Friburgo sono stati selezionati come esempi di eccellenza europea nella gestione integrata delle acque, impiegando soluzioni tecnologiche, ambientali e sociali replicabili in altri contesti urbani. L'analisi di tali progetti – secondo le tre dimensioni principali di scala e contesto territoriale, innovazione tecnologica e sostenibilità ambientale e grado di inclusione sociale e partecipazione civica – consente di identificare limiti, barriere e opportunità di trasferibilità, offrendo un contributo originale alla comunità scientifica e fornendo linee guida operative per progettisti e de-

cisori pubblici. Analogamente i casi studio italiani presentati nel seguito della trattazione sono stati scelti in base a criteri di rilevanza, replicabilità e capacità di integrare le infrastrutture idriche con energia, spazi pubblici e servizi urbani, sia in contesti metropolitani sia in aree periurbane e rurali. Con maggiore definizione di dettaglio si presentano alcuni esempi europei e italiani emblematici per i caratteri di resilienza, regolazione dei microclimi urbani, comunità smart, rigenerazione urbana ambientale.

Enghaveparken: infrastruttura verde multifunzionale e urbanismo resiliente | Il progetto Enghaveparken (Fig. 8), inserito all'interno del Cloudburst Management Plan della Città di Copenhagen, è un caso emblematico di integrazione tra infrastrutture idriche, qualità paesaggistica e partecipazione civica. Il Parco, realizzato oltre novant'anni fa nel quartiere popolare di Vesterbro, è stato oggetto di recente riqualificazione: con una capacità di immagazzinamento pari a 22.600 mc di acqua piovana, funziona come infrastruttura verde resiliente, capace di combinare sicurezza idraulica, mitigazione microclimatica e servizi ecosistemici a scala urbana (Avramidou and Manika, 2021).

La strategia progettuale si fonda su bacini ribassati, serbatoi sotterranei e morfologie topografiche adattive. Aree come il Water Garden e il Rose Garden sono state modellate per raccogliere e trattenere l'acqua in eccesso durante gli eventi di pioggia intensa, mentre dighe, mini-argini e un serbatoio interrato da 2.000 mc ne regolano i flussi e ne consentono l'accumulo temporaneo: l'acqua immagazzinata viene utilizzata per l'irrigazione del verde e la pulizia delle strade, riducendo il prelievo da falda. Il sistema garantisce la continuità delle funzioni vegetali e ricreative in condizioni di siccità e durante periodi di piovosità.

Oltre alla funzione tecnica l'intervento ha preservato e valorizzato le preesistenze storiche, viali alberati e padiglioni originari, arricchendo il Patrimonio arboreo con 83 nuovi esemplari, a beneficio della biodiversità e della regolazione microclimatica. Parallelamente il progetto ha integrato dispositivi sensoriali e pedagogici che trasformano l'acqua in un elemento di educazione e consapevolezza climatica con fontane interattive, canali a cielo aperto e spazi ludici.

Enghaveparken è un modello di urbanismo resiliente, capace di trasformare la gestione del rischio idrico in un'opportunità di rigenerazione urbana. La riqualificazione dimostra come l'alleanza tra ingegneria idraulica, progettazione paesaggistica e inclusione sociale possa produrre benefici integrati, riducendo la vulnerabilità climatica, migliorando la qualità della vita e rafforzando il valore culturale e ambientale dello spazio urbano: l'acqua diventa medium operativo per una città sostenibile, adattiva e consapevole.

Il caso Enghaveparken conferma l'efficacia di un approccio integrato alla gestione delle acque urbane, in cui ingegneria idraulica, paesaggio e partecipazione civica convergono in un sistema adattivo e multifunzionale. Le soluzioni adottate, basate su morfologie topografiche flessibili e dispositivi sensoriali, offrono contributi significativi al dibattito scientifico sulle soluzioni basate sulla natura applicate alla resilienza urbana. Più che un modello replicabile Enghaveparken rappresenta una metodologia di progetto trasferibile, capace di orientare la pianificazione urbana verso forme di adattamento dinamico fondate sulla relazione tra infrastruttura ecologica, memoria storica e uso sociale dello spazio.



Fig. 2 | Solar Canal Project (2014) in Gujarat, India (credit: PBS News, 2022).

Rotterdam, la 'città spugna' | La strategia complessiva di Rotterdam (Fig. 9), nota come 'città spugna', integra coperture e facciate verdi e quartieri galleggianti per immagazzinare e riutilizzare l'acqua piovana, al fine di regolare i microclimi urbani e sostenere la biodiversità (Dolman and Verlinde, 2024). Situata al di sotto del livello del mare e circondata da fiumi la città olandese rappresenta uno degli esempi più avanzati di adattamento urbano ai cambiamenti climatici, con un approccio proattivo alla gestione delle acque che trasforma ogni superficie urbana in dispositivo capace di assorbire, trattenere e riutilizzare l'acqua meteorica. Strade, piazze e marciapiedi sono progettati come bacini temporanei di raccolta, mentre impianti di stoccaggio e sistemi di recupero ne consentono l'impiego per l'irrigazione, usi non potabili e regolazione microclimatica.

Tra gli interventi più innovativi si collocano i quartieri galleggianti – attualmente in fase di sviluppo – concepiti come centri per attività sociali e culturali, oltre che prototipi di architettura resiliente che permettono di adattarsi alla variazione dei livelli idrici senza compromettere le funzioni urbane. La trasformazione urbana ha comportato l'impiego di materiali impermeabili e pavimentazioni innovative, ma soprattutto l'attivazione di politiche di coinvolgimento dei cittadini incentivati alla raccolta dell'acqua piovana e a pratiche sostenibili tramite agevolazioni fiscali e campagne di sensibilizzazione. Dal 2008 a oggi sono stati installati oltre 140.000 mq di tetti verdi con l'obiettivo di raggiungere i 200.000 mq entro il 2030 dimostrando la capacità del Piano di coniugare azioni su scala individuale e comunitaria. La gestione adattiva delle acque è diventata anche risorsa economica e tecnologica: le competenze sviluppate a Rotterdam nella progettazione di sistemi anti-inondazione sono oggi richieste in numerosi contesti internazionali, da città statunitensi come New Orleans fino a diversi Paesi dell'Africa, del Sud-est Asiatico e dell'America Latina. L'esperienza olandese mostra come la gestione idrica possa essere al tempo stesso strumento di prevenzione, di sostenibilità ambientale e di sviluppo economico, configurando la città come modello globale di urbanismo resiliente.

Il caso di Rotterdam dimostra come la gestione integrata delle acque possa costituire una strategia di governance urbana oltre che un modello tecnico di resilienza. Le azioni sviluppate – dai quartieri galleggianti alle coperture verdi – rivelano un approccio olistico che unisce innovazione, partecipazione e competitività economica, ridefinendo il rapporto tra città e acqua in chiave produttiva e identitaria. L'esperienza olandese, più che fornire un modello univoco, apre un quadro teorico di riferimento per la pianificazione adattiva in aree a rischio idraulico, delineando una possibile traiettoria di transizione per le città europee verso scenari climaticamente consapevoli.

Friburgo | La città di Friburgo in Brisgovia (Fig. 10), definita la 'capitale ecologica' della Germania, è un modello di comunità smart in cui sostenibilità ambientale, innovazione tecnologica e partecipazione civica si intrecciano in un sistema urbano resiliente e replicabile. Con circa 230.000 abitanti ha avviato già dagli anni Settanta del Novecento un percorso di pianificazione sostenibile, originato dalla mobilitazione popolare contro la centrale nucleare di Wyhl, che ha inaugurato nuove forme di governance partecipativa dal basso.

L'assetto urbanistico della città si fonda su principi di densificazione controllata, riduzione del consumo di suolo e integrazione funzionale. Quartieri come Vauban e Rieselfeld incarnano tale visione: il primo, sorto su una ex area militare, si configura come eco-quartiere a mobilità ridotta, caratterizzato da edifici ad alte prestazioni energetiche, sistemi di raccolta e riuso delle acque meteoriche, limitazione dell'uso delle automobili e una rete diffusa di trasporto pubblico e ciclabilità; il secondo integra edilizia sociale, mix funzionale tra residenza, servizi e spazi pubblici e attenzione alla connettività ecologica del tessuto urbano.

Entrambi i quartieri rispondono a criteri di compattezza urbana, verde permeabile e resilienza microclimatica, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale e a migliorare la qualità della vita. La mobilità cittadina si basa su una rete integrata di tram elettrici, trasporto pubblico efficiente e oltre 400 km di piste ciclabili, promuovendo un modello di 'mobilità sostenibile'.

La città ha poi investito su fotovoltaico diffuso, teleriscaldamento da biomassa e geotermia e strategie di economia circolare per la gestione dei rifiuti. Un elemento distintivo è la sinergia tra governance istituzionale e partecipazione civica, sostenuta da

strumenti quali referendum locali, assemblee di quartiere e cooperative energetiche e abitative, che favoriscono la gestione condivisa delle risorse e il rafforzamento del senso comunitario. A questo si aggiunge un ecosistema della conoscenza che comprende l'Università di Friburgo, il Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems e altri Centri di ricerca applicata che promuovono il trasferimento tecnologico e la sperimentazione urbana.

L'esperienza di Friburgo dimostra come l'integrazione di innovazione tecnologica, progettazione ecologica e responsabilizzazione comunitaria possa generare un sistema urbano a basse emissioni, caratterizzato da elevata qualità della vita e forte coesione sociale. La città è oggi un laboratorio avanzato di transizione ecologica, con modelli scalabili e replicabili che forniscono strumenti concreti per affrontare la crisi climatica, le pressioni antropiche e le disuguaglianze urbane (Mössner, 2015).

L'esperienza di Friburgo si distingue per la capacità di tradurre principi di sostenibilità e partecipazione in un ecosistema urbano di innovazione sociale e tecnologica. I Quartieri Vauban e Rieselfeld dimostrano che la resilienza non è solo infrastrutturale ma anche culturale, frutto di processi di apprendimento collettivo e governance inclusiva. Più che come modello da imitare Friburgo va inteso come laboratorio evolutivo, in cui ricerca scientifica, amministrazione e cittadinanza co-producono soluzioni scalabili per la transizione ecologica e la giustizia climatica; il suo valore risiede dunque nella capacità di generare conoscenza e prassi condivise, orientando le città europee verso forme di abitare più consapevoli e solidali.

Italia: gestione integrata delle risorse e rigenerazione urbana multifunzionale | In Italia l'adozione di strategie integrate per la gestione sostenibile dell'acqua si manifesta attraverso una crescente convergenza tra progettazione architettonica, innovazione tecnologica e rigenerazione urbana e ambientale, sia in contesti metropolitani che rurali. I casi studio selezionati dimostrano come le pratiche sensibili all'acqua e di efficientamento energetico possano essere sinergicamente applicate per incremen-





tare la resilienza climatica, la fruibilità degli spazi pubblici e la qualità ecologica del costruito.

Il Bosco Verticale a Milano dello Studio Boeri (2014; Fig. 11) costituisce un esempio emblematico di infrastruttura verde verticale ad alta intensità vegetativa, che integra sistemi intelligenti di irrigazione automatizzata per il mantenimento della biodiversità arborea distribuita sui balconi. Tali sistemi con sensori climatici e idrici modulano l'apporto di acqua garantendo l'ottimizzazione dei consumi e contribuendo alla mitigazione del microclima urbano. L'intervento favorisce anche l'assorbimento di CO_2, la filtrazione degli inquinanti atmosferici, l'isolamento acustico e la schermatura passiva degli edifici, coniugando qualità architettonica e prestazioni ecosistemiche (Liu, 2023). Sempre a Milano, edifici certificati LEED e WELL, quali Gioia 22 (Shrivastava, Segura D'Angelo and Lai, 2021; Fig. 12) e Vetra Building (Zanzottera, 2022; Fig. 13), adottano sistemi avanzati di raccolta e riuso delle acque piovane e di falda, consentendo una riduzione del consumo idrico fino all'86% rispetto a edifici tradizionali; tali soluzioni sono integrate da tecnologie IoT per la regolazione dei flussi idrici in tempo reale. Il progetto Santa Chiara Open Lab (ANSA, 2017; Fig. 14), sviluppato nel contesto della riqualificazione del Parco Santa Chiara a Trento, integra gestione sostenibile delle acque meteoriche, valorizzazione del Patrimonio edilizio esistente e attivazione sociale come da 'Programma straordinario di intervento per la riqualificazione urbana e la sicurezza delle periferie delle città metropolitane e dei comuni capoluogo di Provincia' promosso dal DPCM 25 maggio 2016.[1]

Nel dettaglio il sistema di fitodepurazione cattura le acque piovane dalle coperture degli edifici circostanti in una vasca integrata nel paesaggio urbano, riutilizzandole per irrigazione e attività ricreative. In occasione di eventi meteorologici estremi il Parco funge da infrastruttura di ritenzione temporanea, contribuendo alla riduzione del carico sulle reti fognarie e alla mitigazione del rischio idraulico. L'intervento garantisce l'accessibilità universale e la continuità funzionale degli spazi pubblici, integrando elementi storici recuperati con nuove funzioni a

Previous page

Fig. 3 | Watergardens (2021) in Singapore (credit: Singapore Land Group, 2021).

Fig. 4 | Eden Project (2001) in Cornwall, UK (credit: Eden Project, 2001).







Fig. 5 | London Aquatics Centre (2012) in London, UK (credit: Zaha Hadid Architects, 2012).

Fig. 6 | Blur Building (2002), Yverdon-les-Bains, Switzerland (credit: Diller Scofidio + Renfro, 2002).

Fig. 7 | ICEHOTEL (2008) in Jukkasjärvi, Sweden (credit: ICEHOTEL, 2008).



Fig. 8 | Enghaveparken Climate Park (2021) in Copenhagen, Denmark, designed by City of Copenhagen (credit: State of Green, 2021).



Fig. 9 | Spoorweghaven District (2025) in Rotterdam, The Netherlands, designed by MAST (source: Domus, 2025).

carattere comunitario, tra cui un Urban Center, e spazi dedicati all'emancipazione dei giovani. Il progetto rappresenta un prototipo operativo replicabile, poiché combina soluzioni ingegneristiche, valenze ecologiche e finalità socioculturali in un modello adattabile ad altri contesti urbani.

In ambito rurale e periurbano, interventi di housing sociale sostenibile, come quelli di Montelabbate (PU) e San Nicola da Crissa (VV), incorporano sistemi di raccolta delle acque meteoriche, SuDS e impianti fotovoltaici condivisi (Castellini et alii, 2024), ottenendo una riduzione del fabbisogno idrico tra il 35% e il 40%, e un abbattimento stimato di circa 600 tonnellate annue di CO_2 (Turki et alii, 2023): soluzioni low-tech ad alto impatto in contesti a bassa densità insediativa.

Infine il caso di Venezia che, oltre al sistema MOSE (Faranda et alii, 2023), sta sperimentando architetture anfibie e dispositivi resilienti come gradonate urbane, bacini temporanei e modelli predittivi di marea, per una gestione dinamica del rischio idrico, salvaguardando la fruizione degli spazi pubblici e il Patrimonio del tessuto urbano storico (Umgiesser, 2020). L'acqua non è dunque solo risorsa da conservare, ma vettore di efficienza energetica, micro-climatizzazione, biodiversità e resilienza sociale, capace di aprire nuove prospettive per architetture resilienti e multifunzionali (Consiglia et alii, 2025).

L'analisi dei casi italiani rivela un panorama progettuale in evoluzione nel quale l'acqua diviene catalizzatore di innovazione architettonica, rigenerazione ambientale e coesione sociale. Le esperienze analizzate – dai grattacieli vegetali di Milano alle infrastrutture verdi di Trento fino ai dispositivi anfibi di Venezia – testimoniano la capacità di elaborare risposte multilivello alla crisi climatica, combinando soluzioni tecnologiche avanzate e strategie low-tech adattate alle specificità locali. Ne emerge un quadro di sperimentazione diffusa che supera la logica



Fig. 10 | Centro Direzionale e Commerciale, PlusEnergybauweise (2018), designed by Rolf Disch (source: GreenCluster.it, 2018).



Fig. 11 | Bosco Verticale (2014) in Milano, designed by Stefano Boeri Architetti (credit: Heritage Images/Getty Images).

del modello replicabile per configurarsi come sistema aperto di pratiche integrate, in cui il dialogo tra Patrimonio, innovazione e governance produce nuovi paradigmi di progetto. In questa prospettiva l'esperienza italiana non si limita a offrire buone pratiche, ma propone una grammatica operativa della resilienza, fondata sull'interazione tra scala architettonica e scala territoriale, tra gestione sostenibile delle risorse e qualità dello spazio abitato. Tale approccio, ancora in via di consolidamento, rappresenta un laboratorio strategico per la transizione ecologica delle città europee, in cui la cultura del progetto si afferma come strumento di mediazione tra sostenibilità ambientale, inclusione sociale e rigenerazione del patrimonio costruito.

Discussione, sintesi comparativa e analisi critica dei casi studio: punti di forza, limiti e barriere alla replicabilità | L'analisi comparativa dei casi extraeuropei, europei e italiani evidenzia matrici progettuali eterogenee accomunate da una visione dell'acqua come infrastruttura attiva nella resilienza urbana, qualità ambientale e inclusione sociale. Le differenze non sono solo geografiche, ma riflettono paradigmi di governance, capacità tecnologiche, cultura progettuale e strutture istituzionali. Emergono modelli di successo, limiti applicativi e nodi teorici da approfondire.

Nei casi extraeuropei – dal Solar Canal Project al West Village e Water Gardens – l'acqua è fortemente tecnologizzata, gestita tramite infrastrutture intelligenti, algoritmi e sistemi SCADA. La sostenibilità è funzionalizzata all'efficienza idrica, energetica e climatica, con utenti spesso passivi o mediati digitalmente; pur avanzati questi approcci producono spazi funzionali ma poco relazionali e dipendenti da governance locali robuste.

In Europa l'acqua è concepita in modo più relazionale e paesaggistico, integrata nel tessuto urbano per resilienza climatica, estetica e sociale. Casi come Enghaveparken e Benthemplein combinano infrastrutture blu-verdi, spazi sensoriali, educativi e partecipativi, memoria storica e co-design; tuttavia richiedono contesti istituzionali avanzati e pianificazione integrata senza i quali le infrastrutture rischiano di rimanere interventi isolati o estetici. In Italia l'approccio è interstiziale: l'acqua supporta rigenerazione urbana, riduzione dei rischi e attivazione sociale, bilanciando vincoli storici, carenze infrastrutturali e innovazioni incrementali. Esempi come il Bosco Verticale di Milano e il Santa Chiara Open Lab a Trento combinano micro-climatizzazione, biodiversità, fitodepurazione e gestione sostenibile delle acque. In aree periurbane e rurali soluzioni a bassa tecnologia mostrano alta efficienza sistemica, tuttavia discontinuità normativa, frammentazione degli attori e scarsa pianificazione intersettoriale limitano scalabilità e replicabilità.

Dal confronto emergono convergenze strategiche che definiscono un paradigma comune per la gestione idrica urbana integrata, sintetizzato nella Tabella 1; accanto a queste convergenze si rilevano le divergenze strutturali sintetizzate nella Tabella 2. La lettura comparativa mostra che non esiste un modello unico: le soluzioni devono adattarsi al contesto locale, bilanciando capacità istituzionali, dati e tecnologie, cultura partecipativa, densità urbana e vulnerabilità climatica. In questo quadro l'acqua diventa matrice progettuale trasversale, capace di generare engagement civico, miglioramenti ambientali, efficienze infrastrutturali e nuove narrazioni architettoniche.

L'analisi comparativa dei casi studio fornisce elementi fondamentali per la definizione di protocolli operativi replicabili, capaci di tradurre buone pratiche e lezioni apprese in strumenti progettuali concreti. Le strategie individuate – tecnologiche, ambientali e sociali – vengono formalizzate in linee guida modulabili, adattabili a contesti urbani e rurali differenti, bilanciando vincoli territoriali, capacità istituzionali e cultura partecipativa. I protocolli integrano sistemi di gestione idrica, dispositivi energetici e spazi pubblici multifunzionali, includendo indicazioni tecniche (SuDS, fitodepurazione, sensori intelligenti), ecologiche (microclima, biodiversità) e sociali (educazione, partecipazione civica). La loro applicazione sia a nuovi interventi sia a retrofit urbani permette di trasformare l'acqua da semplice risorsa in vettore di resilienza, efficienza e inclusione sociale, fornendo strumenti concreti a progettisti, amministratori e decisori pubblici.

La proposta di un protocollo gestionale | Di fronte alle crescenti sfide ambientali e climatiche, l'architettura dell'acqua si configura come una nuova disciplina strategica per la progettazione sostenibile, in grado di integrare innovazione tecnologica, sostenibilità ambientale e inclusione sociale. Soluzioni tecniche quali la bio-fitodepurazione, la raccolta differenziata e il riuso delle acque meteoriche, unitamente a sistemi di infiltrazione finalizzati alla ricarica artificiale delle falde acquifere, rappresentano strumenti imprescindibili per rispondere efficacemente alle esigenze di resilienza e gestione sostenibile delle risorse idriche negli ambiti edilizi e urbani.

In particolare nel contesto italiano, caratterizzato da consumi idrici domestici medi superiori a 220 litri per abitante al giorno, diviene prioritario adottare strategie progettuali orientate alla significativa riduzione dei prelievi di acqua potabile, favorendo il riutilizzo delle acque grigie e meteoriche per usi non potabili quali irrigazione, scarichi sanitari e attività di lavaggio. Tali strategie si articolano su diverse scale di intervento: dalla singola unità abitativa, con sistemi di raccolta e accumulo delle acque piovane e sanitari a basso consumo, fino all'ambito urbano, dove si promuovono tetti e pareti verdi, piazze d'acqua e SuDS, nonché interventi territoriali di rinaturalizzazione dei corsi d'acqua e recupero delle zone umide.

A partire dall'analisi comparativa dei casi studio analizzati, si propone un protocollo modulare e scalabile per la gestione integrata dell'acqua, dell'energia e degli spazi sociali – descritto avvalendosi della Tabella 3 – concepito per la replicabilità e l'adattabilità in contesti urbani e rurali, per nuove costruzioni così come per processi di rigenerazione urbana.

La fase iniziale prevede la definizione rigorosa dei parametri di intervento tramite una mappatura dettagliata dei bacini idrici disponibili, dei flussi ener-







Fig. 12 | Gioia 22 (2021) in Milano, designed by Pelli Clarke Pelli Architects (credit: COIMA, 2021).

Fig. 13 | Vetra Building (2021) in Milano designed by Il Prisma (credit: AXA IM Alts / Il Prisma, 2021).

Fig. 14 | Santa Chiara Open Lab (2025) in Trento, designed by the University of Siena (credit: Municipality of Trento, 2025).

getici associati e della densità di utenza. La quantificazione precisa dei volumi e dei flussi delle acque meteoriche, grigie e nere, integrata dall'analisi della disponibilità e potenzialità di energia rinnovabile, costituisce la base quantitativa essenziale per la progettazione consapevole e il dimensionamento ottimale degli impianti tecnologici.[2]

Segue la classificazione funzionale degli edifici e degli spazi urbani, basata sulla valutazione integrata della vulnerabilità idrica, della domanda energetica e delle potenzialità di rigenerazione sostenibile. Edifici pubblici come scuole, strutture civiche e residenze plurifamiliari possono essere riconfigurati come nodi idrico-energetici multifunzionali, capaci di accumulare, trattare e redistribuire risorse idriche ed energetiche verso utenze interne o comunitarie, incrementando così l'efficienza e la condivisione delle risorse (González-Campaña, Lafaurie-Debany and Rabazo Martin, 2023). La valutazione delle sinergie tra infrastrutture tecniche e spazi pubblici diviene cruciale per favorire un'integrazione che valorizzi contemporaneamente gli aspetti ambientali e sociali (Marzot, 2019).

Il terzo asse del protocollo riguarda l'adozione e integrazione di tecnologie avanzate in sistemi modulari per la raccolta e lo stoccaggio delle acque dotati di sensori IoT per il monitoraggio in tempo reale, il riuso delle acque per usi non potabili quali servizi igienici, irrigazione e raffrescamento evaporativo, nonché l'implementazione di infrastrutture vegetate capaci di trattenerne fino al 60-70%. I sensori IoT devono essere integrati con dispositivi di accumulo energetico sinergici che ne massimizzano l'efficienza complessiva e la sostenibilità combinando soluzioni low-tech e high-tech per garantire una gestione olistica che ottimizza le prestazioni funzionali (Rossi, 2019). Una componente di pari rilievo è la governance e la partecipazione attiva della comunità; modelli innovativi quali le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) e i Positive Energy Districts (PED) sono in grado di distribuire responsabilità e benefici tra cittadini, Istituzioni pubbliche e associazioni civiche, generando coesione sociale, educazione ambientale e resilienza urbana. Il coinvolgimento diretto degli utenti nella gestione delle risorse idriche ed energetiche si traduce in una manutenzione più efficace degli impianti e in una diffusione più capillare di pratiche di sostenibilità (Cascone, Margani and Sapienza, 2020).

Il protocollo prevede poi un sistema di monitoraggio e manutenzione continuo basato su IoT e cruscotti digitali, per il controllo in tempo reale dei flussi, della produzione energetica e dell'efficienza degli impianti favorendo la replicabilità degli interventi, un adattamento dinamico alle variazioni climatiche e alle mutate esigenze delle comunità di riferimento (Patsidis et alii, 2023).

Il protocollo (Fig. 15) permette così di riconfigurare edifici esistenti in hub integrati acqua-energia, orientare la progettazione di nuovi edifici secondo un paradigma sistemico e resiliente e promuovere pratiche sostenibili su scala urbana e rurale; l'acqua diventa elemento progettuale attivo, capace di innescare trasformazioni spaziali, ecologiche e sociali, da semplice risorsa a vettore chiave per la costruzione di ambienti resilienti, multifunzionali e culturalmente significativi, adeguati a rispondere alle pressanti sfide poste dal cambiamento climatico e dall'urbanizzazione contemporanea.

Il protocollo proposto si distingue per l'approccio modulare e scalabile, che integra sinergicamente acqua, energia e spazi sociali, e per la capacità di tradurre principi complessi di resilienza urbana in linee guida operative concrete. L'originalità risiede nella combinazione di approcci low-tech e high-tech, nella valorizzazione del Patrimonio edilizio come hub multifunzionale e nella partecipazione attiva della comunità tramite modelli quali le CER e i PED. Le KPI individuate – quali percentuale di riuso delle acque, capacità di infiltrazione e ritenzione, efficienza energetica degli impianti e coinvolgimento comunitario – consentono una valutazione quantitativa e comparativa tra contesti differenti, rendendo il protocollo uno strumento replicabile e adattabile a scale diverse, dal singolo edificio all'intero ambito ur-

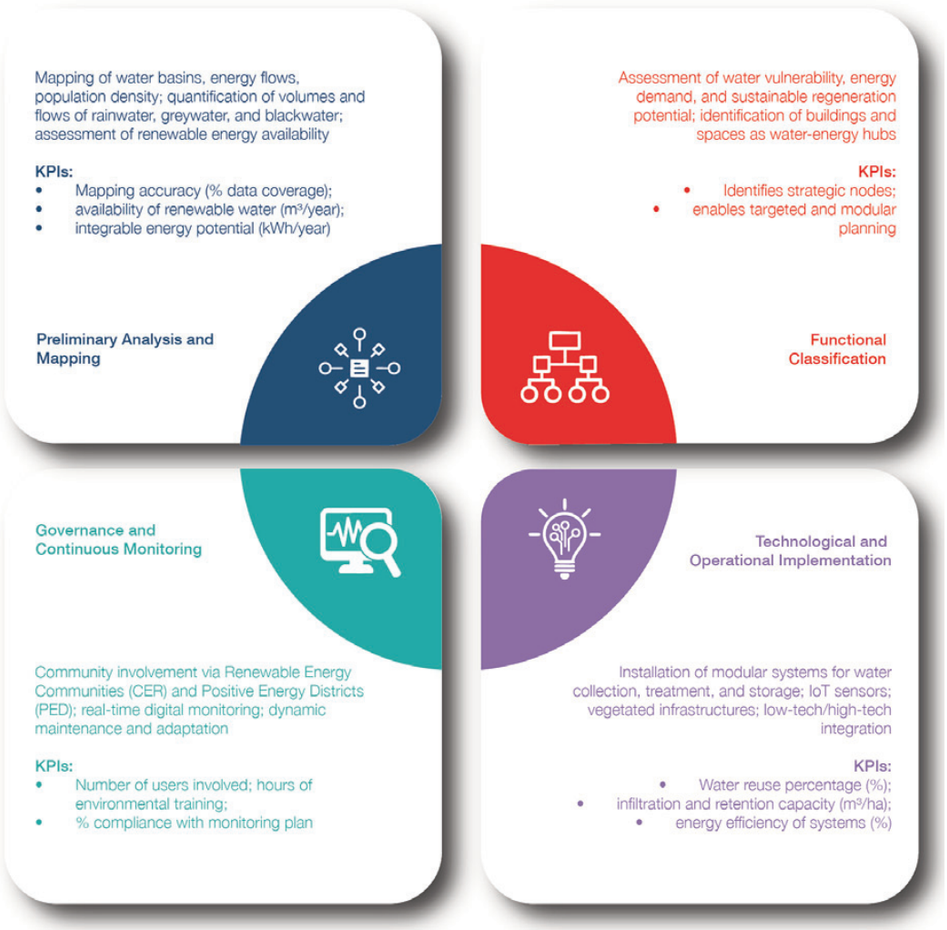


Fig. 15 | Ideogram illustrating the operational protocol for integrated water, energy, and social management, visually representing the phases, activities, and KPIs (credit: L. Lombardo, 2025).

bano o rurale. In tal senso il contributo dello studio supera la mera proposizione teorica, offrendo alla comunità scientifica un modello operativo innovativo, capace di supportare progettisti e decisori pubblici nella pianificazione di interventi sostenibili, resilienti e multifunzionali, con un impatto concreto su efficienza ambientale, coesione sociale e rigenerazione urbana.

Discussione e conclusioni | L'analisi dei casi studio e la sperimentazione dei protocolli operativi dimostrano che l'acqua non può più essere considerata una risorsa passiva, ma va concepita come vettore progettuale attivo, capace di generare sinergie multidimensionali tra architettura, pianificazione urbana e dinamiche sociali. La gestione integrata e partecipata dell'acqua si configura come uno strumento multifunzionale in grado di produrre benefici ambientali, energetici e socioculturali interconnessi, traducendosi in riduzione dei consumi, incremento dell'efficienza energetica, miglioramento del microclima urbano, valorizzazione della biodiversità e potenziamento della governance locale (Ofori and Mdee, 2021).

I casi studiati confermano che l'integrazione tra sistemi idrici ed energetici consente di progettare edifici e quartieri resilienti e adattivi, capaci di attenuare gli effetti degli eventi climatici estremi e ridurre le pressioni sul ciclo naturale dell'acqua e sulle emissioni di gas serra (Biswas, 2008). Strategie come raccolta e riuso delle acque, interventi sostenibili e sistemi di accumulo energetico integrati ottimizzano simultaneamente la gestione, riducendo la dipendenza dalle reti pubbliche e aumentando la sostenibilità complessiva degli edifici.

L'adozione di tecnologie intelligenti, sensori e piattaforme di monitoraggio permette una gestione predittiva e adattativa, basata su dati in tempo reale, riducendo gli sprechi, favorendo la manutenzione preventiva e garantendo replicabilità e scalabilità delle soluzioni in contesti diversi (Grigg, 2025). Dal punto di vista sociale l'acqua diventa catalizzatore di partecipazione civica e innovazione comunitaria, con edifici pubblici trasformati in hub integrati che promuovono comportamenti sostenibili, educazione ambientale e consapevolezza collettiva.

La Tabella 4 illustra l'applicazione del protocollo operativo ai casi studio di Enghaveparken (Copenaghen), Rotterdam e Bosco Verticale (Milano), evidenziando la capacità del modello di adattarsi a differenti scale, condizioni climatiche e strutture di governance. In Enghaveparken la fase analitica e la successiva implementazione dimostrano come la morfologia del Parco, basata su bacini ribassati e sistemi di drenaggio adattivi, trasformi un'infrastruttura idraulica in dispositivo sociale, capace di coniugare sicurezza urbana, ricreazione e didattica ambientale (Marzot, 2019).

Il caso di Rotterdam, attraverso la strategia della 'città spugna', mostra invece l'efficacia del protocollo su scala urbana: la combinazione di pavimentazioni permeabili, serbatoi temporanei e sistemi fotovoltaici rappresenta un paradigma di rigenerazione resiliente e di governance evoluta, fondata sulla partecipazione e sugli incentivi civici (González-Campaña, Lafaurie-Debany and Rabazo Martin, 2023). Infine il Bosco Verticale evidenzia la declinazione tecnologica e architettonica del protocollo, con l'adozione di sensori climatici, sistemi automatizzati di irrigazione e gestione integrata dei flussi idrici ed energetici, a dimostrazione di come la scala dell'edificio possa diventare un laboratorio di simbiosi tra natura e costruito (Rossi, 2019).

L'analisi comparativa dei tre casi rivela una progressione concettuale e operativa del protocollo: Copenaghen privilegia l'integrazione spaziale e sociale, Rotterdam la scalabilità e la resilienza sistemica, Milano la precisione tecnologica e la verticalizzazione delle funzioni. Tale confronto evidenzia la potenzialità del modello nel superare l'approccio lineare e monodimensionale alla gestione idrica, configurandosi come strumento progettuale dinamico, capace di mettere in relazione infrastrutture fisiche, componenti ecologiche e dimensioni culturali del progetto. La modularità e l'adattabilità del protocollo lo rendono efficace anche in contesti complessi, come centri storici e Beni culturali, integrando la gestione idrica con interventi di recupero sostenibile e valorizzazione territoriale, ampliando la replicabilità internazionale. Il protocollo operativo rappresenta un contributo innovativo alla letteratura scientifica e alla pratica professionale, offrendo un framework olistico e multidisciplinare che integra gestione idrica, energia, materiali, design e partecipazione sociale coerenti con gli SDG.

Rispetto ai protocolli già presenti nella letteratura scientifica e nelle piattaforme internazionali – come i Water Safety Plans (WHO, 2024), i Sustainable Urban Water Management Frameworks (Mitchell, 2006) e i modelli di Integrated Urban Water Management (Bahari, 2012) – quello proposto introduce un approccio evolutivo, orientato alla convergenza tra dimensione tecnologica, sociale e progettuale. A differenza dei modelli tradizionali, spesso settoriali o focalizzati sulla sicurezza idrica e sull'efficienza operativa, il nuovo schema integra parametri ambientali, energetici e culturali in un quadro coerente, scalabile e adattabile ai diversi contesti territoriali.

La principale innovazione risiede nella modularità operativa e nella multiscalarità applicativa che consentono di trasferire principi di gestione integrata dal livello urbano a quello architettonico e comunitario. L'acqua non è più considerata solo come risorsa tecnica da gestire, ma come infrastruttura attiva di progetto, capace di generare valore aggiunto in termini di inclusione sociale, efficienza ecologica e qualità dello spazio pubblico. In tal senso il protocollo agisce come strumento dinamico di progetto e governance, in grado di coordinare dati, tecnologie e

Convergent Aspects	Description
Water as an active device	No longer just a resource to manage, but a design, climatic, social, and identity element
Multi-system integration	Water is connected to energy, landscape, biodiversity, and public space use
Digitalisation and sensor technology	In all cases, to varying degrees, forms of smart monitoring and adaptive management emerge
Flexibility and multifunctionality of spaces	Water systems are designed to operate under both ordinary and critical conditions, with differentiated uses (recreational, ecological, and technical)

Tab. 1 | Comparison of the convergent aspects and description of the analysed projects (credit: the Authors, 2025).

Divergences	Extra-European Cases	European Cases	Italian Cases
Dominant paradigm	Technological-systemic	Socio-ecological-landscape	Regenerative-participatory
Level of automation	High	Medium-high	Medium-low
Role of the user / citizen	Marginal or mediated	Active and co-protagonist	Participatory and community-based
Governance	Centralized and technology-driven	Institutionally mature	Often fragmented or experimental
Critical risks	Tech-dependence, low relationality	High costs, complex maintenance	Political discontinuity, small scale

Tab. 2. | Structural divergences of the analysed projects (credit: the Authors, 2025).

Operational Phase	Activities	Key Performance Indicators (KPIs)	Originality / Notes
Preliminary Analysis and Mapping	Mapping of water basins, energy flows, and population density; quantification of volumes and flows of rainwater, greywater, and blackwater; assessment of renewable energy availability	Mapping accuracy (% data coverage); availability of renewable water (m^3/year); integrable energy potential (kWh/year)	Provides a quantitative baseline; allows comparative evaluations across contexts; integrates water, energy, and social data
Functional Classification	Assessment of water vulnerability, energy demand, and sustainable regeneration potential; identification of buildings and spaces as water-energy hubs	Water vulnerability index; % of public/residential buildings convertible into multifunctional hubs	Identifies strategic nodes; enables targeted and modular planning
Technological and Operational Implementation	Installation of modular systems for water collection, treatment, and storage; IoT sensors; vegetated infrastructures; low-tech / high-tech integration	Water reuse percentage (%); infiltration and retention capacity (m^3/ha); energy efficiency of systems (%)	Combines low-tech and high-tech approaches; ensures replicability across different contexts
Governance and Continuous Monitoring	Community involvement via Renewable Energy Communities (RECs) and Positive Energy Districts (PEDs); real-time digital monitoring; dynamic maintenance and adaptation	Number of users involved; hours of environmental training; % compliance with monitoring plan	Participatory governance as a structural component; supports social resilience and adaptability

Tab. 3 | The operational protocol for integrated water, energy, and social management, detailing phases, activities, KPIs, and notes on originality (credit: the Authors, 2025).

partecipazione civica all'interno di processi decisionali flessibili e iterativi (Grigg, 2025).

In prospettiva il modello proposto può essere letto come un'evoluzione dei framework più recenti di Water-Sensitive Urban Design e Nature-based Solutions, arricchiti da una componente di governance adattiva e da un impianto metodologico replicabile in contesti europei e mediterranei. Tale impostazione risponde alle esigenze di coerenza con gli obiettivi dell'Agenda 2030 (UN, 2015) e del Green Deal europeo (European Commission, 2019), offrendo uno strumento operativo per la transizione ecologica delle città e dei territori fragili.

Ripensare l'acqua come risorsa progettuale generativa e tecnologica è dunque una leva strategica per la rigenerazione sostenibile di edifici e spazi urbani. La gestione integrata e partecipativa non solo migliora le prestazioni ambientali e funzionali delle infrastrutture, ma favorisce la coesione sociale, stimola processi di innovazione collettiva e potenzia la resilienza delle comunità. Questo approccio apre prospettive di ricerca interdisciplinare in cui architettura, ingegneria, ecologia e governance collaborano per affrontare le sfide idriche e climatiche del XXI secolo, trasformando l'acqua in risorsa progettuale centrale, generativa di innovazione tecnologica, sociale e ambientale.

In recent decades, human activity has accelerated unprecedented climate and ecosystem changes, fostering the occurrence of extreme events such as heat waves, floods, droughts, and widespread fires (Barnett, 2006). This scenario, further aggravated by global population growth, threatens the vital balance of the biosphere, undermines the resilience of natural and social systems, and disproportionately affects the most vulnerable communities (IPCC, 2023). Meanwhile, the loss of biodiversity weakens ecosystem stability, while the homogenisation of socioeconomic systems – driven by the logic of efficiency and profit – reduces collective adaptability and resilience to environmental shocks (Javanroodi, Nik and Scartezzini, 2021).

In this context, water stands out as a strategic resource, deeply interconnected with natural cycles and crucial not only for climate adaptation but also for promoting environmental justice. The right to have access to water and its responsible use are now conceived not merely as conservation goals, but as design and technological levers capable of improving building performance, regulating urban microclimates (Valente et alii, 2024) and supporting integrated resilience strategies (Matthies and Menne, 2009). In recent years, the most advanced urban policies have emphasised integrated approaches in which energy, water, and green infrastructure converge into multifunctional spaces – such as schools, gardens, civic centres, and community hubs – acting as catalysts for both social and environmental regeneration (Blecic et alii, 2024).

However, contemporary responses to the climate emergency tend to focus primarily on decarbonisation (Ness, 2024) and renewable energies, often overlooking the impact of the material resources needed to build these infrastructures, which entail significant energy consumption and emissions (Olatunde et alii, 2024). A truly effective design approach requires a broader scientific and technical perspective, including a rational management of non-renewable resources and integrating actions within the framework of the UN SDGs, particularly Goals 6, 9, 11, and 13 (Hendawy, Junaid and Amin, 2024). Technology, energy, and time, intertwined throughout the Industrial Revolutions, have shaped modern societies, normalising the continuous availability of energy and services while shaping individual and collective behaviour.

Hyper connection and the constant demand for energy flows amplify pressures on natural resources, making it essential to rethink the relationship between architecture and water resources. Designing with water thus implies transcending linear and extractive logics and adopting systemic approaches that coordinate energy, water, and social cycles through integrated strategies for ecological and social resilience. Architectural design plays a pivotal role in translating principles derived from permaculture, low-tech

strategies, and speculative visions such as Solarpunk into concrete spatial practices (Crosby, 2023). As a true 'design tool', between environmental performance and architectural experimentation, the use of water acquires a dual function, both symbolic and functional, acting as a regulator of microclimates, a mediator of spatial experience, and an active component in sustainable energy systems (Brisotto et alii, 2023). Buildings are no longer static entities, but dynamic environmental systems, capable of interacting with climatic and social contexts; in this perspective, water emerges as a catalyst for environmental, technological, and cultural innovation.

Historically, water has fostered the dialogue between the built environment and the natural landscape, as shown by Frank Lloyd Wright's Fallingwater (1935-1937), structurally integrated with the watercourse, and Mies van der Rohe's Farnsworth House (1951), elevated to cope with seasonal flooding. Since the 1970s, its role has evolved from symbolic to performative, with solutions based on thermal storage and passive solar technologies (Peng et alii, 2023). Projects such as Diller Scofidio + Renfro's Blur Building (2002), Carlo Ratti and MIT's Digital Water Pavilion (Expo Zaragoza, 2008), and the IceHotel in Jukkasjärvi (1991) explore water as an experiential and interactive medium.

Technological research has developed advanced systems for thermal regulation and climatic adaptation (Sposito, 2017). Earlier examples include the Water Drum Walls from the 1940s, followed in the 1970s–1980s by the solutions of Steve Baer, John Hammond, and Marshall Hunt, applied in the residential and agricultural sectors, up to the translucent modular containers developed by the Kalwall Corporation and the Water Wall Engineering Group. More recently, systems such as Transparent Water Storage Envelopes (TWSE) and porous ceramic technologies have enabled advanced seasonal control of thermo-hygrometric comfort, achieving energy efficiency gains ranging from 25% to 88% (Xiangfeng and Tianxing, 2007). Nevertheless, challenges related to embodied energy, which is often neglected by certification protocols such as LEED, BREEAM, Passivhaus, and ActiveHouse (Vosoughkhosravi et alii, 2022).

Emerging strategies aim to adopt a systemic approach that integrates efficiency, multifunctionality, and adaptability (Butera, 2024). Water becomes an active and adaptive component, allowing climate-responsive, sustainable, and technologically innovative buildings that merge environmental quality, energy performance, and architectural experimentation.

In light of the foregoing, this paper aims to define design strategies and protocols for the integrated management of water resources in urban contexts and built heritage, with particular attention to sustainability, resilience, and replicability of solutions. The contribution is structured into three main sections: a theoretical-methodological framework outlining the theme, critical issues, and opportunities for intervention; a critical analysis of international and local case studies, highlighting their strengths, limits, selection criteria, and transferability; and a section proposing protocols, performance indicators (KPIs), and operational diagrams to support water-resilient design.

The originality of this study lies in its systemic analytical approach, which integrates advanced technologies, sustainable materials, resource management, and social impact, while the expected impact concerns the definition of replicable and measurable guidelines, capable of informing urban policies and innovative design practices. This paper also provides a critical reflection on the limitations, as well as on the cultural, economic, and regulatory barriers that hinder the dissemination of best practices, and on the potential transferability of results to other socio-environmental contexts, thus contributing to the scientific debate on Sustainable Development Goals 6, 9, 11, and 13 and to the possible synergies with other SDGs.

State of the art | The integrated management of urban water resources has become a priority challenge for environmental, social, and economic sustainability (Badarnah, 2016). The literature highlights the need to overcome traditional linear systems of drainage and storage, and to promote water-sensitive models oriented toward conservation, reuse, and resilience (Zacharias, Dimitriou, and Koussouris, 2003). In this framework, Water Sensitive Urban Design (WSUD) integrates rainwater management with multifunctional green spaces, thus improving urban well-being, climate resilience, and microclimatic regulation (Donofrio et alii, 2009).

The transformation from impermeable cities to 'sponge-cities' promotes natural infiltration, reduces hydraulic risk, and increases the availability of non-potable water through widespread systems of catchment, storage, and natural treatment. Key technologies include green roofs and façades, permeable flooring, and plant-based water treatment systems (Vacanti and Leonardi, 2024). Sustainable Drainage Systems (SuDS) and the combined SuDS / WSUD approach can be applied across multiple scales, from the building to the urban level, through techniques such as infiltration trenches, vegetated swales, bioretention, detention basins, artificial ponds, and plant-based water treatment systems (Ferrans et alii, 2022), whose choice depends on specific objectives such as hydraulic safety, water purification and reuse, biodiversity enhancement, or urban regeneration.

Environmental certification protocols promote low-water-consumption systems and smart sensors for digital flow management and energy efficiency. Recent studies emphasise the need to conceive buildings and public spaces as active and interactive systems, capable of regulating microclimates, storing energy, promoting biodiversity, and fostering sustainable community practices (Berizzi, Mazurkiewicz and Terlicher, 2025).

These hydro-ecological systems encourage the coevolution between nature and the built environment, contributing to urban resilience. However, management often remains fragmented and social, educational, and cultural dimensions are rarely integrated, highlighting the urgency of a systemic and multidisciplinary approach that integrates urban design, engineering, architecture, ecology, and civic participation. In this framework, water becomes a central design element, and innovation lies in the synergistic integration of water, energy, and social infrastructure to create replicable models of resilient, sustainable architecture.

Objectives, methodology and phases of the research | The research aims to define an integrated framework for the sustainable management of water resources within urban and architectural contexts, promoting the integration of water systems with energy devices and multifunctional public spaces, and establishing a replicable operational protocol to support designers, administrators, and local stakeholders. The study adopts a qualitative-analytical methodological approach, articulated in three phases, aimed at developing the proposed framework and enhancing the role of water as an active component in generating environmental, social, and technological performance (Rahman et alii, 2019).

The first phase consists of a critical analysis of the literature, including a systematic review of scientific, regulatory, and technical publications on urban water management systems (WSUD), energy communities, and blue-green infrastructure.

The literature review was conducted on peer-reviewed scientific databases (Scopus, Web of Science, ScienceDirect) covering the period 2010-2025, using keywords such as 'urban water management', 'WSUD', 'blue-green infrastructure', 'stormwater harvesting', and 'sustainable architecture'. Peer-reviewed studies containing experimental data, technical guidelines, replicable case studies, and institutional reports were selected, with preference given to publications focusing on integrated technologies for water flow control and energy efficiency. Particular attention has been devoted to integrated technologies enabling rainwater collection, treatment, and reuse, together with real-time monitoring tools for efficient water flow control.

The second phase consists of comparing case studies, which entails a critical analysis of national and international examples. This phase provides the theoretical foundation for the comparative analysis, as it constitutes a critical investigation capable of identifying best practices for integrating water infrastructure, energy systems, and resilient public spaces.

The comparison was carried out according to four main interpretative categories: (1) scale and context, which refer to the size of the interventions, the catchment area, and territorial characteristics; (2) functionality, defined as the configuration of integrated water management systems, energy efficiency, and ancillary services; (3) environmental impact, assessed in terms of emission reduction, water resilience, and microclimatic regulation; (4) social integration, referring to the degree of civic participation, educational inclusion, and activation of community practices.

The third phase of the study developed an elaboration / proposal for a replicable operational protocol, aimed at translating analytical results into concrete design tools by suggesting integrated strategies for the synergic management of water and energy, applicable to both new building projects and retrofitting interventions. The identified strategies aim not only to improve environmental, technological, and social performance but also to enhance the existing architectural heritage and promote climate resilience, social equity, and technological efficiency. The deductive methodological approach helps bridge the gap between theory and practice, viewing water not merely as a design device but as a vector of systemic innovation in architecture (Mecca, Gaballo and Todella, 2023).

This study is characterised by its integrated, systemic approach to water management in urban and architectural contexts, a topic that remains underexplored in the current literature, which tends to address technological, social, and environmental dimensions separately. The originality of the research stems from the combination of critical analysis of the literature, case study comparison, and the develop-

ment of operational protocols, which allow the identification of transferable best practices across different contexts. In line with this premise, the study aims to fill a significant gap in integrated water resource management, while offering a positive impact on the scientific and professional community, thereby stimulating further research on sustainable and innovative strategies to enhance water as an active element that fosters resilience and social cohesion.

Case studies | To understand the application of integrated water management principles, the case studies were organised into three macro-categories – non-European, European, and Italian – to highlight differences in scale, technological approaches, and strategies for integrating energy systems and public spaces.

Starting with non-European cases, in the United States, the West Village Campus of the University of California Davis (Fig. 1) represents a model example of a 'net zero energy' community, where photovoltaic systems, energy storage, and anaerobic digestion of waste are integrated with the collection and reuse of greywater and rainwater. The total water storage capacity of 1.2 million litres is used for irrigation and common services. Sensors and smart monitoring systems optimise water flows and energy management in real time, reducing water consumption by 50% compared to similarly equipped buildings. Digital management also coordinates the energy supply from photovoltaic panels and anaerobic digestion systems: water is conceived as a driver of energy efficiency and sustainability (Maziotis, Sala-Garrido and Molinos-Senante, 2024).

In India, the Solar Canal Project (Fig. 2) integrates water resources and energy production: the water in the canals serves as a cooling medium for floating photovoltaic panels, increasing their efficiency, reducing evaporation, and optimising water use for agricultural purposes (Sananse et alii, 2023). In Singapore, the Water Gardens (Fig. 3), designed by Peter Walker & Partners, demonstrate the integration of water basins in high-density urban contexts, which combine rainwater storage, natural cooling, and urban microclimate regulation, while generating resilient and multifunctional public spaces that support recreational and social activities (Yap and Koh, 2010).

In North America and Japan, numerous residential buildings use basins and canals as natural 'heat reservoirs', exploiting water's thermal capacity to store heat during the day and release it at night, thereby improving the energy efficiency of heating and cooling systems (Kepekci and Asma, 2020). Integrated water management plays a strategic role not only for water sustainability but also for energy optimisation and the enhancement of indoor and outdoor microclimatic conditions in buildings (Corradi et alii, 2024).

It should be noted that in Europe, integrating blue-green infrastructure into urban design is a well-established practice for sustainable water management and resilience to climate change. In the Netherlands, the Waterplein Benthemplein in Rotterdam demonstrates how urban squares can serve as temporary basins during intense rainfall events, thanks to permeable paving, multifunctional green areas, and water-level monitoring sensors, enabling controlled drainage and reducing flood risk (Prestamburgo et alii, 2021).

In Copenhagen, the Cloudburst Management Plan adopts an advanced digital approach to rainwater management, integrating temporary basins, urban parks, and sustainable drainage systems designed for rainfall events up to 100 mm/h. Rainfall sensors, SCADA systems, and predictive modelling enable real-time control of water flows, while permeable surfaces and underground basins ensure gradual water storage and release.

Other examples include the Eden Project in Cornwall (Fig. 4) and the Aquatic Centre in London (Fig. 5), where water acts as a regulator of indoor microclimate, natural lighting and plant irrigation. In Switzerland, the Blur Building (Fig. 6) employs digitally controlled water jets to generate fog for sensory experiences and thermodynamic analysis. At the same time, the Ice Hotel in Sweden (Fig. 7) exemplifies the temporary use of ice as a building material, promoting both sustainability and architectural innovation (Ciccarese and Fino, 2004).

The European cases of Copenhagen, Rotterdam, and Freiburg were selected as examples of European excellence in integrated water management, representing technological, environmental, and social solutions that are replicable in other urban contexts. The analysis of these projects allows the identification of limits, barriers, and transferability opportunities, providing an original contribution to the scientific community and operational guidelines for designers and public decision-makers. Similarly, the Italian case studies presented hereafter were chosen for their relevance, replicability, and ability to integrate water infrastructure with energy, public spaces, and urban services, both in metropolitan contexts and in rural and peri-urban areas. Some emblematic European and Italian examples are presented in greater detail for their resilience, regulation of the urban microclimate, smart communities, and urban environmental regeneration.

Enghaveparken: multifunctional green infrastructure and resilient urbanism | The Enghaveparken project (Fig. 8), included in the city of Copenhagen's Cloudburst Management Plan, is an emblematic case of integration among water infrastructure, landscape quality, and civic participation. Built initially over ninety years ago in the historic district of Vesterbro, the park has recently been redeveloped: with a rainwater storage capacity of 22,600 cubic metres, it now functions as a resilient green infrastructure that combines hydraulic safety, microclimatic mitigation, and urban-scale ecosystem services (Avramidou and Manika, 2021).

The design strategy is based on lowered basins, underground reservoirs, and adaptive topographical morphologies. Areas such as the Water Garden and the Rose Garden have been shaped to collect and retain excess water during heavy rainfall events, while dykes, mini-embankments, and a 2,000 m^3 underground reservoir regulate its flows and temporarily store water. This water is then reused for irrigation and street cleaning, reducing groundwater extraction. The system ensures the continuity of vegetation growth and recreational activities during both droughts and periods of intense rainfall.

Beyond its technical role, this redevelopment has preserved and enhanced the park's historical features, including its tree-lined avenues and original pavilions, while enriching the urban arboreal heritage with 83 newly planted trees, benefiting biodiversity and microclimate regulation. At the same time, the project has integrated sensory and educational features that transform water into an element of environmental awareness and climate education, through interactive fountains, open-air canals, and play areas.

Enghaveparken is a model of resilient urbanism, capable of transforming water risk management into an opportunity for urban regeneration. Its redevelopment demonstrates how the synergy among hydraulic engineering, landscape design, and social inclusion can yield integrated benefits, reducing climate vulnerability, improving quality of life, and strengthening the cultural and environmental value of urban spaces. Water thus becomes an active medium for a sustainable, adaptive, and aware city.

The Enghaveparken case analysis confirms the effectiveness of an integrated approach to urban water management, in which hydraulic engineering, landscape, and civic participation converge into an adaptive and multifunctional system. The adopted solutions, based on flexible topographic morphologies and sensory devices, make significant contributions to the scientific debate on nature-based solutions for urban resilience. Rather than a replicable model, Enghaveparken represents a transferable design methodology capable of guiding urban planning towards dynamic adaptation strategies, grounded in the connection between ecological infrastructure, historical memory, and the social use of space.

Rotterdam, the 'sponge city' | The overall strategy of Rotterdam (Fig. 9), known as the 'sponge city', integrates green roofs, façades, and floating districts to store and reuse rainwater, regulates urban microclimates, and supports biodiversity (Dolman and Verlinde, 2024). Located below sea level and surrounded by rivers, the Dutch city is one of the most advanced examples of urban adaptation to climate change, with a proactive approach to water management that transforms every urban surface into a device that absorbs, retains, and reuses stormwater. Streets, squares, and sidewalks are designed as temporary water basins, while storage and recovery systems enable reuse for irrigation, non-potable uses, and microclimate regulation.

Among the most innovative interventions are the floating districts, currently under development, conceived not only as centres for social and cultural activities, but also as prototypes of resilient architecture, as they can adapt to fluctuating water levels without compromising urban functionality. The urban transformation has involved the use of waterproof materials and innovative paving, but above all, the implementation of citizen-engagement policies that encourage rainwater collection and sustainable practices through tax incentives and awareness campaigns.

Since 2008, more than 140,000 square metres of green roofs have been installed, with the goal of reaching 200,000 square metres by 2030, demonstrating the plan's ability to combine individual and community actions. Adaptive water management has also become an economic and technological resource: the expertise developed in Rotterdam in the design of anti-flooding systems is now sought after in numerous international contexts, from U.S. cities such as New Orleans to several countries in Africa, Southeast Asia, and Latin America. The Dutch experience shows how water management can simultaneously serve as a tool for prevention, environmental sustainability, and economic development, configuring the city as a global model of resilient urbanism.

The case of Rotterdam demonstrates how integrated water management can function not only as a technical model of resilience, but also as a strate-

gy of urban governance. The initiatives implemented – from floating district to green roofs – reflect a holistic approach that combines innovation, participation, and economic competitiveness, redefining the connection between the city and its water in terms of production and identity. The Dutch experience, rather than providing a unique model, offers a theoretical framework for adaptive planning in flood-risk areas, outlining a possible transition pathway for European cities towards climate-aware scenarios.

Freiburg | The city of Freiburg im Breisgau (Fig. 10), often referred to as the 'ecological capital' of Germany, represents a paradigmatic example of a smart and sustainable urban system where environmental sustainability, technological innovation, and civic engagement are intertwined into a resilient and replicable urban system. With around 230,000 inhabitants, it has pursued sustainable urban development strategies since the 1970s. This originated in the grassroots mobilisation against the Wyhl nuclear power plant, which gave rise to new forms of grassroots participatory governance.

The city's urban morphology is based on principles of controlled densification, land-use reduction, and functional integration. Districts such as Vauban and Rieselfeld embody this vision: the former, built on an ex-military site, is an eco-district with limited vehicle use, characterised by high energy-performance buildings, stormwater harvesting and reuse systems, restrictions on the use of cars, and a comprehensive public transport and cycling infrastructure; the latter integrates social housing, a functional mix of houses, public spaces and services, and the focus on the ecological connectivity of the urban fabric.

Both districts adhere to the principles of urban compactness, permeable green infrastructure, and microclimatic resilience, contributing to mitigating environmental impacts and enhancing urban quality of life. Urban mobility is based on an integrated network of electric trams, efficient public transport, and over 400 km of cycling infrastructure, promoting a model of 'sustainable mobility'.

The city has also strategically invested in widespread photovoltaic systems, biomass and geothermal district heating, and circular economy strategies for waste management. A distinctive feature of Freiburg's model is the synergistic interaction between institutional governance and civic participation, supported by tools such as local referenda, district assemblies, and energy and housing cooperatives, which foster shared resource management and strengthen community bonds. In addition, there is a knowledge ecosystem that includes the University of Freiburg, the Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, and other centres for applied research that promote technology transfer and urban experimentation.

The experience of Freiburg demonstrates how integrating technological innovation, ecological de-

Case Study	Preliminary Analysis	Functional Classification	Technological and Operational Implementation	Governance and Continuous Monitoring
West Village, UC Davis (USA)	Total water storage capacity 1.2 million litres; greywater and rainwater collection and reuse; integration with photovoltaic panels and anaerobic digestion	Net-zero energy community with multifunctional hubs for irrigation, common services, and energy management	Intelligent monitoring systems for water flows; reuse for irrigation and services; digital coordination with photovoltaic panels and anaerobic digestion	Centralised digital management; users mediated by smart systems; 50% reduction in water consumption compared to similar buildings
Solar Canal Project (India)	Analysis of irrigation canals and water availability	Canals as multifunctional systems for irrigation, microclimate, and PV panel cooling	Floating photovoltaic panels integrated with water flows; reduced evaporation; natural cooling	Coordination of water and energy management at an agricultural scale; optimised territorial use
Water Gardens (Singapore)	Urban water basins and microclimate assessment	Public spaces as multifunctional hubs for urban resilience and recreational activities	Rainwater storage, natural cooling, urban microclimate regulation	Integrated management in high-density urban areas; social and recreational support
Enghaveparken, Copenhagen (Denmark)	Storage capacity 22,600 m³; lowered basins and underground tanks	Park as hub for urban microclimate, ecosystem services, and environmental education	Lowered basins, underground tanks, interactive fountains and open channels, adaptive topographies	Environmental education and civic awareness; community engagement; participatory maintenance
Benthemplein, Rotterdam (The Netherlands)	Urban squares as temporary basins; critical impermeable surfaces	Neighbourhoods and public spaces as multifunctional hubs for water management and microclimate	Permeable pavements, temporary basins, integration with photovoltaics	Citizen awareness campaigns, fiscal incentives, and active participation
Freiburg (Germany)	Vauban and Rieselfeld districts; controlled densification; land use reduction	Urban hubs integrated for water, energy, sustainable mobility, and public spaces	Stormwater collection and reuse; high-performance buildings; distributed PV, biomass district heating, and geothermal energy	Participatory governance: referenda, energy and housing cooperatives, civic education
Bosco Verticale, Milan (Italy)	Vegetated surfaces and water availability for microclimate and irrigation	Buildings as multifunctional hubs for biodiversity and urban microclimate	Automated irrigation, climate and water sensors	Integrated condominium management; environmental education
Gioia 22 & Vetra Building, Milan (Italy)	Rainwater and groundwater collection; water consumption assessment	Buildings as multifunctional hubs for water, energy, and biodiversity	IoT technologies for real-time flow regulation; up to 86% water consumption reduction	Integrated management and resident participation; user awareness
Santa Chiara Open Lab, Trento (Italy)	Stormwater collection, reuse, and phytodepuration	Park as a multifunctional hub and social infrastructure	Integrated landscape tank, phytodepuration, irrigation, and recreational use	Community engagement, youth empowerment; public and participatory management
Montelabbate & San Nicola da Crissa (Italy)	Stormwater harvesting and shared photovoltaic availability	Sustainable social housing; rural multifunctional hubs	SuDS, shared photovoltaic systems; 35-40% reduction in water demand	Shared and participatory management; low-tech high-impact solutions
Venice (Italy)	MOSE and amphibious architecture; temporary basins	Resilient public spaces and multifunctional urban hubs	Predictive tide models, temporary basins, urban terraces	Adaptive water risk management, heritage protection; institutional participation

Tab. 4 | Application of the integrated water management protocol to selected case (credit: the Authors, 2025).

sign, and community empowerment can create a low-emission urban system characterised by high livability and robust social cohesion. The city is today an advanced laboratory of ecological transition, providing scalable and replicable models that offer practical solutions to the climate crisis, anthropogenic pressures, and urban inequalities (Mössner, 2015).

The significance of Freiburg's experience lies in its ability to translate principles of sustainability and participation into an urban ecosystem of social and technological innovation. The Vauban and Rieselfeld districts demonstrate that resilience is both cultural and infrastructural, as it is the outcome of collective learning processes and inclusive governance. Rather than a reference model, Freiburg should be regarded as an evolutionary laboratory, where scientific research, administration, and citizens co-produce scalable solutions for ecological transition and climate justice. Its value, therefore, lies in its ability to generate knowledge and shared practices, guiding European cities towards more aware and community-oriented ways of living.

Italy: integrated resource management and multifunctional urban regeneration | In Italy, integrated approaches to sustainable water management are increasingly emerging through a growing convergence among architectural design, technological innovation, and processes of urban and environmental regeneration, in both metropolitan and rural contexts. The selected case studies illustrate how water-sensitive design principles and energy-efficient strategies can be synergistically applied to enhance climate resilience, public space usability, and the ecological quality of buildings.

The Bosco Verticale in Milan, designed by Stefano Boeri Architetti (2014; Fig. 11), is an emblematic example of high-density vertical green infrastructure. The project integrates automated smart irrigation systems that preserve the arboreal biodiversity distributed across the façades. Equipped with climate and water sensors, these systems modulate water supply, optimising consumption and mitigating the urban microclimate. The project also promotes CO_2 absorption, air pollutant filtration, acoustic insulation, and the passive thermal shielding of buildings, effectively combining architectural quality with ecosystem performance (Liu, 2023).

Also in Milan, LEED- and WELL-certified buildings, such as Gioia 22 (Shrivastava, Segura D'Angelo and Lai, 2021; Fig. 12) and the Vetra Building (Zanzottera, 2022; Fig. 13), employ advanced systems for the collection and reuse of both rainwater and groundwater, achieving up to an 86% reduction in water consumption compared to traditional buildings. These solutions are enhanced by IoT-based technologies that enable the real-time regulation of water flows. The Santa Chiara Open Lab project (ANSA, 2017; Fig. 14), developed as part of the urban regeneration of urban regeneration initiative of Parco Santa Chiara in Trento, integrates sustainable stormwater management, the enhancement of the existing building heritage, and social activation within the framework of the 'Extraordinary programme for urban regeneration and security in metropolitan cities and provincial capitals' (Italian DPCM, 25 May 2016).[1]

In detail, the constructed wetland system collects rainwater from the roofs of adjacent buildings within a landscape-integrated basin, enabling its reuse for irrigation and recreational purposes. During extreme weather events, the park functions as a temporary water retention infrastructure, thereby alleviating pressure on the sewage network and mitigating flood risks. The design ensures universal accessibility and functional continuity of public spaces, integrating restored historical features with new community-oriented facilities, including an urban centre and spaces dedicated to youth empowerment. It constitutes a replicable operational prototype, as it effectively combines engineering solutions, ecological principles, and socio-cultural objectives within a model adaptable to diverse urban contexts.

In rural and peri-urban contexts, sustainable social housing initiatives – such as those implemented in Montelabbate (PU) and San Nicola da Crissa (VV) – integrate stormwater harvesting systems, Sustainable Drainage Systems (SuDS), and shared photovoltaic installations (Castellini et alii, 2024). These interventions achieve a 35-40% reduction in water demand and an estimated annual decrease of approximately 600 tonnes of CO_2 emissions (Turki et alii, 2023), exemplifying high-impact yet low-tech solutions suitable for low-density settlements.

Finally, the case of Venice – which, beyond the well-known MOSE system (Faranda et alii, 2023), is experimenting with amphibious architectures and resilient urban devices such as floodable steps, temporary basins, and tide-prediction models for dynamic flood-risk management – aims to safeguard both public accessibility and the cultural heritage of the historic urban fabric (Umgiesser, 2020). Water thus emerges not only as a resource to be preserved, but also as a driver of energy efficiency, microclimatic regulation, biodiversity, and social resilience, capable of opening new perspectives for resilient and multifunctional architectural design (Consiglia et alii, 2025).

The analysis of the Italian case studies reveals an evolving design landscape in which water functions as a catalyst for architectural innovation, environmental regeneration, and social cohesion. The experiences examined – from the green skyscrapers of Milan to the green infrastructures of Trento and the amphibious systems of Venice – demonstrate the country's capacity to develop multilevel responses to the climate crisis, combining advanced technological solutions with low-tech strategies tailored to local specificities.

What emerges is a diffuse framework of experimentation that transcends the notion of a replicable model, giving rise to an open system of integrated practices where heritage, innovation, and governance intersect to generate new design paradigms. From this perspective, the Italian experience not only offers exemplary practices but also outlines an operational grammar of resilience, rooted in the interaction between architectural and territorial scales and in the integration of sustainable resource management with the quality of inhabited space. This approach – still in the process of consolidation – serves as a strategic laboratory for the ecological transition of European cities, in which design culture acts as a mediating tool between environmental sustainability, social inclusion, and the regeneration of built heritage.

Discussion, comparative synthesis, and critical analysis of case studies: strengths, limits, and barriers to replicability | The comparative examination of non-European, European, and Italian case studies reveals heterogeneous design frameworks that share a common vision of water as an active infrastructure for urban resilience, environmental quality, and social inclusion. The observed differences extend beyond geographical dimensions, reflecting divergent governance paradigms, technological capacities, design cultures, and institutional structures. From this analysis, successful models, implementation limits, and theoretical issues requiring further investigation emerge.

In the non-European case studies – from the Solar Canal Project to the West Village and the Water Gardens – water is highly technologised and managed through smart infrastructure, algorithmic control systems, and SCADA platforms. Sustainability is primarily framed in terms of water, energy, and climate efficiency, while users tend to play a passive or digitally mediated role. Although technologically advanced, such approaches risk generating functionally efficient yet socially disconnected environments and remain highly dependent on robust local governance frameworks.

In Europe, water is conceived through a relational and landscape-oriented perspective, integrated into the urban fabric to enhance climatic, aesthetic, and social resilience. Case studies such as Enghaveparken and Benthemplein combine blue-green infrastructures with sensory, educational, and participatory spaces, as well as elements of historical memory and co-design. However, these models require mature institutional frameworks and integrated planning approaches; in their absence, such infrastructures risk remaining isolated prototypes or merely aesthetic interventions. In Italy, the approach can be described as interstitial: water supports urban regeneration, risk reduction, and social activation, while mediating between heritage constraints, infrastructural deficiencies, and incremental innovation processes.

Examples like the Bosco Verticale in Milan and the Santa Chiara Open Lab in Trento combine microclimatisation, biodiversity, constructed wetland system, and sustainable water management. In peri-urban and rural areas, low-tech solutions show high systemic efficiency; nonetheless, regulatory discontinuities, actor fragmentation, and weak intersectoral planning limit scalability and replicability.

The comparison highlights strategic convergences that define a common paradigm for integrated urban water management, summarised in Table 1; alongside these convergences, structural divergences are reported in Table 2. The comparative reading indicates that there is no single model: solutions must be adapted to local contexts, balancing institutional abilities, data and technologies, participatory culture, urban density, and climate vulnerability. Within this framework, water becomes a transversal design matrix capable of generating civic engagement, environmental improvements, infrastructural efficiencies, and new architectural narratives.

The comparative analysis of case studies provides essential elements for defining replicable operational protocols that translate good practices and lessons learned into concrete design tools. The identified technological, environmental, and social strategies are formalised into modular guidelines adaptable across urban and rural contexts, balancing territorial constraints, institutional capacities, and participatory culture. The protocols integrate water management systems, energy devices, and multifunctional public spaces, including technical (SuDS, constructed wetland system, smart sensors), ecological (microclimate, biodiversity), and social (education,

civic participation) indications. Their application to both new projects and urban retrofitting enables transforming water from a mere resource into a vector of resilience, efficiency, and social inclusion, thereby providing concrete tools for designers, administrators, and public decision-makers.

The proposal of a management protocol | In response to increasing environmental and climate challenges, water architecture is emerging as a new strategic discipline for sustainable design, capable of integrating technological innovation, environmental sustainability, and social inclusion. Technical solutions such as bio-constructed wetland systems, separate collection, and reuse of stormwater, along with infiltration systems for managed aquifer recharge, are essential tools to effectively respond to the needs of resilience and sustainable water management in both building and urban contexts.

In the Italian context, where average residential water consumption exceeds 220 litres per person per day, it is a priority to adopt design strategies that substantially reduce potable water withdrawals, encouraging the reuse of greywater and stormwater for non-potable uses such as irrigation, sanitary wastewater, and cleaning activities. These strategies operate at different levels: from individual housing units equipped with rainwater collection and low-consumption sanitary systems to the urban scale, where green roofs and walls, water squares, and SuDS are promoted, as well as territorial interventions for the renaturation of waterways and the recovery of wetlands.

Based on the comparative analysis of the examined case studies, a modular and scalable protocol is proposed for the integrated management of water, energy, and social spaces – illustrated in Table 3 – designed for replicability and adaptability in both urban and rural contexts, applicable to new constructions as well as urban regeneration processes.

The initial phase involves the strict definition of intervention parameters through detailed mapping of available water basins, associated energy flows, and user density. The precise quantification of stormwater, greywater, and blackwater volumes and flows, combined with the analysis of renewable energy availability and potential, represents the essential quantitative basis for conscious design and optimal sizing of technological systems.[2]

The functional classification of buildings and urban spaces follows, based on an integrated assessment of water vulnerability, energy demand, and sustainable regeneration potential. Public buildings, such as schools, civic facilities, and multifamily residences, can be reconfigured as multifunctional water-energy nodes capable of collecting, treating, and redistributing water and energy resources to internal or community users, thereby enhancing efficiency and resource sharing (González-Campaña, Lafaurie-Debany and Rabazo Martin, 2023). Evaluating the synergies between technical infrastructure and public spaces is crucial to fostering integration, thereby enhancing environmental and social aspects (Marzot, 2019).

The third axis of the protocol concerns the adoption and integration of advanced technologies in modular systems for water collection and storage, equipped with IoT sensors for real-time monitoring, the reuse of water for non-potable purposes such as toilet facilities, irrigation, and evaporative cooling, as well as the implementation of green infrastructures capable of retaining up to 60-70% of it. IoT sensors must be integrated with synergistic energy storage systems that maximise their overall efficiency and sustainability by combining low-tech and high-tech solutions to ensure holistic management and optimise functional performance (Rossi, 2019).

An equally crucial component concerns governance and community participation. Innovative models, such as Renewable Energy Communities (RECs) and Positive Energy Districts (PEDs), enable the distribution of responsibilities and benefits among citizens, public institutions, and civic associations, thereby fostering social cohesion, environmental education, and urban resilience. The direct involvement of users in the management of water and energy resources results in more effective plant maintenance and the widespread diffusion of sustainable practices (Cascone, Margani and Sapienza, 2020).

The protocol also provides for a continuous monitoring and maintenance system based on IoT and digital dashboards for real-time control of flows, energy production, and plant efficiency, thereby fostering the replicability of interventions and the dynamic adaptation to climate variations and to the evolving needs of local communities (Patsidis et alii, 2023).

The protocol (Fig. 15) thus allows to reconfigure existing buildings into integrated water-energy hubs, to guide the design of new buildings according to a systemic and resilient paradigm, and to promote sustainable practices on an urban and rural scale; water becomes an active design element, capable of triggering spatial, ecological, and social transformations, from a simple resource to a key vector for the creation of resilient, multifunctional, and culturally significant environments, responsive to the pressing challenges of climate change and contemporary urbanisation.

The proposed protocol stands out for its modular and scalable approach, which synergistically integrates water, energy, and social spaces, and for its ability to translate complex principles of urban resilience into concrete operational guidelines. Its originality lies in the combination of low-tech and high-tech approaches, in the enhancement of the existing building heritage as a multifunctional hub, and in the active participation of communities through models such as RECs and PEDs. The KPIs, such as water reuse percentage, infiltration and retention capacity, plant energy efficiency, and community engagement, enable quantitative and comparative evaluation across different contexts, making the protocol a replicable and adaptable tool at different scales from the individual building to the entire urban or rural district.

In this sense, the contribution of the study goes beyond the mere theoretical proposition, offering the scientific community an innovative operating model, capable of supporting designers and public decision-makers in planning sustainable, resilient, and multifunctional interventions with a concrete impact on environmental efficiency, social cohesiveness, and urban regeneration.

Discussion and conclusions | The analysis of the case studies and the testing of operational protocols demonstrate that water can no longer be considered a passive resource but rather an active design vector capable of generating multidimensional synergies among architecture, urban planning, and social dynamics. Integrated and participatory water management is a multifunctional tool that produces interconnected environmental, energy, and socio-cultural benefits, resulting in reduced consumption, increased energy efficiency, improved urban microclimate, enhanced biodiversity, and strengthened local governance (Ofori and Mdee, 2021).

The examined study cases confirm that the integration of water and energy systems enables the design of resilient and adaptive buildings and districts, capable of mitigating the effects of extreme climate events and reducing pressure on the natural water cycle and greenhouse gas emissions (Biswas, 2008). Strategies such as water collection and reuse, green interventions, and integrated energy-storage systems simultaneously optimise resource management, reduce dependence on public networks, and improve the overall sustainability of buildings. The adoption of smart technologies, sensors, and monitoring platforms enables predictive and adaptive management, based on real-time data, reducing waste, promoting preventive maintenance, and ensuring replicability and scalability of solutions across different contexts (Grigg, 2025). From a social perspective, water becomes a catalyst for civic participation and community innovation, with public buildings transformed into integrated hubs that promote sustainable behaviours, environmental education, and collective awareness.

Table 4 illustrates the application of the operational protocol to the case studies of Enghaveparken (Copenhagen), Rotterdam, and Bosco Verticale (Milan), highlighting the model's ability to adapt to different scales, climate conditions, and governance structures. In Enghaveparken, the analytical phase and the subsequent implementation demonstrate how the park's morphology, based on lowered basins and adaptive drainage systems, transforms hydraulic infrastructures into a social device, combining urban safety, recreation, and environmental education (Marzot, 2019).

The case of Rotterdam, through the 'sponge city' strategy, shows the protocol's effectiveness on an urban scale: the combination of permeable pavements, temporary storage basins, and photovoltaic systems represents a paradigm of resilient regeneration and advanced governance, founded on participation and civic incentives (González-Campaña, Lafaurie-Debany and Rabazo Martin, 2023). Finally, the Bosco Verticale highlights the technological and architectural declination of the protocol, using climate sensors, automated irrigation systems, and integrated management of water and energy flows, demonstrating how the building scale can become a laboratory for symbiosis between nature and buildings (Rossi, 2019).

The comparative analysis of the three cases reveals a conceptual and operational progression in the protocol: Copenhagen prioritises spatial and social integration, Rotterdam emphasises scalability and systemic resilience, and Milan focuses on technological precision and the verticalisation of functions. This comparison underlines the model's potential to overcome linear, monodimensional approaches to water management, becoming itself a dynamic design tool capable of connecting physical infrastructures and ecological components with the project's cultural dimensions.

The modularity and adaptability of the protocol make it effective even in complex contexts, such as historic centres and cultural heritage sites, where water management can be integrated with sustainable

recovery and territorial enhancement, thus expanding its international replicability (IWA, 2013). The operational protocol represents an innovative contribution to both scientific literature and professional practice, offering a holistic and multidisciplinary framework that integrates water management, energy, materials, design, and social participation, consistent with SDGs.

Compared to the existing protocols in scientific literature and in international platforms – such as Water Safety Plans (WHO, 2024), Sustainable Urban Water Management Frameworks (Mitchell, 2006) and Integrated Urban Water Management models (Bahari, 2012) – the proposed protocol introduces an evolutionary approach, oriented towards the convergence of technological, social, and design dimensions. Unlike traditional models, often sector-based or focused solely on water safety and operational efficiency, this new method integrates environmental, energy, and cultural parameters into a coherent framework that is scalable and adaptable to different territorial contexts.

The main innovation lies in its operational modularity and multiscale applicability, which enable the transfer of integrated management principles from the urban to the architectural and community levels. Water is no longer considered just a technical resource to be managed, but an active project infrastructure capable of generating added value in terms of social inclusion, ecological efficiency, and the quality of public spaces. In this sense, the protocol operates as a dynamic design governance tool, capable of coordinating data, technologies, and civic participation through flexible, iterative decision-making processes (Grigg, 2025).

From a forward-looking perspective, the proposed model can be interpreted as an evolution of the most recent frameworks of Water Sensitive Urban Design and Nature-based Solutions, enriched by an adaptive governance component and a replicable methodological structure that can be replicated in European and Mediterranean contexts. This approach responds to the needs of coherence with the objectives of the 2030 Agenda (UN, 2015) and the European Green Deal (European Commission, 2019), offering an operational tool for the ecological transition of cities and fragile territories.

Rethinking water as a generative and technological design resource is therefore a strategic lever for the sustainable regeneration of buildings and urban spaces. Integrated and participatory management enhances the environmental and functional performance of infrastructure, fosters social cohesion, stimulates collective innovation processes, and strengthens community resilience. This approach opens new interdisciplinary research perspectives, in which architecture, engineering, ecology, and governance collaborate to face the water and climate challenges of the 21st century, transforming water into a central design resource that generates technological, social, and environmental innovation.

Acknowledgments

The coordination and critical review of the scientific content were carried out by Prof. T. Campisi, guaranteeing the methodological rigour and theoretical coherence of the study. The presentation and analysis of the case studies were developed by L. Lombardo, who drew extensively upon her doctoral research, 'Smart Villages in the Madonie Park – Strategies for the Rehabilitation and Enhancement of Inner Areas', integrating concepts of sustainable heritage rehabilitation, community engagement, and the application of smart village strategies in rural contexts. With the above premises, both authors are jointly responsible for the contents of the essay.

Notes

1) For further details, please refer to the webpage: governo.it/sites/governo.it/files/DPCM_20160525_testo.pdf [Accessed 28 September 2025].

2) For further details, please refer to the webpage: researchgate.net/publication/377747218_PRINCIPI_PER_LA_PROGETTAZIONE_REALIZZAZIONE_E_GESTIONE_DI_EDIFICI_INTELLIGENTI/link/65b5213d1e1ec12eff517249/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19 [Accessed 28 September 2025].

References

ANSA (2017), "Trento, 18 milioni a progetto 'Santa Chiara open lab", in *ANSA.it*, newspaper online, 18/12/2017. [Online] Available at: ansa.it/trentino/notizie/2017/12/18/trento-18-milioni-a-progetto-santa-chiara-open-lab_aecbf131-d5d9-4ed3-903b-b382f922f138.html [Accessed 28 September 2025].

Avramidou, M. and Manika, S. (2021), "Interaction of modern architectural design with the environment – Evaluation and application in urban open spaces for developing resilient cities", in *ICED2021 | 2nd International Conference on Environmental Design, Athens, Greece, October 23-24, 2021*, *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 899, article 012011, Purpose-Led Publishing, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/899/1/012011 [Accessed 28 September 2025].

Badarnah, L. (2016), "Water management lessons from nature for applications to buildings", in *Procedia Engineering*, vol. 145, pp. 1432-1439. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.180 [Accessed 28 September 2025].

Bahari, A. (2012), *Integrated Urban Water Management*, Global Water Partnership, Stockholm. [Online] Available at: gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/background-papers/16-integrated-urban-water-management-2012.pdf [Accessed 29 September 2025].

Barnett, J. (2006), "Climate change, insecurity and injustice", in Adger, W. N., Paavola, J., Huq, S. and Mace, M. J. (eds), *Fairness in Adaptation to Climate Change*, MIT Press, Cambridge (MA), pp. 115-130. [Online] Available at: doi.org/10.7551/mitpress/2957.003.0011 [Accessed 29 September 2025].

Berizzi, C., Mazurkiewicz, M. and Terlicher, G. (2025), "Public Open Spaces and Water – Urban Design in Response to Climate Change", in Hanzl, M., Kantarek, A. A., Zaguła, A., Musiaka, L. and Figlus, T. (eds), *Urban Morphology versus Urban Redevelopment and Revitalisation – Proceedings of the XXIX Conference of the International Seminar on Urban Form 2022, Łódź and Kraków, Poland, September 2-11, 2022*, Springer, Cham, pp. 521-544. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-77752-3_26 [Accessed 28 September 2025].

Biswas, A. K. (2008), "Current directions – Integrated water resources management – A second look", in *Water International*, vol. 33, issue 3, pp. 274-278. [Online] Available at: doi.org/10.1080/02508060802272812 [Accessed 28 September 2025].

Blečić, I., Cois, E., Muroni, E. and Saiu, V. (2024), "Spaces seeking activities - activities seeking spaces – Evaluation and policy design of neighbourhood-wide urban community spaces", in *City, Culture and Society,* vol. 39, article 100606, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ccs.2024.100606 [Accessed 28 September 2025].

Brisotto, C., Carney, J., Macaione, I. and Raffa, A. (2023), "Cambiamenti climatici nei paesaggi di bonifica – Adattamento tra modulo e modularità | Climate change in reclamation landscapes – Adaptation between module and modularity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design,* vol. 14, pp. 62-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1442023 [Accessed 28 September 2025].

Butera, F. M. (2024), "La Città Ideale | The Ideal City", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 30-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1622024 [Accessed 28 September 2025].

Cascone, S. M., Margani, G. and Sapienza, V. (2020), *New Horizons for Sustainable Architecture | Nuovi orizzonti per l'architettura sostenibile*, EdicomEdizioni, Monfalcone.

Castellini, M., Faiella, I., Lavecchia, L., Miniaci, R. and Valbonesi, P. (eds) (2024), *Rapporto Annuale – Anno 2023*. [Online] Available at: oipeosservatorio.it/wp-content/uploads/2024/03/rapporto_2023_IT.pdf [Accessed 28 September 2025].

Ciccarese, L. and Fino, A. (2003), *Le relazioni tra cambiamenti del clima ed ecosistemi vegetali*, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici, Rapporti 32/2003 [Online] Available at: isprambiente.gov.it/contentfiles/00003800/3806-cambiamenti-clima.pdf [Accessed 28 September 2025].

Consiglia, M., Lahmar, A., Azrour, M. and Lahmar, A. (2025), "Towards resilient architecture in technological innovation and AI", in Kharmich, H., El Harrouni, K., Baba, K. and Karibi, K. (eds), *Vernacular Architecture – Support for Territorial Development, National School of Architecture of Rabat, Rabat, Morocco, October 4-5, 2024*, Materials Research Proceedings, vol. 47, Material Research Forum LLC., Millersville (PA), pp. 327-342. [Online] Available at: doi.org/10.21741/9781644903391-38 [Accessed 28 September 2025].

Corradi, M., Stevens, T., Macaione, I., Raffa, A. and Andaloro, B. (2024), "Rigenerazione climatica green degli streetscapes – L'esperienza di De Urbanisten ad Anversa | Green climate-adaptive streetscapes regeneration – The De Urbanisten Experience in Antwerp", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 60-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1652024 [Accessed 28 September 2024].

Crosby, P. (2023), "Towards an Anti-Antiutopia – Solarpunk Cities and the Precarity of Our Urban Future", in *Enquiry | The ARCC Journal for Architectural Research*, vol. 20, issue 2, pp. 79-91. [Online] Available at: doi.org/10.17831/enqarcc.v20i2.1159 [Accessed 28 September 2025].

Dolman, N. and Verlinde, J. (2024), "Achieving a Water-Resilient Rotterdam – Past, Present and Future Perspectives", in *Blue Papers*, vol. 3, issue 1, pp. 164-177. [Online] Available at: doi.org/10.58981/bluepapers.2024.1.13 [Accessed 28 September 2025].

Donofrio, J., Kuhn, Y., McWalter, K. and Winsor, M. (2009), "Water-Sensitive Urban Design – An Emerging Model in Sustainable Design and Comprehensive Water-Cycle Management", in *Environmental Practice*, vol. 11, issue 3, pp. 179-189. [Online] Available at: doi.org/10.1017/S1466046609990263 [Accessed 28 September 2025].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019 DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640 [Accessed 28 September 2025].

Faranda, D., Ginesta, M., Alberti, T., Coppola, E. and Anzidei, M. (2023), "Attributing Venice Acqua Alta events to a changing climate and evaluating the efficacy of MoSE adaptation strategy", in *Climate and Atmospheric Science,* vol. 6, article 181, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41612-023-00513-0 [Accessed 28 September 2025].

Ferrans, P., Torres, M. N., Temprano, J. and Rodríguez Sánchez, J. P. (2022), "Sustainable urban drainage system (SUDS) modeling supporting decision-making – A systematic quantitative review", in *Science of The Total Environment*, vol. 806, issue 2, article 150447, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150447 [Accessed 28 September 2025].

González-Campaña, J., Lafaurie-Debany, N. and Rabazo Martin, M. (2023), "Realizzare paesaggi innovativi – Balmori Associaties ridefinisce il rapporto uomo-natura per le città del futuro | Making innovative landscapes – Balmori Associates redefining the human-nature relationship for the cities of the future", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 31-42. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1322023 [Accessed 28 September 2025].

Grigg, N. S. (2025), "Integrated Water Resources Management After 2030 – An Agenda for Educators", in *Water*, vol. 17, issue 2, article 189, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/w17020189 [Accessed 28 September 2025].

Hendawy, M., Junaid, M. and Amin, A. (2024), "Integrating sustainable development goals into the architecture curriculum –Experiences and perspectives", in *City and Environment Interactions,* vol. 21, article 100138, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100138 [Accessed 28 September 2025].

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York (NY). [Online] Available at: doi.org/10.1017/9781009157896 [Accessed 29 September 2025].

Javanroodi, K., Nik, V. M. and Scartezzini, J. L. (2021), "Quantifying the impacts of urban morphology on modifying microclimate conditions in extreme weather conditions", in *Journal of Physics | Conference Series*, vol. 2042, article 01 2058, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012058 [Accessed 28 September 2025].

Kepekci, H. and Asma, A. (2020), "Comparative Analysis of Heat Sink Performance Using Different Materials", in *AJER | American Journal of Engineering Research*, vol. 9, issue 4, pp. 204-210. [Online] Available at: ajer.org/papers/Vol 9-issue4/Z0904204210.pdf [Accessed 28 September 2025].

Liu, Y. (2023), "Analysis of the Vertical Forest of Milan in Terms of High-Rise Architecture and Biodiversity", in *Highlights in Art and Design,* vol. 3, issue 2, pp. 47-52. [Online] Available at: doi.org/10.54097/hiaad.v3i2.10043 [Accessed 28 September 2025].

Marzot, N. (2019), "L'avventura del progetto e il destino dell'uomo – Architettura e costruzione della realtà sociale", in *Rivista di Estetica,* vol. 71, pp. 148-172. [Online] Available at: doi.org/10.4000/estetica.5566 [Accessed 28 September 2025].

Matthies, F. and Menne, B. (2009), "Prevention and management of health hazards related to heatwaves", in *International Journal of Circumpolar Health,* vol. 68, issue 1, pp. 8-12. [Online] Available at: doi.org/10.3402/ijch.v68i1.18293 [Accessed 28 September 2025].

Maziotis, A., Sala-Garrido, R. and Molinos-Senante, M. (2024), "Assessing energy efficiency and its dynamic changes in the water sector integrating heterogeneity and carbon emissions", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 480, article 144137, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144137 [Accessed 28 September 2025].

Mecca, B., Gaballo, M. and Todella, E. (2023), "Measuring and evaluating urban sustainability | Misurare e valutare la sostenibilità urbana", in *Valori e Valutazioni*, vol. 32, pp. 17-29. [Online] Available at: doi.org/10.48264/VVSIEV-20233203 [Accessed 28 September 2025].

Mitchell, V. G. (2006), "Applying Integrated Urban Water Management Concepts – A Review of Australian Experience", in *Environmental Management*, vol. 37, pp. 589-605. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00267-004-0252-1 [Accessed 28 September 2025].

Mössner, S. (2015), "Urban development in Freiburg, Germany – Sustainable and neoliberal?", in *Die Erde | Journal of the Geographic Society of Berlin*, vol. 146, issue 2-3, pp. 189-193. [Online] Available at: doi.org/10.12854/erde-146-16 [Accessed 28 September 2025].

Ness, D. (2024), "La decarbonizzazione degli edifici sarà sufficiente? – Limitare e ridistribuire l'aumento di superficie costruita | Will decarbonising buildings be enough? – Constrain and redistribute growth in floor area", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design,* vol. 15, pp. 84-97. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1562024 [Accessed 30 August 2025].

Ofori, A. and Mdee, A. (2021), "Integrated Water Resource Management", in Leal Filho, W., Azul, A. M., Brandli, L., Lange Salvia, A. and Wall, T. (eds), *Clean Water and Sanitation – Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*, Springer, Cham, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-70061-8_4-1 [Accessed 28 September 2025].

Olatunde, T. M., Okwandu, A. C., Akande, D. O. and Sikhakhane, Z. Q. (2024), "Energy efficiency in architecture – Strategies and technologies", in *Open Access Research Journal of Multidisciplinary Studies*, vol. 7, issue 2, pp. 31-41. [Online] Available at: doi.org/10.53022/oarjms.2024.7.2.0024 [Accessed 28 September 2025].

Patsidis, A., Dyško, A., Booth, C., Oulis Rousis, A., Kalliga, P. and Tzelepis, D. (2023), "Digital Architecture for Monitoring and Operational Analytics of Multi-Vector Microgrids Utilizing Cloud Computing, Advanced Virtualization Techniques, and Data Analytics Methods", in *Energies*, vol. 16, issue 16, article 5908, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en16165908 [Accessed 28 September 2025].

Peng, L., Salem, M., Blazek, V., Prokop, L., Al-Bahrani, M. and Misak, S. (2023), "Thermal energy storage applications in solar water heaters – An updated review", in *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57, article 103230, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.seta.2023.103230 [Accessed 28 September 2025].

Prestamburgo, S., Sgroi, F., Venudo, A. and Zanin, C. (2021), "Universal design as resilient urban space plan strategy – New scenarios for environmental resources' sustainable management", in *AIMS Environmental Science*, vol. 8, issue 4, pp. 321-340. [Online] Available at: doi.org/10.3934/environsci.2021021 [Accessed 28 September 2025].

Rahman, M. M., Rahman, M. A., Haque, M. M. and Rahman, A. (2019), "Sustainable water use in construction", in Tam, V. W. Y. and Le, K. N. (eds), *Sustainable Construction Technologies – Life-Cycle Assessment,* Butterworth-Heinemann, Oxford (UK), pp. 211-235. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-811749-1.00006-7 [Accessed 28 September 2025].

Rossi, G. E. (2019), "Adattamento urbano, strategie e progetto – Il divario fra le politiche e la loro implementazione | Urban adaptation, strategies and projects – The gap between policies and their implementation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design,* vol. 6, pp. 46-57. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/652019 [Accessed 28 September 2025].

Sananse, N., Povekar, S., Wagh, A., Donde, S., Gurani, K. and Khadke, N. (2023), "The Canal Top Solar Power Generation Project", in *IJRASET | International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 11, issue 4, pp. 3942-3947. [Online] Available at: doi.org/10.22214/ijraset.2023.51144 [Accessed 28 September 2025].

Shrivastava, E., Segura D'Angelo, G. A. and Lai, Y. (2021), *Gioia 22 – Re-Articulating Porta Nuova – A public high-rise proposal in Milan skyline*, Thesis, Politecnico di Milano (Italy), Tutor Prof. Folli, M. G., co-Tutors Prof. Pecora, C., Dotelli, G., Imperadori, M. and Romano, F. [Online] Available at: hdl.handle.net/10589/181717 [Accessed 28 September 2025].

Sposito, C. (2017), "Costruire con l'acqua – Nuovi paradigmi dell'architettura sostenibile | Building with water – new standards of sustainable architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 2, pp. 117-126. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/2162017 [Accessed 28 September 2025].

Turki, H., Zhang, J. Y., Ferroni, F. and Ramanan, D. (2023), "SUDS – Scalable Urban Dynamic Scenes", in *Computer Science,* arXiv:2303.14536v1, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.48550/arXiv.2303.14536 [Accessed 28 September 2025].

Umgiesser, G. (2020), "The impact of operating the mobile barriers in Venice (MOSE) under climate change", in *Journal for Nature Conservation,* vol. 54, article 125783, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jnc.2019.125783 [Accessed 28 September 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development – A/RES/70/1*. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf [Accessed 28 September 2025].

Vacanti, A. and Leonardi, C. (2024), "Tecnologia, energia e tempo – Percorsi sperimentali per il design di tecnologie appropriate | Technology, energy and time – Experimental paths for the design of appropriate technology", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design,* vol. 15, pp. 316-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15262024 [Accessed 30 August 2025].

Valente, R., Mozingo, L. A., Bosco, R. and Giacobbe, S. (2024), "Gestione integrata delle risorse naturali in contesti urbani sostenibili | Integrated natural resource management in sustainable urban context", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 180-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15142024 [Accessed 29 September 2024].

Vosoughkhosravi, S., Dixon-Grasso, L. and Jafari, A. (2022), "The impact of LEED certification on energy performance and occupant satisfaction – A case study of residential college buildings", in *Journal of Building Engineering*, vol. 59, article 105097, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105097 [Accessed 28 September 2025].

WHO – World Health Organization (2024), *Water safety planning – A roadmap to supporting resources*. [Online] Available at: cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/water-safety-and-quality/water-safety-planning/revised_wsp_roadmap_23sept2024.pdf?sfvrsn=39eca14b_3&download=true [Accessed 28 September 2025].

Xiangfeng, L. and Tianxing, S. (2007), "Conceptual Development of Transparent Water Storage Envelopes", in *Architectural Science Review*, vol. 50, issue 1, pp. 18-25. [Online] Available at: doi.org/10.3763/asre.2007.5003 [Accessed 28 September 2025].

Yap, K. G. and Koh, A. (2010), "Creating a City of Gardens and Water – Singapore's Active, Beautiful, Clean Waters Programme", in *Proceedings of the Water Environment Federation*, Water Environment Federation, vol. 2010, issue 2, pp. 1-14. [Online] Available at: accesswater.org/publications/proceedings/-297673/creating-a-city-of-gardens-and-water---singapore-s-active--beautiful--clean-waters-programme?pdfdownload=true [Accessed 28 September 2025].

Zacharias, I., Dimitriou, E. and Koussouris, T. (2003), "Developing sustainable water management scenarios by using thorough hydrologic analysis and environmental criteria", in *Journal of Environmental Management*, vol. 69, issue 4, pp. 401-412. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2003.09.017 [Accessed 28 September 2025].

Zanzottera, F. (2022), *Vetra Building – Storia di un'architettura nel cuore di Milano*, Liberedizioni – BAMS Edizioni, Montichiari.

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 196-211
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18102025

Article Info

Received	12 September 2025
Revised	22 October 2025
Accepted	24 October 2025
Published	30 December 2025

GESTIONE RESILIENTE DELLE ACQUE METEORICHE
Uno strumento a supporto della progettazione

RESILIENT MANAGEMENT OF STORMWATER
A tool to support design

Philippe Marin, Lidia Maria Giannini, Fabrizio Tucci

Abstract

Il cambiamento climatico sta causando il verificarsi di eventi climatici estremi sempre più intensi, con alluvioni improvvise che si alternano a lunghi periodi di siccità. L'impermeabilizzazione dei suoli amplifica il deflusso e mette in crisi i sistemi di drenaggio tradizionali. In questo contesto nasce il 'Water Management systems' (WMs), uno strumento parametrico di supporto alla progettazione preliminare di soluzioni per la gestione resiliente delle acque meteoriche. Sviluppato a partire da un'analisi critica degli strumenti esistenti e fondato su un database strutturato di dati tecnici e norme, il WMs è implementato in Rhino-Grasshopper e integrato con fogli di calcolo: lo strumento consente di modellare e verificare soluzioni e scenari multipli a fronte di condizioni di contesto, supportando decisioni progettuali informate, come dimostrato dalla sua applicazione su un progetto pilota.

Climate change is causing increasingly intense extreme weather events, with sudden floods alternating with long periods of drought. The impermeabilisation of soils amplifies runoff and strains traditional drainage systems. In this context, the Water Management systems (WMs) was developed as a parametric tool to support the preliminary design of resilient stormwater management solutions. Developed from a critical analysis of existing tools and based on a structured database of technical data and regulations, the WMs is implemented in Rhino-Grasshopper and integrated with spreadsheets. The tool enables the modelling and verification of multiple solutions and scenarios based on contextual conditions, supporting informed design decisions, as demonstrated in a pilot project.

Keywords

gestione delle acque meteoriche, resilienza architettonica e urbana, simulazione e modellazione, progettazione tecnologica ambientale, strumento di supporto alla progettazione

stormwater management, architectural and urban resilience, simulation and modelling, environmental technological design, design support tool

Philippe Marin, PhD, is a Full Professor at the School of Architecture of Grenoble (ENSAG), Université Grenoble Alpes (France). He currently directs the MHA Laboratory (Methods and History of Architecture). He is a Co-Director of AI4ARCHI (Artificial Intelligence for Generative Architectural and Urban Design) and a Co-Director of the ACCN scientific and educational network for Architecture, Design, and Digital Culture. His research focuses on parametric and generative modelling and digital fabrication. E-mail: philippe.marin@ grenoble.archi.fr

Lidia Maria Giannini, Architect and PhD, is a Postdoctoral Research Fellow at the Department of Planning, Design, and Technology of Architecture (PDTA), 'Sapienza' University of Rome (Italy) and collaborates in research with the MHA Laboratory (Methods and History of Architecture) at ENSAG-UGA (Grenoble). She participates in projects and research activities on environmental sustainability and bioclimatic models, focusing on resilient design through integrated management of urban stormwater. E-mail: lidiamaria.giannini@uniroma1.it

Fabrizio Tucci, Architect and PhD, is a Full Professor of Environmental Design at the 'Sapienza' University of Rome (Italy). He has been Scientific Director of national and international projects and research focusing on design quality and environmental design, the relationship between design and technological innovation, and environmental and social sustainability in architectural and urban regeneration processes. E-mail: fabrizio.tucci@uniroma1.it



Il riscaldamento globale sta modificando in modo significativo il ciclo idrologico naturale (Masson-Delmotte et alii, 2021), rendendo gli eventi estremi legati all'acqua sempre più frequenti e violenti. Dal 2000 le alluvioni sono aumentate del 134% e i periodi di siccità del 29% (WMO, 2021): il cambiamento climatico sta producendo un'intensificazione e un'accelerazione del ciclo idrologico (Vahid et alii, 2009), con precipitazioni brevi e ad elevata intensità, che tuttavia non comportano necessariamente un aumento complessivo delle precipitazioni. Nelle regioni più vulnerabili, come l'hotspot del Mediterraneo, piogge estreme e fenomeni di inondazione improvvisa si combinano con periodi di siccità prolungati, esacerbando le condizioni di rischio per le città (EEA, 2024).

La progressiva artificializzazione dei suoli urbani ha ridotto il loro grado di permeabilità e la loro capacità di infiltrazione e ha accelerato i tempi di corrivazione, determinando deflussi più rapidi verso i recettori, con picchi di piena anticipati e più intensi: le infrastrutture tradizionali di drenaggio, spesso obsolete o sottodimensionate, risultano pertanto inefficaci. Alle problematiche di ordine quantitativo di allagamenti ed erosione si aggiungono quelle di ordine qualitativo dovute all'inquinamento delle acque di ruscellamento, con ricadute ecosistemiche di grande rilevanza (Negretto et alii, 2021).

La gestione delle acque meteoriche da eventi estremi assume dunque un ruolo strategico nel dibattito internazionale. La progettazione architettonica e urbana svolge un ruolo chiave nell'introduzione di soluzioni verdi-blu e grigie (UN-Habitat, 2024) capaci di rafforzare la resilienza degli spazi urbani e contribuire al ripristino dell'equilibrio ecosistemico delle città. Queste soluzioni sono in linea con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) dell'Agenda 2030 (UN, 2015), agendo direttamente sulla gestione sostenibile e integrata della risorsa idrica (SDG 6) e, in modo trasversale, sul sistema urbano, favorendo città resilienti e inclusive (SDG 11), modelli circolari di gestione delle risorse (SDG 12) e azioni per il clima (SDG 13).

Approcci progettuali integrati combinano soluzioni ecologiche di recupero e riuso e sistemi di drenaggio urbano sostenibile; tuttavia, affinché risultino efficaci, occorre avere una piena consapevolezza delle molteplici dinamiche ambientali coinvolte, sin dalle prime fasi di sviluppo del progetto. Studi recenti hanno sviluppato in tal senso strumenti di simulazione e modellazione urbana, dimostrando l'importanza di approcci multi-risorsa a supporto della progettazione resiliente. L'uso di piattaforme integrate consente di mettere in relazione la gestione idrica con la prestazione energetica e le condizioni microclimatiche (Tucci et alii, 2022; Valente et alii, 2024), evidenziando le sinergie che intercorrono per una gestione ecologica e sostenibile delle risorse naturali e favorendo lo sviluppo di modelli di governance più efficaci e interconnessi.

In questo contesto la ricerca propone di affiancare agli strumenti strategici esistenti nuovi strumenti operativi, capaci di integrare simulazione idrica e modellazione tecnologica basata su dati tecnici e prescrizioni locali. Infatti, se l'uso di molteplici software di simulazione microclimatica è consolidato nella prassi progettuale (Ibrahim, Kershaw and Shepherd, 2020), la simulazione idrica risulta spesso associata a competenze settorializzate e la sua integrazione in architettura rimane ancora un campo di indagine aperto (Leskens, Brugnach and Hoekstra, 2014). Ambienti di progettazione parametrica consentono di sviluppare algoritmi tesi a una rappresentazione del fenomeno meteorico e alla valutazione di scenari di rischio (Morschek, König and Schneider, 2019), ma tali strumenti non supportano direttamente la scelta e la verifica tecnica delle soluzioni progettuali per la gestione di eventi climatici estremi.

La ricerca muove da queste considerazioni allo scopo di elaborare uno strumento integrato orientato alla progettazione preliminare di soluzioni tecnologiche di gestione resiliente delle acque meteoriche urbane. Questo obiettivo guida la formulazione del 'Water Management systems' (WMs), uno strumento fondato sull'interazione tra workflow parametrici e fogli di calcolo. Dal forte carattere sperimentale e multidisciplinare, il WMs unisce competenze progettuali e verifiche tecniche con i principi di idrologia urbana rigenerativa, garantendo al contempo un'applicazione coerente con la normativa locale.

In particolare lo strumento si colloca a supporto dell'applicazione delle verifiche di 'invarianza idraulica e idrologica'[1] previste in alcune regioni italiane per la progettazione di soluzioni di drenaggio sostenibili; tuttavia l'adozione non sistematica di queste verifiche nel territorio nazionale e la frammentazione metodologica[2] tra regioni rendono i principi difficilmente applicabili nella progettazione architettonica. Il WMs fornisce una rielaborazione originale di metodi di calcolo consolidati, riorganizzando conoscenze specifiche in un database di informazioni e fogli di lavoro facilmente consultabili e impiegabili dai progettisti; inoltre l'affiancamento innovativo di strumenti di modellazione parametrica supporta la modellazione informata di ogni soluzione e la visualizzazione in tempo reale all'interno di specifici contesti urbani, agevolando le fasi di dimensionamento e verifica.

Il contributo illustra dapprima il contesto di riferimento, inquadrando il tool nel panorama degli strumenti di simulazione e modellazione esistenti e motivando gli obiettivi della ricerca; sono poi presentati il processo metodologico e le fasi di lavoro che hanno condotto alla formulazione dello strumento, in seguito descritto nei suoi componenti, esplicitandone l'articolazione e le funzionalità. Il tool è testato su un progetto pilota descrivendo fasi applicative e risultati ottenuti; infine le conclusioni delineano potenzialità e limiti del WMs, aprendo a future prospettive di ricerca.

Simulazione e modellazione per la gestione idrica | Le attività di simulazione e modellazione rivestono un ruolo chiave nella gestione delle dinamiche ambientali e quando svolte ex ante ed ex post consentono di indirizzare le scelte progettuali verso le alternative più efficaci, secondo un'ottica esigenziale-prestazionale (Dierna, 1995). Software di simulazione microclimatica sono stati impiegati per supportare e verificare il progetto di adattamento e mitigazione ambientale: esperienze progettuali innovative hanno applicato strumenti ad 'alta risoluzione' come ENVI-met (Tucci et alii, 2022; Valente et alii, 2024), o simulazioni parametriche svolte tramite i Ladybug Tools (Zarcone, Nava and Tucci, 2024), dimostrando le relazioni esistenti tra reti urbane multiple, quali energia, bioclimatica e risorse naturali. Parallelamente sono stati elaborati approcci sperimentali che uniscono, alla simulazione ambientale, algoritmi generativi basati sull'intelligenza artificiale in grado di innescare strategie di progettazione adattiva (Nava and Melis, 2024). La gestione integrata della risorsa idrica, centrale per il raggiungimento di obiettivi climatici e ambientali, richiede tuttavia strumenti di simulazione e modellazione specifici, capaci di supportare valutazioni tecniche e progettuali sin dalle fasi preliminari. Programmi di simulazione idrica consentono di diagnosticare eventi meteorologici estremi e riprodurre fenomeni fisici di deflusso e drenaggio nelle reti, tuttavia necessitano di competenze specialistiche per la corretta modellazione e post-elaborazione dei risultati e la standardizzazione delle soluzioni tecniche prodotte appare insufficiente rispetto al panorama di soluzioni alternative e sostenibili potenzialmente applicabili nel progetto (Leskens, Brugnach and Hoekstra, 2014).

In questo quadro gli ambienti di modellazione parametrica si sono progressivamente affermati come laboratori digitali di integrazione fra progettazione e simulazione ambientale (Marin, 2018). Tra le piattaforme più diffuse Rhinoceros-Grasshopper (Rhino-GH) si distingue per l'elevata espandibilità e rapidità di esecuzione, consentendo di svolgere analisi multiple all'interno dello stesso ambiente, caratteristiche che lo rendono uno strumento particolarmente efficace per la simulazione dinamica del comportamento idrico e la sua correlazione con strategie di progettazione integrata. Un'importante fase della ricerca ha quindi riguardato la mappatura delle risorse disponibili in ambiente Rhino-GH allo scopo di costruire uno stato dell'arte aggiornato e critico che rappresentasse la base conoscitiva per la definizione di un nuovo strumento progettuale.

L'insieme di strumenti sviluppati in ambiente Rhino-GH per l'integrazione della risorsa idrica nei processi di progettazione può essere ricondotto a due macrocategorie fondamentali: plug-in di simulazione, orientati alla rappresentazione degli eventi meteorici, e toolkit di simulazione e valutazione. I plug-in di simulazione possono essere ulteriormente classificati in semplificati, a base logica e a base fisica, e si occupano della visualizzazione dei flussi idrici su topografie, rispettivamente sulla base di interfacce preimpostate in Rhino, tramite costruzioni di script personalizzati basati su cicli iterativi, o tramite simulazioni fisiche di collisioni particellari.

Parallelamente, toolkit di simulazione e valutazione associano alla restituzione dei deflussi una dimensione progettuale o prestazionale: i Performance Workflows contenuti nel Land Kit consentono la modellazione idraulica di flussi e volumi di stoccaggio sulla base di parametri climatici nordamericani; lo Spatial Resilience Toolbox – Flooding (SRTF) consente di simulare scenari di ruscellamento, inondazioni fluviali e maree e valuta rischi di allagamento, ruscellamento ed erosione alla scala urbana (Morschek, König and Schneider, 2019).

L'analisi comparata degli strumenti di simulazione e modellazione idrica (Tab. 1) evidenzia alcune criticità rilevanti, come la scarsa adattabilità a contesti climatici e normativi nazionali, l'obsolescenza o necessità di licenza, e il funzionamento tramite script non personalizzabili dall'utente. L'uso di strumenti a base fisica accresce tempi e complessità di simulazione, senza tuttavia aggiungere informazioni utili al progetto preliminare rispetto a simulazioni iterative su base logica. Inoltre lo sviluppo di toolkits per la valutazione del rischio, fondamentale in fase di programmazione strategica, non fornisce supporto alla progettazione operativa di soluzioni resilienti per la gestione delle acque meteoriche urbane.

Typology	Name	Function	Strengths	Weaknesses
Simulation plug-ins				
Simplified	eVe | rain	It simulates rainwater runoff on 3D geometries	Intuitive interface Fast simulation	Limited Rhino compatibility Non-customisable scripts Does not simulate physical interactions
Logic-based	Hoopsnake	It enables iterative loops by feeding output data back into inputs.	Customizable scripts Fast iterative simulations	Limited Rhino compatibility Does not simulate physical interactions
	Anemone	It enables iterative loops via Loop Start and Loop End components	Customizable scripts Fast iterative simulations Good Rhino compatibility	Does not simulate physical interactions
Physic-based	Kangaroo Physics	It supports interactive simulation, form-finding, optimization, and constraint solving	Live physics engine Handles complex interactions	Higher complexity / resolution than needed in preliminary design Slower simulation speed
Simulation and evaluation toolkits				
	Land Kit	It supports landscape design focusing on topography, paving, planting, hydrology, and embodied carbon	Hydrological analysis with water flow visualization Advanced stormwater analysis (Pro version)	Full functionality only in paid Pro version Non-customisable scripts Rainfall parameters tailored to US contexts
	Spatial Resilience Toolbox Flooding (SRTF)	It assesses urban flood risks from rain runoff, tidal, and river flooding; uses Kangaroo Physics for runoff simulation	Comprehensive flood risk assessment Supports urban planning strategies Open-access course available	Accuracy depends on detailed topography Does not support operational design

Tab. 1 | Comparison among water simulation and modelling tools available in Grasshopper for Rhino (credit: the Authors, 2025).

Base info	Selection	Parameters		Values
Zone	✓ A: Tyrrhenian B: Apennine C: Adriatic			
Sub-Zone (SZO) and related Growth Coefficients (KT)	✓ SZO A SZO B SZO C	KT (Tr = 2)	[adim]	0.89
		KT (Tr= 5)	[adim]	1.22
		KT (Tr= 10)	[adim]	1.49
		KT (Tr= 20)	[adim]	1.84
		[.....]	[adim]	[.....]
		KT (Tr= 1000)	[adim]	4.77
Pluviometric Homogeneous Area (APO) related Regionalisation parameters	APO: A5	C	[mm/m]	0.03031
		D	[mm]	60.09
		b	[h]	0.1621
		m	[adim]	0.7748
		μi0/ μi24	[adim]	48.28
		δ	[cost]	1.15
Return period (Tr)	rural areas	Tr=10	[yr]	20
	✓ residential areas	Tr=20	[yr]	
	city center / industrial or commercial areas	Tr=30	[yr]	
	road or railroad underpasses	Tr=5	[yr]	
Nearest weather station height a.s.l. (Z)	Name: Fosso di Pratolungo	Z	[m]	24
Mean of the annual maximum daily rainfall height (μhd)		μhd	[mm]	60.81744
Mean instantaneous intensity (μi0)		**μi0**	**[mm/h]**	**140.6961**
Rainfall height	$H(T_r,t) = [\mu_{io}(t) \times K_T \times (\frac{b}{b+t})^m] \times t = i(T_r,t) \times t$			

Tab. 2 | Information for defining IDF curves according to the VAPI method (credit: the Authors, 2025).

Dalle criticità individuate emerge la necessità di uno strumento operativo che integri simulazione, modellazione e verifiche tecniche in un workflow coerente. Scopo della ricerca è sviluppare una procedura che consenta di affiancare i progettisti nelle fasi preliminari di scelta, dimensionamento e verifica di soluzioni progettuali per una gestione resiliente delle acque meteoriche urbane, integrando dati climatici, prescrizioni locali e informazioni tecniche in uno strumento flessibile e agilmente consultabile. Lo strumento WMs è concepito per superare i limiti connessi alla richiesta di conoscenze specialistiche, adottando metodologie comprensibili per i progettisti e offrendo accesso a un database di informazioni strutturate per un'applicazione pratica.

Il WMs associa alle funzionalità di visualizzazione dei flussi idrici consolidate in letteratura moduli specifici finalizzati alla progettazione di soluzioni di gestione sostenibile delle acque meteoriche, integrando modellazione parametrica di superfici e soluzioni di progetto e fogli di calcolo per la validazione dei dati estratti dal modello (Fig. 1). Lo strumento supporta decisioni progettuali più consapevoli e informate, offrendo un focus sulla gestione idrica in un panorama di gestione integrata delle risorse naturali auspicabile per la realizzazione di ecosistemi urbani resilienti.

Contesto metodologico e fasi di lavoro | La metodologia di ricerca, basata su un'analisi critica dello stato dell'arte, si articola in una fase preliminare, seguita da una fase operativa di costruzione del WMs. La fase preliminare consiste nella selezione delle soluzioni da modellare nel toolbox parametrico e nella selezione dei metodi da implementare nei fogli

Hours [h]	Rainfall height [mm]					
	(Tr = 2)	(Tr= 5)	(Tr= 10)	(Tr= 20)	[...]	(Tr= 1000)
1	27.22	37.31	45.57	56.27	[...]	145.88
2ù	33.65	46.13	56.33	69.57	[...]	180.35
3	37.6	51.54	62.94	77.73	[...]	201.5
4	40.52	55.54	67.83	83.76	[...]	217.15
5	42.86	58.76	71.76	88.62	[...]	229.73
6	44.84	61.47	75.07	92.71	[...]	240.33
7	46.56	63.83	77.95	96.26	[...]	249.55
8	48.09	65.92	80.51	99.42	[...]	257.73
9	49.47	67.81	82.81	102.27	[...]	265.11
10	50.72	69.53	84.92	104.86	[...]	271.85
[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
24	62.23	85.3	104.18	128.65	[...]	333.5

Tab. 3 | Rainfall heights for the Fosso di Pratolungo Meteorological Station, Rome (credit: the Authors, 2025).

PROJECT NAME: 02-V San Basilio		**Parameters**		**Values**
Project area		A	[m²]	111,548.63
Location	Rome			
Return period	rural areas	Tr=10	[yr]	20
	✓ residential areas	Tr=20	[yr]	
	city center/industrial or commercial areas	Tr=30	[yr]	
	road or railroad underpasses	Tr=50	[yr]	
Infiltration	soil permeability	k	k [m/s]	0.000003
	avg distance from highest water table		[m]	7
No infiltration	admitted limited discharge	q	[l/s/ha]	7
	minimum discharge	Qmin	[l/s]	3
	total discharge rate	Qf out	[l/s]	78.08
ANTE	Active surface	Sa	[m²]	79,892.59
	Runoff coefficient total	**φtot**	**[adim]**	**0.716**
POST	Active surface	Sa	[m²]	**55,702.47**
	Runoff coefficient total	**φtot**	**[adim]**	**0.499**

Tab. 4 | Basic information and evaluation of permeability before and after intervention (credit: the Authors, 2025).

di calcolo. La selezione dei sistemi di gestione resiliente delle acque meteoriche è parte di un processo metodologico più ampio fondato sull'analisi di manuali tecnici e linee guida internazionali (Woods Ballard et alii, 2015) e sull'analisi critica di diciassette casi studio europei, scelti per la loro replicabilità in contesti mediterranei e urbani consolidati. L'analisi comparata dei casi studio ha consentito di individuare tre macro-strategie architettoniche di gestione idrica ricorrenti (water diversion, water reception e source control), sulla base delle quali classificare le trentasei soluzioni mappate nella letteratura. Le soluzioni sono ulteriormente filtrate sulla base di criteri di coerenza con gli obiettivi di controllo del deflusso urbano, rilevanza per la capacità di mitigazione degli eventi estremi e possibilità di modellazione accurata in ambiente Rhino-GH, conducendo alla scelta finale di dieci dispositivi da modellare nel toolbox (Fig. 2).

La selezione dei metodi sui quali strutturare i fogli di calcolo si basa su due criteri-chiave: l'applicabilità nelle fasi di progettazione preliminare e la compatibilità regolamentare. Di norma l'uso di metodi semplificati è raccomandato nella progettazione preliminare, supportato nelle fasi esecutive da modellazioni più complesse (ASTEE, 2017). Tra i metodi di dimensionamento proposti da regolamenti e linee guida sull'invarianza idraulica e idrologica è selezionato il 'metodo semplificato delle sole piogge'[3], che consente di stimare i volumi di stoccaggio idrico richiesti per via analitica, operando un confronto tra le altezze di pioggia cadute nell'area e le altezze drenate dalle soluzioni tecnologiche: prerequisito è la conoscenza delle curve di Intensità-Durata-Frequenza (IDF) necessarie a definire le altezze pluviometriche di progetto. Per la loro stima la ricerca analizza il metodo VAPI fondato su un processo di regionalizzazione delle piogge intense in Italia[4] (Ferrari and Versace, 1994), che consente di superare le problematiche associate all'assenza o incompletezza di dati pluviometrici storici, rendendone l'uso particolarmente efficace nella progettazione preliminare.

La costruzione operativa dello strumento si fonda sulle analisi preliminari svolte e si struttura intorno a tre momenti di lavoro principali. La prima fase consiste nella creazione di un database strutturato di informazioni normative e tecniche: all'interno del database sono raccolte le informazioni necessarie per l'applicazione del 'metodo delle sole piogge' e del metodo VAPI e sono esplicitati i criteri da adottare nella progettazione dei sistemi di gestione idrica, desunti da manuali e linee guida e riorganizzati in schede tecniche. L'insieme delle informazioni organizzate nel database costituisce la base conoscitiva per la corretta strutturazione dei fogli di calcolo e per la costruzione di workflow parametrici idonei alla modellazione delle dieci soluzioni tecnologiche selezionate.

La seconda fase di lavoro è orientata alla creazione di tre fogli di calcolo (Tabb. 2-7) finalizzati rispettivamente alla costruzione delle curve IDF secondo il metodo VAPI e alla determinazione dei volumi di progetto e delle massime altezze di stoccaggio in applicazione del metodo 'delle sole piogge'. I fogli applicano le informazioni contenute all'interno del database e le riorganizzano allo scopo di ottimizzare l'inserimento e l'estrazione dei dati. Poiché la modellazione parametrica ha richiesto un arco temporale maggiore, i fogli sono testati inizialmente per via 'statica', verificandone il corretto funzionamento. Ciascun foglio è predisposto per essere potenzialmente indipendente, prevedendo la possibilità di estensione delle metodologie di calcolo adottate, sulla base delle esigenze climatiche e regolamentari locali.

Infine la terza fase consiste nello sviluppo del toolbox parametrico in ambiente Rhino-GH. Uno script iterativo costruito utilizzando il plug-in a base logica Anemone consente di simulare i percorsi idrici nell'area (Claghorn, 2016), mentre la modellazione delle superfici e delle soluzioni progettuali è finalizzata alla creazione di componenti customizzati che possano ampliare le librerie GH tramite la progettazione attiva e consapevole di sistemi di gestione idrica. Le soluzioni sono modellate applicando un processo di astrazione dei componenti costituenti e di diversificazione delle configurazioni possibili. Al fine di garantire la massima flessibilità del modello tutti i componenti sono modellati sulla base di curve di input disegnate in Rhino e importate in GH e sono progettati per funzionare indipendentemente dall'orientamento delle curve di input. A fronte di script complessi ogni componente è racchiuso in cluster di pratico uso i quali contengono tutte le informazioni necessarie a guidare il progettista nell'inserimento dei parametri di input e nella verifica dei dati di output, in coerenza con le informazioni raccolte nel database.

Lo strumento WMs: componenti e funzionalità

| Lo strumento WMs è composto dal toolbox parametrico che interagisce con i tre fogli di calcolo. Il funzionamento complessivo è sviluppato sulla base di un flowchart generale (Fig. 3) dove è possibile visualizzare le interazioni tra variabili progettuali, processi logici e scelte, nelle diverse fasi del progetto.

Il toolbox parametrico si articola in tre moduli: uno script di visualizzazione di flussi idrici; una sezione di 'Surface modelling'; una sezione di 'Solution modelling'. L'interfaccia del toolbox è essenziale: le dieci soluzioni con le loro rispettive varianti e i tre strumenti di superficie (per un totale di venti componenti) sono organizzati in cinque categorie (Fig. 4). Per la visualizzazione dei flussi idrici si mette a disposizione uno script (Fig. 5) che, importata la topografia, consente di creare cicli di reiterazioni crescenti visualizzando in tempo reale il deflusso sotto forma di polilinee. L'adozione di un metodo di simulazione idrica a base logica, e non fisica, fornisce uno strumento immediato, capace di supportare efficacemente l'analisi dello stato di fatto e orientare scelte preliminari quali localizzazione ottimale delle soluzioni o azioni sulla topografia dei luoghi.

Il modulo di modellazione delle superfici include tre componenti: il primo 'Catchment Surfaces' è destinato alla modellazione delle superfici di deflusso delle acque meteoriche; il secondo 'Reception Surfaces-WMs' è finalizzato alla modellazione delle superfici occupate dalle soluzioni di gestione idrica progettate per contenere il deflusso; il terzo 'Surface typologies-runoff coefficient' consiste in una value list di coefficienti di ruscellamento basata sul-

Solution: bioretention areas		Parameters		Values
Infiltration	soil permeability	k	[m/s]	-
No infiltration	limited discharge	q	[l/s]	0.0000007
Design Surfaces	Total Surface	Stot	[m²]	17,930.07
	Apport Surface	Sapp	[m²]	14,173.78
	Infiltration Surface	Sinf	[m²]	-
Discharge	Infiltration rate	Qf out	[m³/s]	-
	✓ Limited discharge rate	Qf out	[m³/s]	0.012
	Inlet flow rate (if any)	Qf in	[m³/s]	-
	Discharge rate specific	**qs**	**[mm/min]**	0.053
Water storage	Maximum storage height	ΔH max [m]	[m]	0.074
	Required storage volume	**Vmax**	**[m³]**	**1,258.22**
	Design storage volume	Vd	[m³]	**1,297.90**
TO CHECK	**Delta volume**	**ΔV**	**[m³]**	**-39.68**
	Emptying time	**Tv**	**[h]**	**28.72**

Tab. 5 | Sizing and verification for each type of technological solution and sub-catchment area (credit: the Authors, 2025).

Base Info	Parameters		Values
Return period	Tr	[yr]	20
Sub-Zone: A	KT (Tr= 20)	[adim]	1.84
APO: A5	b	[h]	0.1621
	m	[adim]	0.7748
Mean inst. intensity	μi0	[mm/h]	140.70
Discharge rate specific	qs	[mm/min]	0.05
Max. storage height	**ΔH max**	**[mm]**	**73.97**
	ΔH max	**[m]**	**0.07**
Rainfall duration max	t max	[min]	445
Rainfall height max	H max	[mm]	97.61
Discharge height max	h max	[mm]	23.64

Tab. 6 | Definition of maximum water storage heights (credit: the Authors, 2025).

la letteratura[5]. L'applicazione simultanea di questi componenti nella modellazione delle superfici ex ante ed ex post consente di calcolare i valori di superficie attiva (Sa) e superficie di apporto (Sapp) a partire dalla superficie totale (Stot), ottenendo risultati processabili nei fogli Excel per il dimensionamento e la verifica del progetto (Fig. 6).

Il modulo di modellazione delle soluzioni contiene diciassette componenti, corrispondenti alle dieci soluzioni tecnologiche blu-verdi e grigie modellate e alle loro rispettive varianti. I componenti sono suddivisi, a seconda delle macro-strategie di gestione idrica cui fanno riferimento, nelle quattro categorie: Source Control, Water Diversion, Water Reception e Combined (Fig. 7). Ogni soluzione è modellabile sulla base di dati di ingresso, corrispondenti ai parametri dimensionali derivati dai manuali tecnici; variando i parametri di input all'interno di range prescritti è possibile visualizzare il variare di stratigrafie e risultati. Gli output consentono di verificare la conformità ai limiti dimensionali previsti ed estrarre dati quali superficie di infiltrazione (Sinf) eventuale e volume di stoccaggio idrico di progetto (Vd), da immettere nei fogli di calcolo (Fig. 8).

I tre fogli di calcolo, ciascuno con una funzione specifica ma interconnessa, elaborano i dati derivanti dalla modellazione per applicarli nelle verifiche di 'invarianza idraulica e idrologica'. Il primo foglio IDF Curve Construction – VAPI (Tabb. 2, 3), sulla base dei parametri di regionalizzazione previsti dal metodo VAPI, consente di costruire le curve IDF e determinare le altezze pluviometriche al variare dei tempi di ritorno (Tr), identificando le altezze corrispondenti all'evento meteorico di progetto da applicare nel metodo 'delle piogge' (Fig. 9).

Il secondo foglio, Project Area – Design Volumes (Tabb. 4, 5), comprende una tabella per l'area complessiva e un numero variabile di sotto-tabelle corrispondenti al numero di sotto-aree di captazione gestite da ciascuna tipologia di soluzione prevista. La prima tabella contiene, oltre alle informazioni di base dell'area di progetto, una sezione dedicata a paragonare la permeabilità ante e post-intervento sulla base dei valori di Sa estratti dal modello. Ciascuna sotto-tabella, a partire dalle informazioni contenute nella prima e dai dati provenienti dal modello parametrico (Stot, Sa, Sapp, Sinf, Vd), calcola per ciascuna tipologia di soluzione le portate di drenaggio (qs) e i volumi di stoccaggio idrico richiesti (Vmax) prevedendo due scenari alternativi: possibilità o impossibilità di infiltrare le acque piovane al suolo. Il confronto tra Vmax richiesto e Vd di progetto, frutto della modellazione, consente di verificare il soddisfacimento dei volumi residui (ΔV) e, rapportando Vd e qs, è valutato il rispetto dei tempi di svuotamento (ASTEE, 2017).

Il terzo foglio Maximum Storage Height (ΔH max)' fa da ponte tra i due precedenti (Tabb. 6, 7): le massime altezze di stoccaggio idrico richieste (ΔH max) sono calcolate analiticamente come differenza tra le altezze di pioggia derivanti dal primo foglio e le portate di drenaggio estratte dal secondo (Fig. 10); ΔH max, reimmesso nel secondo foglio, completa il dimensionamento consentendo di determinare il Vmax richiesto.

Lo strumento nel suo complesso, a partire da dati di contesto e applicando metodologie consolidate, supporta la progettazione orientando i processi di predimensionamento e verifica di soluzioni tecnologiche singole e multiple. La modellazione di soluzioni sostenibili di gestione idrica rappresenta una novità nel campo degli strumenti progettuali parametrici, unendo conoscenze tecnico-dimensionali e possibilità di modifica in tempo reale. La realizzazione di fogli di calcolo che rielaborano dati tecnici, climatici e normativi in tabelle strutturate è un secondo elemento chiave: esso consente un ruolo attivo e consapevole del progettista, rendendo espliciti i passaggi procedurali ed agevolando la comprensione metodologica. L'intuizione di unire fogli Excel e modellazione parametrica, oltre a ottimizzare i processi di calcolo, offre al progettista un ambiente operativo interattivo nel quale visualizzare e valutare il progetto, come mostrato dall'applicazione sul caso di studio.

Applicazione del WMs: dal lotto tipo al progetto pilota | Lo strumento è testato per l'applicabilità nella progettazione architettonica seguendo un processo incrementale in due fasi: una prima applicazione su un lotto tipo di circa 0,40 ettari; una seconda applicazione su un progetto pilota di circa 11 ettari localizzato nel quartiere di Edilizia Residenziale Pubblica di San Basilio a Roma. Quest'ultimo è selezionato in virtù delle sue condizioni climatiche, fisiche e sociali, inclusi l'elevato grado di impermeabilizzazione, la scarsa qualità degli spazi aperti e la presenza di una rete fognaria inadeguata e di scarichi non autorizzati verso l'ambiente.

Il lotto tipo, ipotizzato nel medesimo contesto climatico del progetto pilota, è stato introdotto per verificare la funzionalità dello strumento in un'area di minore complessità. Poiché i dati elaborati dai fogli Excel si basano già su metodologie consolidate, per testare la validità dello strumento parametrico il calcolo di superfici e volumi di progetto è stato svolto in un primo momento manualmente su AutoCAD e poi applicando il WMs toolbox. Il confronto tra i dati ottenuti ha evidenziato non solo la maggiore accuratezza garantita dall'interazione dinamica tra fogli di calcolo e strumento parametrico, ma anche il potenziale di snellimento delle fasi di dimensionamento, ottimizzando i parametri di progetto.

A seguito della modellazione dello stato di fatto sono elaborati tre scenari progettuali alternativi (verde-blu, verde-blu e grigio, verde-blu naturalistico) ciascuno caratterizzato da soluzioni tecnologiche differenti per forma e natura (Fig. 11). Per ogni scenario si è proceduto al dimensionamento per tempi di ritorno (Tr) ventennali[6], assumendo condizioni di suolo sia favorevoli sia sfavorevoli all'infiltrazione, ottenendo così sei scenari complessivi. In ogni scenario sono state individuate specifiche aree di captazione per ciascuna tipologia di soluzione, ottimizzate grazie alla modellazione parametrica. Mantenendo costante l'impronta al suolo di ogni soluzione e variando i parametri di input in funzione delle diverse condizioni di contesto, gli scenari sono stati comparati valutandone la performance ed evidenziando l'influenza del contesto sul dimensionamento e sulla scelta dei dispositivi (Fig. 12). I risultati mostrano come una condizione di suolo favorevole possa contribuire a ridurre dal 12 al 27% i volumi di stoccaggio minimi richiesti rispetto agli scenari impermeabili, a parità di soluzioni progettuali utilizzate. Inoltre, sebbene l'uso di soluzioni intensive grigie possa mostrarsi efficace in caso di suoli particolarmente permeabili (scenario 2), l'uso diffuso di soluzioni

verdi-blu si attesta comunque come maggiormente efficace nei casi di suoli sfavorevoli all'infiltrazione. Ciò è dimostrato dai risultati raggiunti dagli scenari 1 e 3, i quali mostrano una riduzione rispettivamente del 33% e del 39% rispetto alle condizioni ante operam.

Considerando come spesso la permeabilità dei suoli urbani risulti compromessa dagli interventi di antropizzazione, appare evidente l'importanza di prediligere, laddove possibile, soluzioni vegetate: queste evidenze hanno orientato l'applicazione dello strumento al progetto pilota di San Basilio, con l'obiettivo di elaborare proposte architettoniche innovative basate esclusivamente su tecnologie verdi-blu.

In San Basilio lo strumento è stato testato nella sua interezza. L'applicazione del toolbox parametrico alle condizioni ex ante consente di simulare le direzioni preferenziali del deflusso nel sito (Fig. 13) e analizzare lo stato delle superfici, caratterizzate da elevati coefficienti di runoff.

Il progetto, ispirato a casi studio internazionali simili per obiettivi, strategie e scala, si propone di rivitalizzare le corti e le aree verdi come elementi centrali in grado di ricevere la maggior parte dei volumi di pioggia. Tra i diciassette progetti europei sono stati pertanto selezionati quelli che presentano la 'water reception' come macro-strategia principale, integrando strategie complementari di 'water diversion' e 'source control'. Sono stati analizzati nel dettaglio due ecoquartieri – Des Docks a Saint-Ouen e Île Seguin a Boulogne-Billancourt – e la Watersquare Benthemplein a Rotterdam, rappresentativi della capacità di realizzare spazi urbani adattivi multifunzionali, integrando grandi capacità di accumulo idrico a funzioni fruitive e sociali.

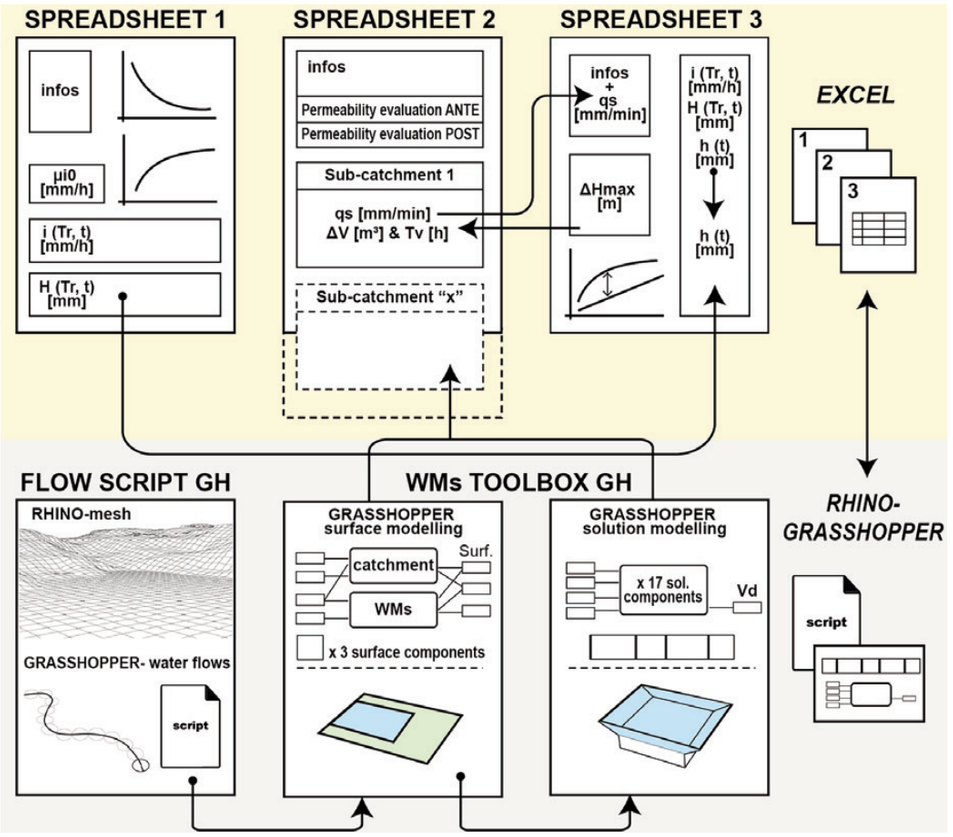
Il progetto elaborato integra alla de-impermeabilizzazione dei suoli, sistemi per lo stoccaggio delle piogge intense, l'accumulo delle acque piovane, la fitodepurazione delle acque grigie e il retrofitting tecnologico degli edifici e degli spazi aperti (Fig. 14). Tra le soluzioni proposte sono state dimensionate quelle per lo stoccaggio delle piogge intense; in assenza di dati certi sulla permeabilità dei suoli, ci si è posti nella condizione più realistica di impossibilità di infiltrazione e, in mancanza di dati sui limiti di scarico imposti dal gestore idrico, si è utilizzato un valore cautelativo di 7 l/s/ha coerente con lo stato critico del sistema fognario.

L'area, articolata e complessa, è stata suddivisa in cinque aree di captazione, corrispondenti alle cinque tipologie di soluzioni impiegate (Fig. 15), ciascuna ulteriormente ripartita in sottobacini secondo il criterio della contiguità tra dispositivi. Attraverso un processo iterativo di modellazione e ottimizzazione, superfici e soluzioni sono state dimensionate per ciascuna area, assumendo un tempo di ritorno di venti anni, ad eccezione delle piazze d'acqua, verificate anche per Tr = 50 anni, data la loro natura infrastrutturale complessa. Il confronto tra stato di fatto e progetto ha evidenziato miglioramenti significativi (Fig. 16): la superficie impermeabile si è ridotta dall'80% al 14%, il coefficiente di runoff totale è calato del 31% e i volumi minimi di stoccaggio richiesti si sono contratti del 24%, pur in assenza di infiltrazione. Le soluzioni sono state infine confrontate in base alla loro capacità di stoccaggio, dipendente dalla loro natura maggiormente intensiva o estensiva, e dal numero di soluzioni per tipologia adottate. Nella sua configurazione finale, il modello ha integrato tutte le informazioni progettuali derivanti dal dimensionamento di 11 piazze d'acqua, 47 bioswales, 17 aree di bioritenzione vegetata, 6 bacini di detenzione e 4 tetti di ritenzione (Fig. 17).

Conclusioni e sviluppi futuri | Il contributo segna un avanzamento nel campo della progettazione resiliente, fornendo uno strumento innovativo per la modellazione e la valutazione delle soluzioni di gestione delle acque piovane a supporto delle varie fasi della progettazione, a partire da quella del concept progettuale, fino alle scelte di indirizzo progettuale e di impostazione del progetto di fattibilità tecnico economica. L'oggetto e l'applicazione della ricerca sono di estrema urgenza e attualità nei nostri contesti climatici, che vedono il verificarsi sempre più frequente di fenomeni estremi legati all'acqua, minacciando città, economie, comunità e vite umane. Lo strumento si contraddistingue per la sua immediatezza d'uso a fronte di workflow e algoritmi complessi, rendendolo particolarmente efficace nelle fasi meta-progettuali.

Supportato dalla progettazione parametrica, lo strumento WMs semplifica le fasi di pre-dimensionamento e verifica offrendo componenti flessibili in grado di modellare e comparare molteplici soluzioni e scenari alternativi in tempo reale. La simulazione dei flussi idrici inclusa nello strumento si somma alle informazioni preliminari in possesso del progettista, sostenendone il processo ideativo e creativo. L'in-

Time		Rainfall intensity and height		Discharge height	Max. storage height
[min]	[h]	[mm/h]	[mm]	[mm]	[mm]
10	0.17	149.67	24.94	0.53	24.41
15	0.25	125.64	31.41	0.79	30.61
20	0.33	108.93	36.31	1.06	35.24
25	0.41	96.57	40.23	1.32	38.91
30	0.5	87.01	43.50	1.59	41.91
35	.	79.37	46.30	1.85	44.44
40	0.66	73.12	48.74	2.12	46.62
45	0.75	67.88	50.91	2.39	48.52
50	0.83	63.42	52.86	2.65	50.21
[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
430	7.16	13.50	96.81	22.84	73.96
435	7.25	13.39	97.08	23.11	73.97
440	7.33	13.27	97.35	23.37	73.97
445	**7.41**	**13.16**	**97.61**	**23.64**	**73.97**
450	7.5	13.05	97.88	23.90	73.97
455	7.58	12.94	98.14	24.17	73.97
460	7.66	12.83	98.40	24.44	73.96
465	7.75	12.73	98.66	24.70	73.95
470	7.83	12.62	98.91	24.97	73.94
475	7.91	12.52	99.16	25.23	73.93
480	8	12.42	99.41	25.50	73.91
[...]	[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
1440	24	5.36	128.64	76.50	52.13



Tab. 7 | Comparison between rainfall heights and drained heights through the technological solution over time (credit: the Authors, 2025).

Fig. 1 | Illustrative diagram of the different parts composing the integrated tool (credit: the Authors, 2025).

tegrazione tra fogli di calcolo e toolbox parametrico consente di valutare l'efficacia delle soluzioni sulla base di metodi verificati.

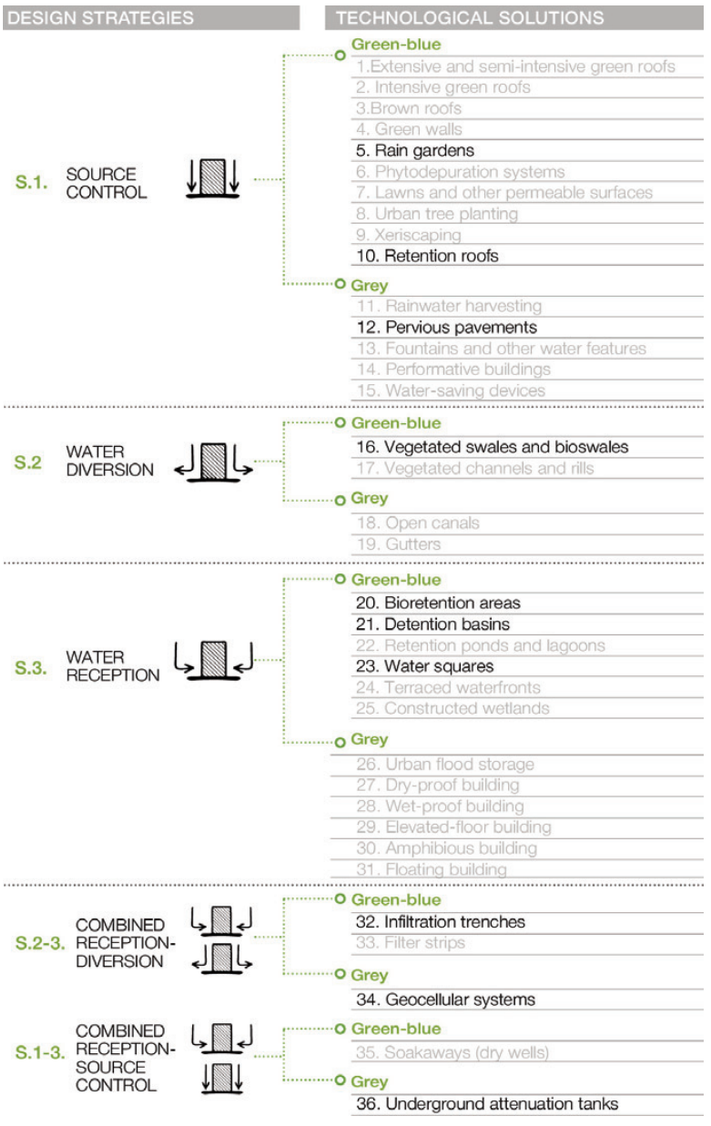
La sperimentazione in un progetto pilota rafforza la validità scientifica e pratica della ricerca: il passaggio applicativo dal lotto tipo al progetto pilota evidenzia la capacità dello strumento di adattarsi a modelli di scala e complessità crescenti, gestendo un elevato numero di parametri e variabili progettuali. I risultati ottenuti sono trasferibili a diversi contesti climatici e territoriali, prevedendo la possibilità futura di estendere i fogli Excel inglobando modalità di calcolo alternative di pluviometrie e volumi in funzione delle esigenze locali.

La componente Excel potrebbe inoltre supportare scenari di dimensionamento più complessi, come condizioni miste di parziale infiltrazione nel sottosuolo unita a portate di scarico costanti. Ciò risulterebbe utile in tutti quei contesti caratterizzati da un suolo con prestazioni scarse, ma che non ne compromettono la parziale possibilità di infiltrazione. Occorre tuttavia sempre considerare due aspetti fondamentali: come l'applicabilità dei metodi proposti dipenda dalla conformità alle eventuali prescrizioni regionali e locali e agli strumenti di pianificazione vigenti, e come, nella fase di definizione esecutiva del progetto, i risultati debbano essere verificati tramite modellazioni idrologiche e idrauliche più complesse.

Lo sviluppo del progetto pilota ha dimostrato inoltre come, per un'efficace applicazione dello strumento, sia necessario avere accesso a una serie di informazioni locali non sempre disponibili. Pertanto il WMs potrebbe interagire in futuro con altre piattaforme, divenendo parte di uno strumento più ampio (Fig. 18) capace di raccogliere open data regionali e locali e mappe tematiche a base GIS, agevolando il reperimento di informazioni tecniche e normative e accompagnando i progettisti in un processo decisionale più informato.

Infine, poiché progettare per aumentare il grado di adattamento e resilienza climatici implica conoscenze e valutazioni multiple e interconnesse, l'interazione dinamica con altre strumentazioni parametriche e generative esistenti per le valutazioni microclimatiche e ambientali potrebbe fornire un quadro di insieme a più variabili in grado di orientare il progetto verso le scelte più efficaci e sostenibili. In prospettiva lo strumento offre un'opportunità concreta per integrare in modo più strutturato la gestione idrica all'interno del processo progettuale, colmando il divario tra conoscenze tecniche specialistiche e pratica architettonica. La capacità di riorganizzare dati eterogenei – tecnici, climatici e normativi – in un flusso operativo coerente consente di ridurre i tempi di analisi e aumentare la qualità e la consapevolezza delle scelte. Sul piano strategico lo strumento può contribuire alla diffusione di pratiche resilienti, favorendo un maggiore allineamento tra strumenti di pianificazione e azione progettuale. Lontano dall'essere uno strumento concluso, il WMs rappresenta una base operativa aperta a futuri sviluppi interdisciplinari, in coerenza con le sfide climatiche e ambientali del nostro tempo.

Global warming is significantly altering the natural hydrological cycle (Masson-Delmotte et alii, 2021), making extreme water-related events more frequent and severe. Since 2000, floods have increased by 134% and droughts by 29% (WMO, 2021): climate change is producing an intensification and acceleration of the hydrological cycle (Vahid et alii, 2009), with short, high-intensity rainfall events that, however, do not necessarily entail an overall increase in precipitation. In the most vulnerable regions, such as the Mediterranean hotspot, extreme rainfall and



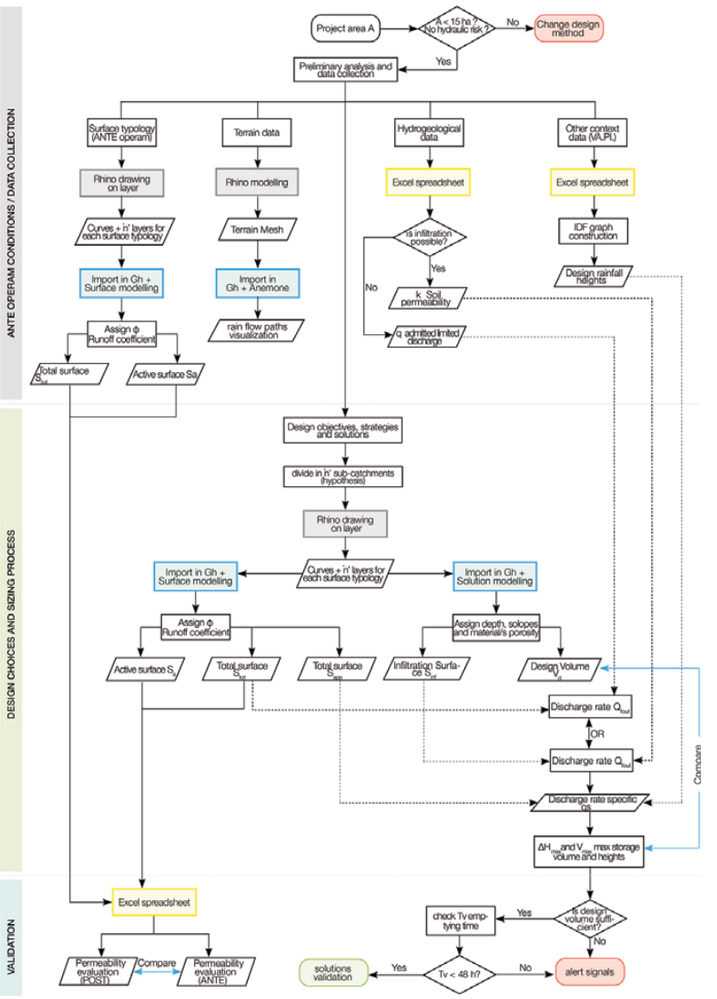


Fig. 2 | The ten technological solutions selected from the thirty-six mapped green-blue and grey solutions (credit: the Authors, 2025).

Fig. 3 | Flow diagram supporting the development of the integrated Rhino-GH and Excel tool (credit: the Authors, 2025).

flash flooding events combine with prolonged drought periods, exacerbating risk conditions for cities (EEA, 2024).

The progressive artificialisation of urban soils has reduced their permeability and infiltration capacity, and accelerated runoff times, resulting in faster flows toward receptors and earlier, more intense flood peaks. Traditional drainage infrastructures, often obsolete or undersized, are therefore ineffective. Quantitative issues related to flooding and erosion are compounded by qualitative ones due to runoff water pollution, with significant ecosystem repercussions (Negretto et alii, 2021).

Managing stormwater from extreme events thus plays a strategic role in the international debate. Architectural and urban design play a key role in introducing green-blue and grey solutions (UN-Habitat, 2024) that strengthen the resilience of urban spaces and help restore the ecological balance of cities. These solutions align with the Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda (UN, 2015), acting directly on the sustainable and integrated management of water resources (SDG 6) and, transversally, on the urban system by promoting resilient and inclusive cities (SDG 11), circular models of resource management (SDG 12), and climate action (SDG 13).

Integrated design approaches combine ecological recovery and reuse solutions with sustainable urban drainage systems; however, for these to be effective, a complete understanding of the multiple environmental dynamics involved is required from the early stages of project development. Recent studies have developed simulation and urban modelling tools in this sense, demonstrating the importance of multi-resource approaches to support resilient design. The use of integrated platforms allows the correlation of water management with energy performance and microclimatic conditions (Tucci et alii, 2022; Valente et alii, 2024), highlighting synergies that enable ecological and sustainable management of natural resources and fostering the development of more effective and interconnected governance models. In this context, the research proposes complementing existing strategic tools with new operational tools that integrate water simulation and technological modelling, grounded in technical data and local regulations. Indeed, while the use of multiple microclimatic simulation software tools is consolidated in design practice (Ibrahim, Kershaw and Shepherd, 2020), water simulation is often associated with specialised expertise, and its integration into architecture remains an open field of investigation (Leskens, Brugnach and Hoekstra, 2014). Parametric design environments enable the development of algorithms to represent meteorological phenomena and assess risk scenarios (Morschek, König and Schneider, 2019); however, these tools do not directly support the selection and technical verification of design solutions for managing extreme climatic events.

This research stems from these considerations to develop an integrated tool for the preliminary design of resilient urban stormwater management solutions. This objective guides the formulation of the Water Management systems (WMs), a tool based on the interaction between parametric workflows and spreadsheets. Experimental and multidisciplinary in nature, the WMs combines design expertise and technical assessments with the principles of regenerative urban hydrology while ensuring consistent application of local regulations.

In particular, the tool supports the application of 'hydraulic and hydrological invariance' checks[1] required in certain Italian regions for the design of sustainable drainage solutions. However, the non-systematic adoption of these checks across the national territory and the methodological fragmentation[2] among regions make these principles difficult to apply in architectural design. The WMs offer an original reworking of consolidated calculation methods, reorganising specialised knowledge into an easily accessible database and spreadsheets usable by designers. Moreover, the innovative integration of parametric modelling tools enables informed modelling of each solution and real-time visualisation within specific urban contexts, facilitating sizing and verification. This paper first outlines the reference context, situating the tool within the landscape of existing simulation and modelling instruments and motivating the research objectives. It then presents the methodological process and the working phases that led to the formulation of the tool, followed by a description of its components and functions. The tool is tested on a pilot project, illustrating the application stages and results obtained. Finally, the conclusions outline the potential and limitations of the WMs, opening up prospects for future research.

Simulation and modelling for water management | Simulation and modelling activities play a key role in managing environmental dynamics; when carried out ex ante and ex post, they help guide design choices toward the most effective alternatives within a performance-based approach (Dierna, 1995). Microclimatic simulation software has been employed to support and validate adaptation and environmental mitigation projects: innovative design experiences have used high-resolution tools such as ENVI-met (Tucci et alii, 2022; Valente et alii, 2024), or parametric simulations performed through Ladybug Tools (Zarcone, Nava and Tucci, 2024), demonstrating the interrelations among multiple urban networks, including energy, bioclimatic, and natural resource systems. At the same time, experimental approaches have been developed that combine environmental simulation with generative algorithms based on artificial intelligence, capable of triggering adaptive design strategies (Nava and Melis, 2024).

However, integrated management of water resources, central to achieving climate and environmental goals, requires specialised simulation and modelling tools that support both technical and design evaluations from the earliest stages. Hydrological simulation programs allow the diagnosis of extreme meteorological events and the reproduction of physical runoff and drainage phenomena in networks; however, they require specialised expertise for correct modelling and post-processing of results, while the standardisation of technical solutions produced appears insufficient when compared to the range of alternative, sustainable solutions potentially applicable in design (Leskens, Brugnach and Hoekstra, 2014).

Within this framework, parametric modelling environments have progressively emerged as digital laboratories integrating design and environmental simulation (Marin, 2018). Among the most widely used platforms, Rhinoceros-Grasshopper (Rhino-GH) stands out for its high expandability and execution speed, enabling multiple analyses within the same environment, features that make it particular-

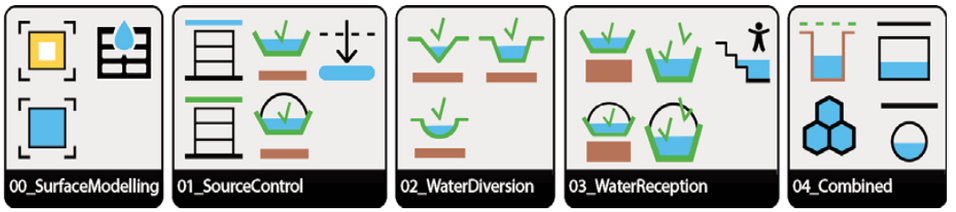


Fig. 4 | The WMs toolbox interface in GH with the component bar (credit: the Authors, 2025).

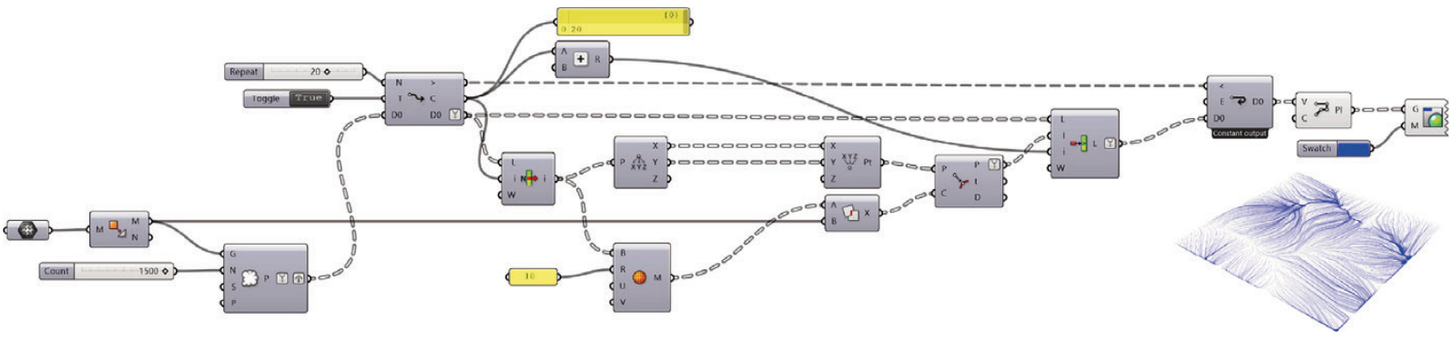


Fig. 5 | The water flow visualisation script (credit: the Authors, 2025).

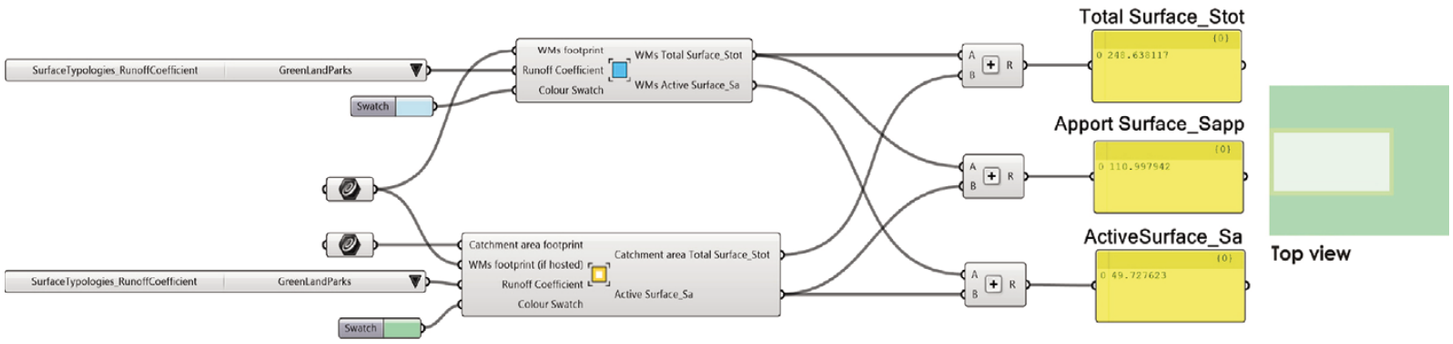


Fig. 6 | Example of the application of Surface Modelling components for calculating project surfaces (credit: the Authors, 2025).

ly effective for dynamic simulation of hydrological behaviour and its correlation with integrated design strategies. An important phase of this research, therefore, involved mapping the available resources within Rhino-GH to establish an updated, critical state-of-the-art that would serve as the knowledge base for defining a new design tool.

The set of tools developed within Rhino-GH for integrating water resources into design processes can be grouped into two main macro-categories: simulation plug-ins, aimed at representing meteorological events; and simulation and assessment toolkits. Simulation plug-ins can be further classified as simplified, logic-based, or physics-based, and visualise water flows over topographies using predefined Rhino interfaces, customised scripts built on iterative cycles, or physical simulations of particle collisions. In parallel, simulation and assessment toolkits associate the representation of runoff with a design or performance dimension: the Performance Workflows included in Land Kit allow the hydraulic modeling of flows and storage volumes based on North American climate parameters; the Spatial Resilience Toolbox – Flooding (SRTF) enables the simulation of runoff, river flood, and tidal scenarios, and evaluates risks of flooding, runoff, and erosion at the urban scale (Morschek, König and Schneider, 2019).

A comparative analysis of hydrological simulation and modelling tools (Tab. 1) highlights several critical issues, including limited adaptability to national climatic and regulatory contexts, obsolescence or reliance on licenses, and reliance on non-customisable user scripts. Using physics-based tools increases simulation time and complexity, without necessarily providing additional information for preliminary design compared to iterative logic-based simulations. Furthermore, while risk assessment toolkits are essential during strategic planning, they do not directly support the operational design of resilient solutions for managing urban stormwater.

From these identified limitations arises the need for an operational tool that integrates simulation, modelling, and technical verification into a coherent workflow. The goal of this research is to develop a procedure that assists designers in the preliminary phases of selecting, sizing, and verifying design solutions for resilient urban stormwater management by integrating climatic data, local regulations, and technical information into a flexible, user-friendly instrument. The WMs tool is designed to overcome the limitations of specialised knowledge by adopting methodologies accessible to designers and providing access to a structured database of information for practical application.

The WMs combines water flow visualisation capabilities, well established in literature, with specific modules aimed at designing sustainable stormwater management solutions, integrating parametric modeling of surfaces and design elements with spreadsheets for validating data extracted from the model (Fig. 1). The tool supports more informed design decisions, offering a focus on water management within an integrated resource management framework that is essential for creating resilient urban ecosystems.

Methodological context and work phases | The research methodology, based on a critical analysis of the state of the art, is structured into a preliminary phase followed by an operational phase for the construction of the WMs. The preliminary phase consists of selecting the solutions to model in the parametric toolbox and choosing the methods to implement in the spreadsheets.

The selection of resilient stormwater management systems is part of a broader methodological process based on the analysis of technical manuals and international guidelines (Woods Ballard et alii, 2015), as well as the critical analysis of seventeen European case studies chosen for their replicability in Mediterranean and consolidated urban contexts. The comparative analysis of the case studies made it possible to identify three recurring architectural macro-strategies for water management (water diversion, water reception, and source control), which served as a basis for classifying the thirty-six solutions mapped in the literature. The solutions were further filtered based on criteria of consistency with urban runoff control objectives, relevance to mitigating extreme events, and feasibility of accurate modelling within the Rhino-GH environment, leading to the final selection of ten devices to be modelled in the toolbox (Fig. 2).

The selection of spreadsheet structure methods is based on two key criteria: applicability during the preliminary design phases and regulatory compliance. Simplified methods are generally recommended for preliminary design, while more complex modelling is used in executive phases (ASTEE, 2017). Among the sizing methods proposed by regulations and guidelines on hydraulic and hydrological invariance, the 'simplified rainfalls design method'[3] was selected. This method allows for the analytical estimation of the required water storage volumes by comparing the rainfall depths over the area with the drained depths of the technological solutions. A prerequisite for its application is knowledge of the Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves, which are required to define the design rainfall heights. For their estimation, the research examines the VAPI method, based on a process of regionalisation of intense rainfall events in Italy[4] (Ferrari and Versace, 1994), which makes it possible to overcome problems associated with the absence or incompleteness of historical pluviometric data, thereby making its use particularly effective in the preliminary design phase.

The operational construction of the tool is based on preliminary analyses and is structured into three main work stages. The first phase consists of creating a structured database of regulatory and technical information. The database contains the data necessary for the application of the 'rainfalls design method' and the VAPI method, as well as the criteria to be adopted in the design of water management systems, derived from manuals and guidelines and reorganised into technical sheets. The set of information organised in the database forms the knowledge base for properly structuring the spreadsheets and creating parametric workflows suitable for modelling the ten selected technological solutions.

The second work phase focuses on creating three spreadsheets (Tabb. 2-7) aimed at constructing the IDF curves using the VAPI method and determining the design volumes and maximum storage depths using the 'rainfalls design method'. The spreadsheets extract information from the database and reorganise it to optimise data input and extraction. Since the parametric modelling required a longer time frame, the spreadsheets were initially tested in a 'static' mode to verify their correct operation. Each spreadsheet was designed to be potentially independent, with the possibility of extending the adopted calculation methodologies according to local climatic and regulatory requirements.

Finally, the third phase consists of developing the parametric toolbox in the Rhino-GH environment. An iterative script built with the logic-based plug-in Anemone simulates water paths across the area (Claghorn, 2016), while modelling surfaces and design solutions aim to create customised components that can expand GH libraries through the active and informed design of water management systems. The solutions are modelled by abstracting their constituent components and diversifying possible configurations.

To ensure maximum model flexibility, all components are modelled from input curves drawn in Rhino and imported into GH, and are designed to function regardless of the input curves' orientation. For complex scripts, each component is enclosed within practical-use clusters that contain all the information necessary to guide the designer in entering input parameters and verifying output data, in consis-

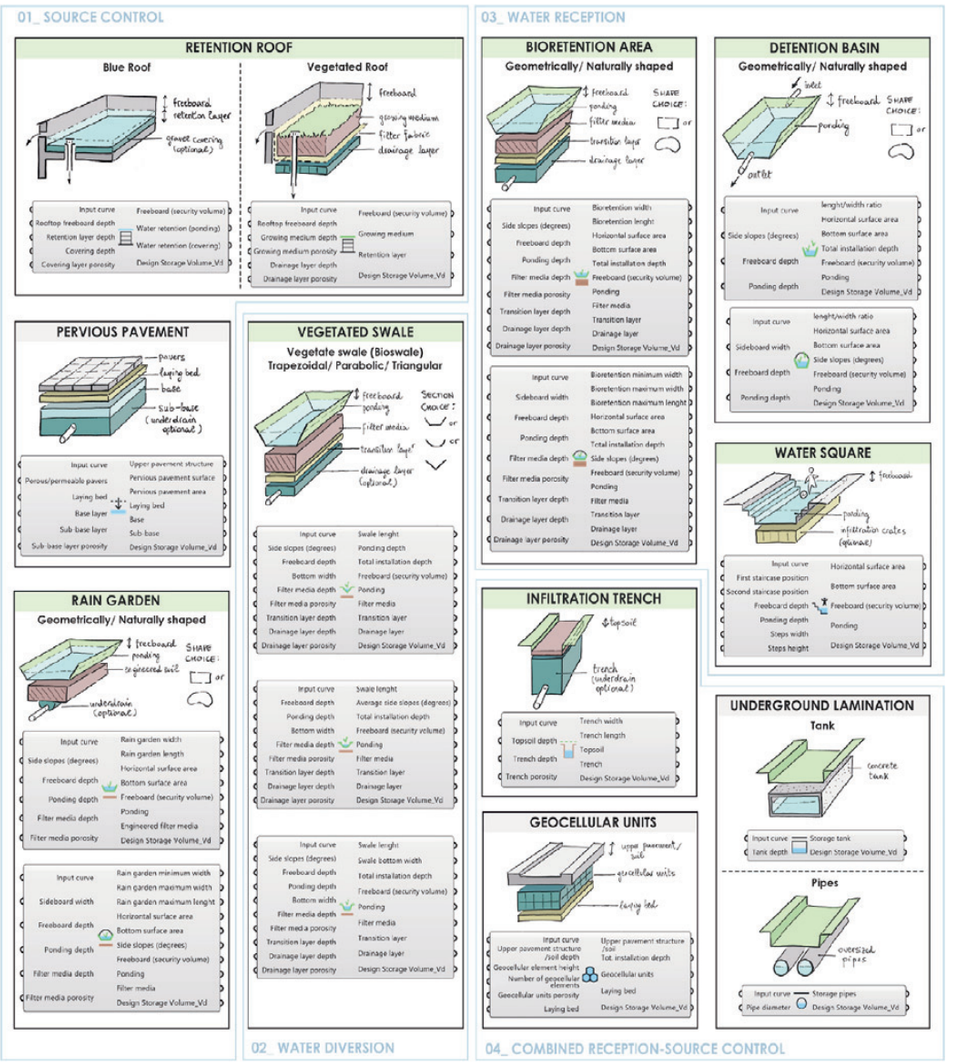


Fig. 7 | General overview of the water management solution modelling components, divided into four categories and supported by drawings (credit: the Authors, 2025).

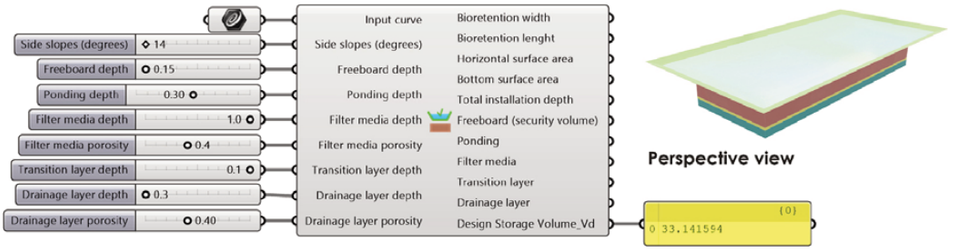


Fig. 8 | Example of Solution Modelling components applied to a vegetated bioretention area and calculation of the design water storage volume (credit: the Authors, 2025).

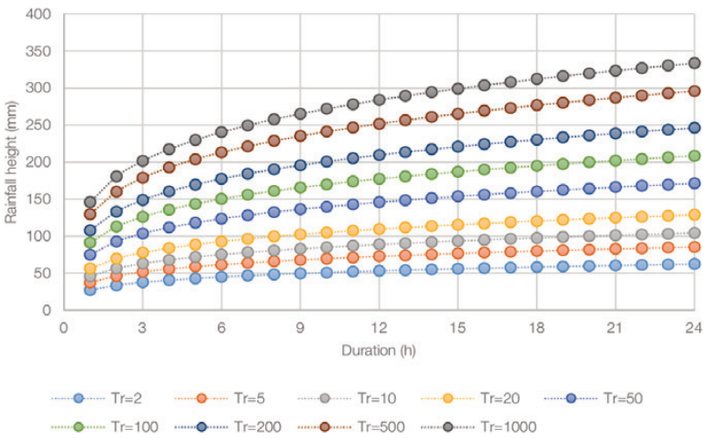


Fig. 9 | Graph of rainfall heights obtained using the first WMs spreadsheet for the Fosso di Pratolungo Meteorological Station in Rome (credit: the Authors, 2025).

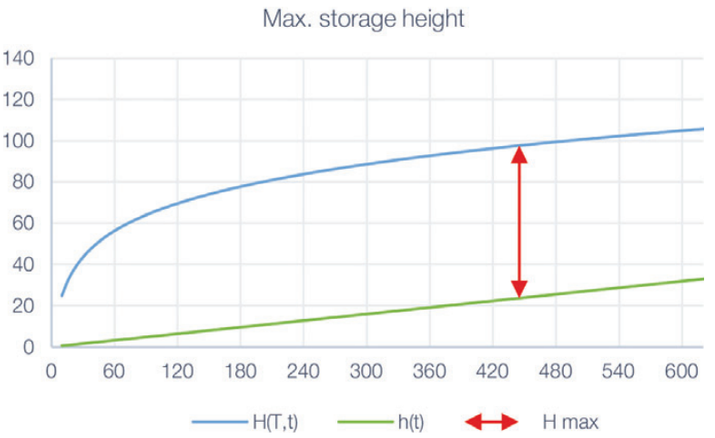
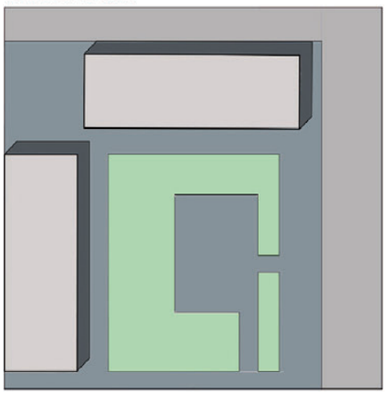
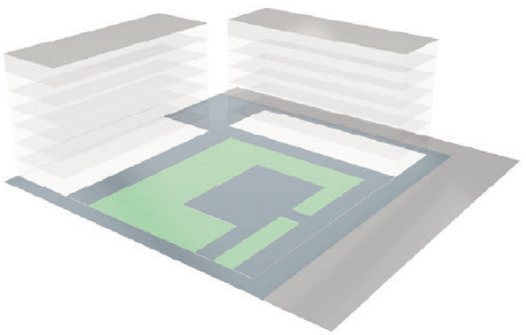


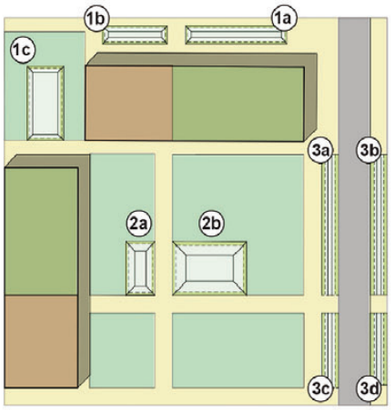
Fig. 10 | Example of the analytical definition of maximum water storage heights in the third WMs spreadsheet (credit: the Authors, 2025).

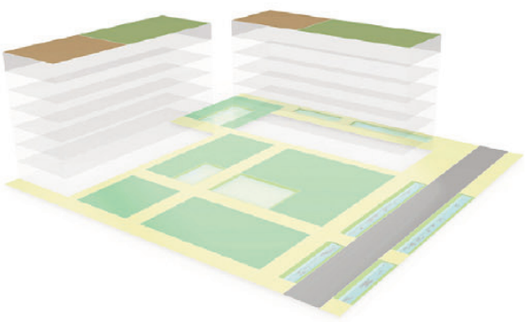
ANTE OPERAM



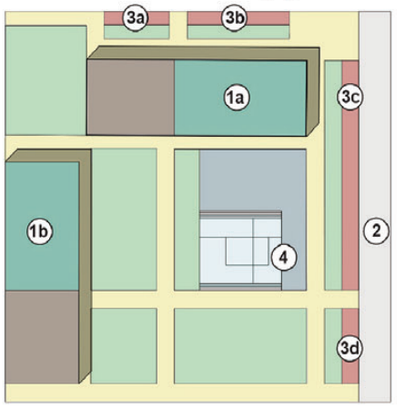


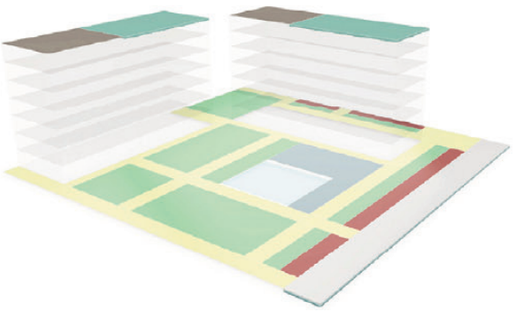
SCENARIO 1: Green-blue



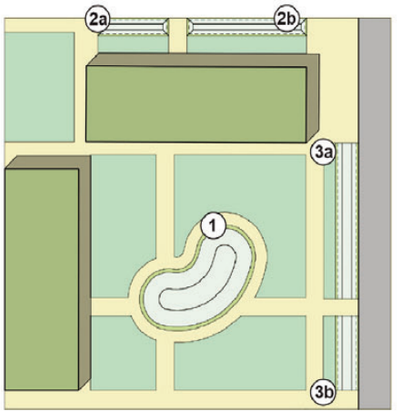


SCENARIO 2: Green-blue and gray





SCENARIO 3: Green-blue naturalistic



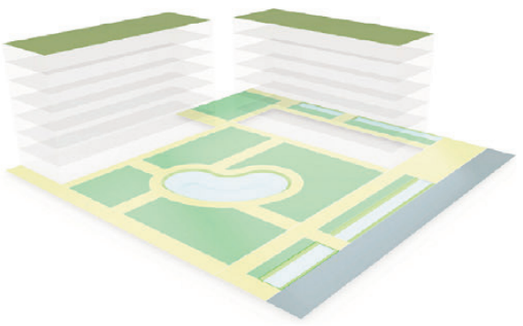
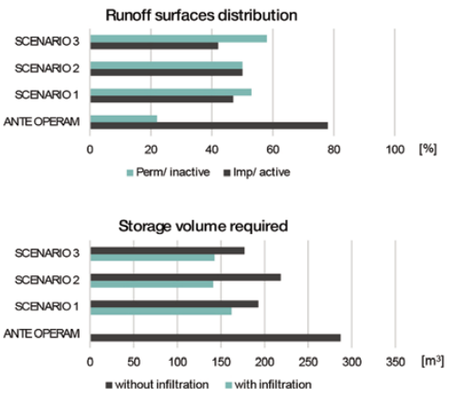


Fig. 11 | Comparison between ex ante and ex post scenarios of the standard lot (credit: the Authors, 2025).

Fig. 12 | Comparative evaluation between ex ante and ex post scenarios of the standard lot (credit: the Authors, 2025).



tency with the information collected in the database.

The WMs Tool: Components and Functions | The WMs tool consists of the parametric toolbox, which interacts with the three spreadsheets. The overall functioning is developed based on a general flowchart (Fig. 3), which allows visualisation of the interactions among design variables, logical processes, and choices at different stages of the project.

The parametric toolbox is divided into three modules: a water flow visualisation script, a Surface Modelling section, and a Solution Modelling section. The interface of the toolbox is minimal: the ten solutions with their respective variants, and the three surface tools (for a total of 20 components), are organised into five categories (Fig. 4). To visualise water flows, a script (Fig. 5) is provided that, once the topography is imported, allows progressively increasing iteration cycles to display runoff in real time as polylines. The adoption of a logic-based, rather than a physics-based, water simulation method provides an immediate tool that effectively supports the analysis of the existing condition and guides preliminary decisions, such as the optimal location of solutions or topographic modifications to the area.

The surface modelling module includes three components: the first, Catchment Surfaces, is used for modelling stormwater runoff surfaces; the second, Reception Surfaces-WMs, is intended for modelling the surfaces occupied by water management solutions designed to contain runoff; the third, Surface Typologies-Runoff Coefficient, consists of a value list of runoff coefficients based on the literature[5]. The simultaneous application of these components in the ex ante and ex post surface modelling allows the calculation of the active surface area (Sa) and contributing surface area (Sapp) from the total surface area (Stot), producing results that can be processed in Excel spreadsheets for project sizing and verification (Fig. 6).

The solution modelling module contains seventeen components corresponding to the ten blue-green and grey technological solutions, along with their respective variants. The components are divided, according to the water management macro-strategies they refer to, into four categories: Source Control, Water Diversion, Water Reception, and Combined (Fig. 7). Each solution can be modeled based on input data corresponding to dimensional parameters derived from technical manuals; by varying the input parameters within prescribed ranges, it is possible to visualise changes in stratigraphy and results. The outputs allow verification of compliance with the prescribed dimensional limits and the extraction of data, such as the possible infiltration surface (Sinf) and the design water storage volume (Vd), which are then entered into the spreadsheets (Fig. 8).

The three spreadsheets, each with a specific but interconnected function, process the data derived from the modelling to apply them in the verification of hydraulic and hydrological invariance. The first sheet, IDF Curve Construction – VAPI (Tabb. 2, 3), based on the regionalisation parameters established by the VAPI method, allows the construction of IDF curves and the determination of rainfall heights according to varying return periods (Tr), identifying the heights corresponding to the design rainfall event to be applied in the rainfall method (Fig. 9).

The second sheet, Project Area – Design Volumes (Tabb. 4, 5), includes one table for the overall area and a variable number of sub-tables corresponding to the number of sub-catchment areas managed by each type of solution. The first table, in addition to basic information on the project area, includes a section comparing permeability before and after the intervention, based on Sa values extracted from the model. Each sub-table, starting from the information contained in the first and the data coming from the parametric model (Stot, Sa, Sapp, Sinf, Vd), calculates for each solution type the drainage flow rates (qs) and the required water storage volumes (Vmax), considering two alternative scenarios: the possibility or impossibility of infiltrating rainwater into the ground. The comparison between the required Vmax and the design Vd obtained from modelling allows verification of the satisfaction of residual volumes (ΔV), and by comparing Vd and qs, the compliance with emptying times is evaluated (ASTEE, 2017).

The third sheet, Maximum Storage Height (ΔH max), acts as a bridge between the previous two (Tabb. 6, 7): the maximum required storage heights (ΔH max) are analytically calculated as the difference between the rainfall heights derived from the first sheet and the drainage flow rates extracted from the second (Fig. 10). The ΔH max value, introduced into the second sheet, completes the sizing process by allowing the determination of the required Vmax.

The tool, as a whole, starting with contextual data and applying established methodologies, supports design by guiding the pre-sizing and verification processes for single and multiple technological solutions. The modelling of sustainable water management solutions represents an innovation in the field of parametric design tools, combining technical-dimension knowledge with real-time modification capability. The creation of spreadsheets that reprocess technical, climatic, and regulatory data into structured tables is a second key element: it enables an active and informed role for the designer, making procedural steps explicit and facilitating methodological understanding. The idea of combining Excel spreadsheets with parametric modelling, in addition to optimising calculation processes, provides the designer with an interactive operational environment for visualising and evaluating the project, as demonstrated in the case study application.

Application of the WMs: from the standard lot to the pilot project | The tool was tested for applicability in architectural design following an incremental two-phase process: an initial application on a standard lot of approximately 0.40 hectares, and a second application on a pilot project covering about 11 hectares, located in the Public Residential Housing (ERP) district of San Basilio, Rome. The latter was selected due to its climatic, physical, and social conditions, including a high degree of impermeabilisation, poor-quality open spaces, and an inadequate sewer network and unauthorised discharges into the environment.

The standard lot, assumed to be in the same climatic context as the pilot project, was introduced to verify the tool's functionality in a lower-complexity area. Since the data processed by the Excel sheets are already based on established methodologies, to test the validity of the parametric tool, the calculation of surfaces and design volumes was initially performed manually in AutoCAD and then repeated using the WMs toolbox. The comparison of the obtained data revealed not only the greater accuracy enabled by the dynamic interaction between the spreadsheets and the parametric tool, but also the

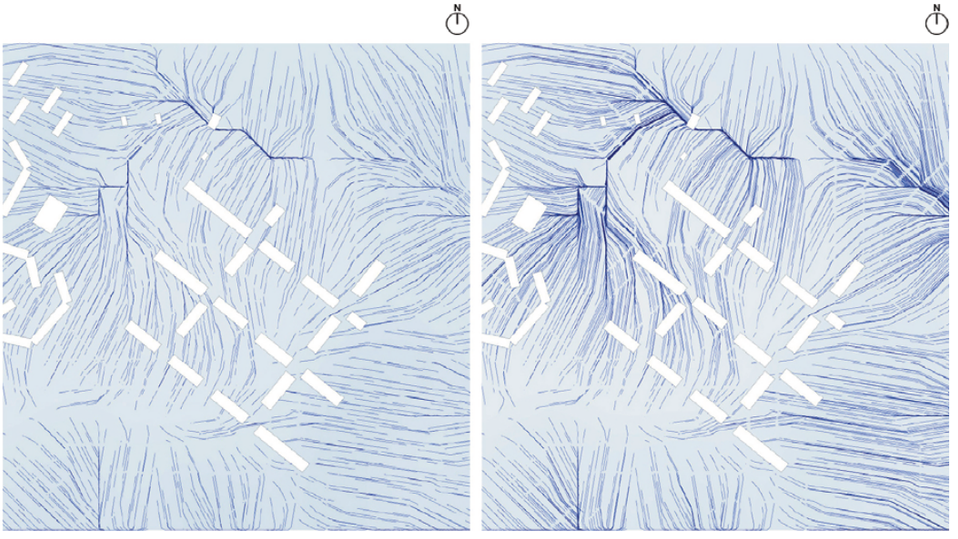


Fig. 13 | Predominant water flow direction on site under ex ante conditions after simulating 10 and 30 iterations in Anemone (credit: the Authors, 2025).

potential to streamline the sizing phases by optimising design parameters.

Following the modelling of the existing condition, three alternative design scenarios were developed (green-blue, green-blue and grey, green-blue naturalistic), each characterised by technological solutions differing in form and nature (Fig. 11). For each scenario, sizing was carried out for twenty-year return periods (Tr)[6], assuming both favourable and unfavourable soil infiltration conditions, thereby producing a total of six scenarios. In each scenario, specific catchment areas were identified for each solution type and optimised using parametric modelling. By keeping the footprint of each solution constant and varying the input parameters according to different contextual conditions, the scenarios were compared by evaluating their performance and highlighting the influence of context on sizing and device selection (Fig. 12).

The results show that favourable soil conditions can reduce the minimum required storage volumes by 12-27% compared to impermeable scenarios, with identical design solutions. Furthermore, although intensive grey solutions may prove effective in highly permeable soils (scenario 2), the widespread use of blue-green solutions remains more effective in cases of unfavourable soil infiltration. This is demonstrated by the results of scenarios 1 and 3, which show reductions of 33% and 39%, respectively, compared to pre-intervention conditions. Considering that the permeability of urban soils is often compromised by human development, the importance of prioritising vegetated solutions wherever possible becomes evident. These findings guided the application of the tool to the San Basilio pilot project, to develop innovative architectural proposals based

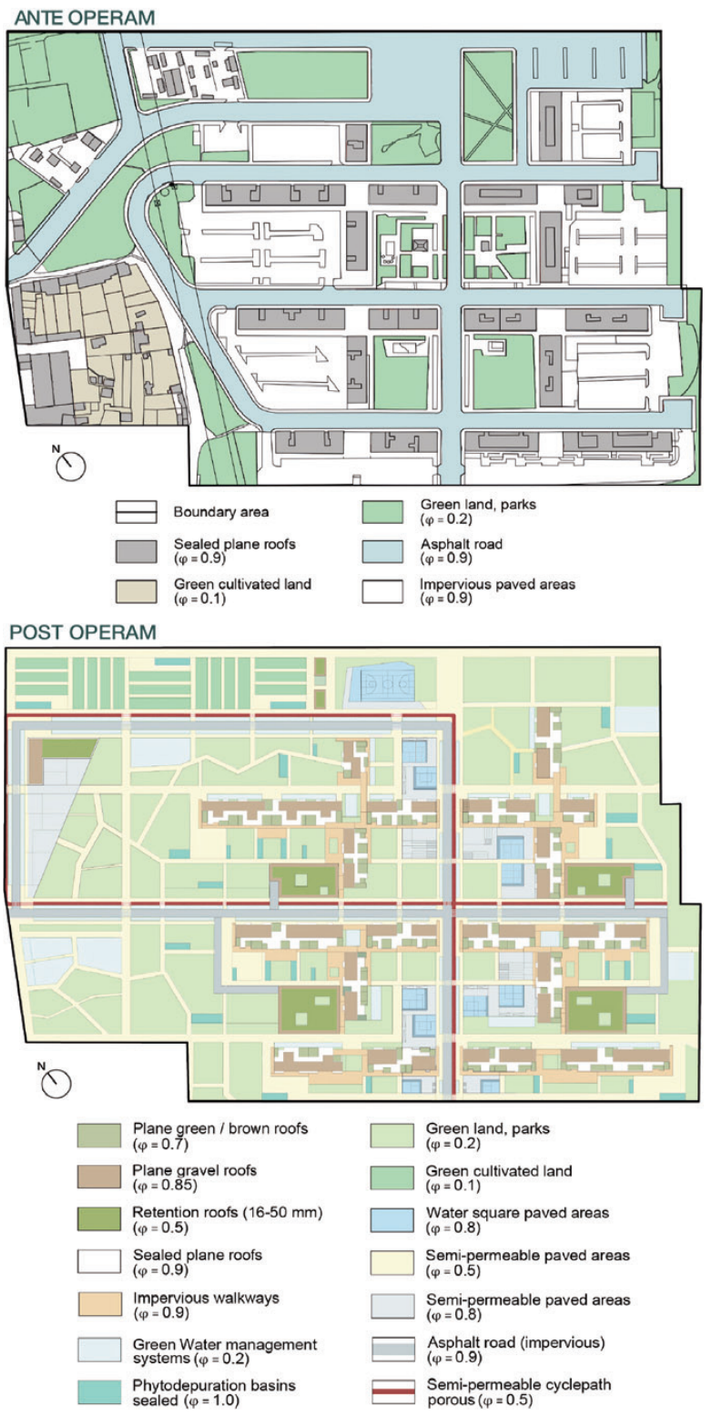


Fig. 14 | Comparison between ex ante and ex post scenarios of the pilot project (credit: the Authors, 2025).

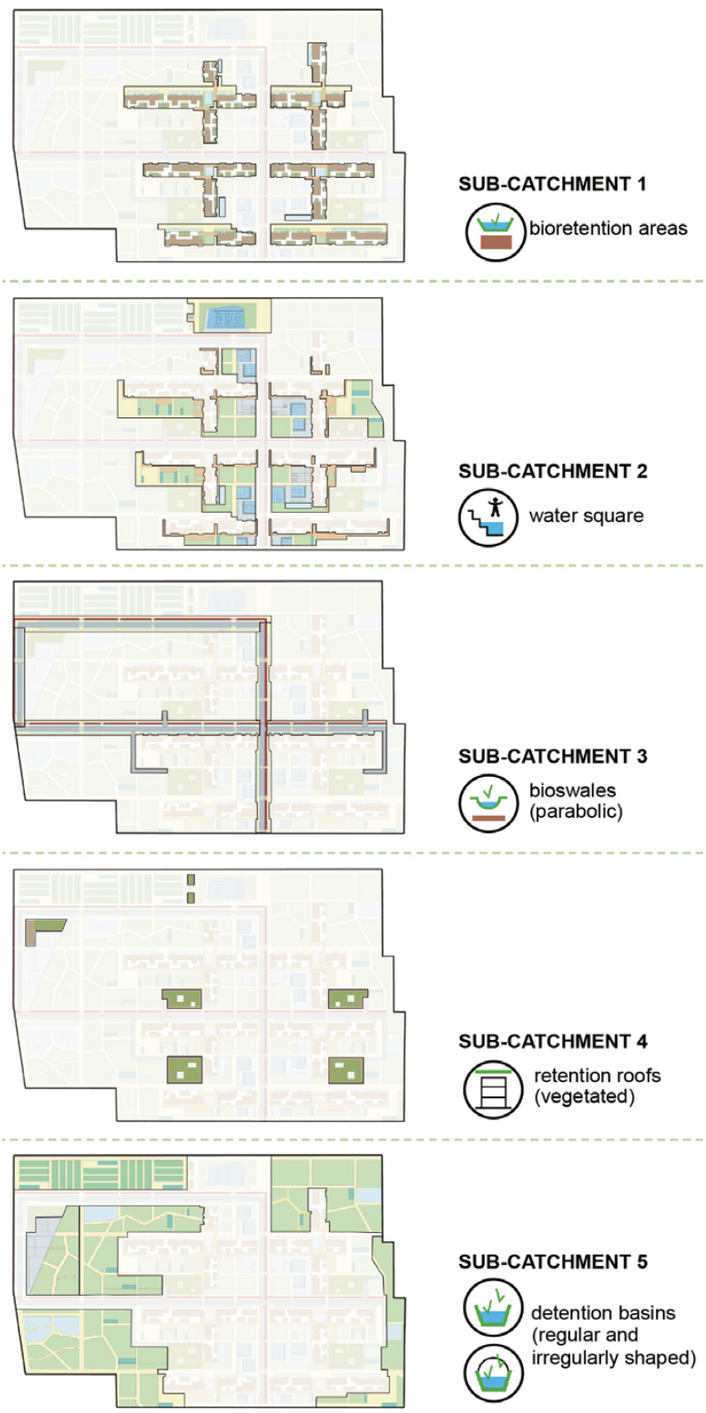


Fig. 15 | The five sub-basins identified for the application of the tool to the pilot project and the corresponding stormwater management systems (credit: the Authors, 2025).

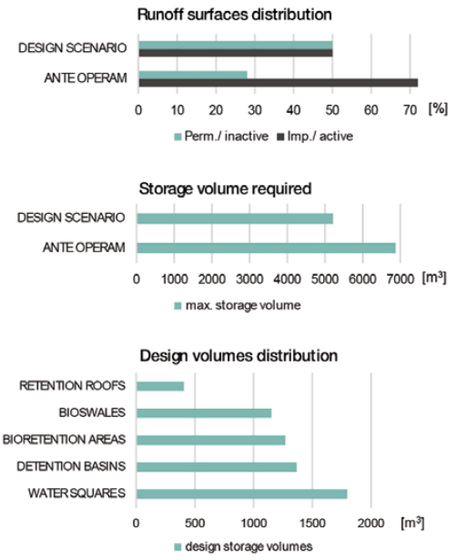


Fig. 16 | Comparative evaluation between ex ante and ex post scenarios of the pilot project (credit: the Authors, 2025).

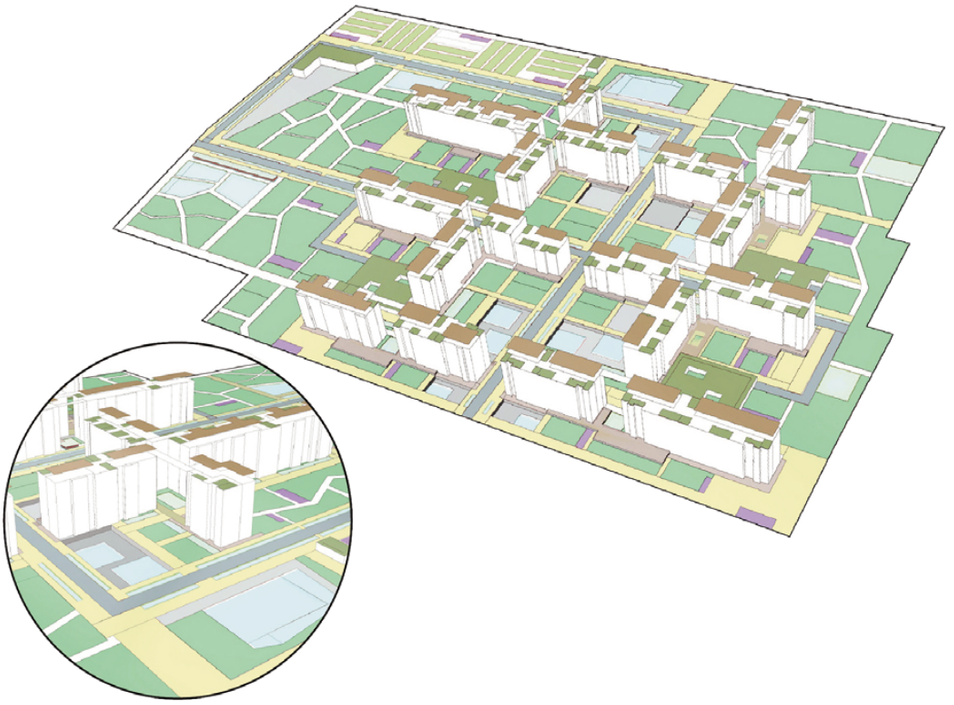


Fig. 17 | Overall perspective view of the project modelled with the WMs tool and detail of the northwest courtyard (credit: the Authors, 2025).

exclusively on green-blue technologies. In San Basilio, the tool was tested in its entirety. The application of the parametric toolbox to ex ante conditions allows simulation of preferential runoff directions on site (Fig. 13) and analysis of surfaces characterised by high runoff coefficients.

The project, inspired by international case studies with similar objectives, strategies, and scale, aims to revitalise courtyards and green areas as central elements that can capture the majority of rainfall. Among the seventeen European projects, those with water reception as their main macro-strategy were selected, integrating complementary water-diversion and source-control strategies. Two eco-districts – Des Docks in Saint-Ouen and Île Seguin in Boulogne-Billancourt – and the Watersquare Benthemplein in Rotterdam were analysed in detail as examples of adaptive, multifunctional urban spaces that combine large water storage capacities with recreational and social functions.

The proposed project integrates, alongside soil de-impermeabilisation, systems for storing intense rainfall, collecting rainwater, phytodepuration of greywater, and the technological retrofitting of buildings and open spaces (Fig. 14). Among the proposed solutions, those for storing intense rainfall were dimensioned. In the absence of reliable soil permeability data, a non-infiltrating soil condition was assumed, and, lacking information on discharge limits imposed by the water utility, a conservative value of 7 l/s/ha was adopted, consistent with the sewer system's critical condition.

The area, complex and articulated, was subdivided into five catchment zones corresponding to the five solution types employed (Fig. 15), each further divided into sub-basins based on device contiguity. Through an iterative modelling and optimisation process, surfaces and solutions were dimensioned for each area, assuming a 20-year return period, except for the water squares, which were also verified for a 50-year return period due to their complex infrastructure.

The comparison between the existing condition and the project revealed significant improvements (Fig. 16): the impermeable surface area decreased from 80% to 14%, the total runoff coefficient decreased by 31%, and the minimum required storage volumes decreased by 24%, even in the absence of infiltration. The solutions were then compared based on their storage capacity, their more intensive or extensive nature, and the number of solutions adopted per type. In its final configuration, the model integrated all the design information derived from the sizing of 11 water squares, 47 bioswales, 17 vegetated bioretention areas, 6 detention basins, and 4 retention roofs (Fig. 17).

Conclusions and future developments | This contribution marks an advancement in the field of resilient design, providing an innovative tool for modelling and assessing stormwater management solutions to support various stages of the design process, from the conceptual phase to the definition of design guidelines and the setup of the technical-economic feasibility project. The focus and application of this research are of great urgency and relevance in our climatic contexts, which are increasingly affected by extreme water-related phenomena that threaten cities, economies, communities, and human lives. The tool is distinguished by its ease of use despite its complex workflows and algorithms, making it particularly effective in meta-design phases.

Supported by parametric design, the WMs tool simplifies the pre-sizing and verification stages by offering flexible components that model and compare multiple solutions and alternative scenarios in real time. The water flow simulation integrated into the tool complements the designer's preliminary information, supporting the conceptual and creative process. The integration between the spreadsheets and the parametric toolbox enables the evaluation of solution effectiveness using verified methods.

The pilot project further reinforces the scientific and practical validity of the research: the transition from the standard lot to the pilot project demonstrates the tool's capacity to adapt to models of increasing scale and complexity, while managing a large number of design parameters and variables. The results are transferable across different climatic and territorial contexts, and the Excel sheets can be extended to include alternative rainfall and volume calculation methods tailored to local needs.

The Excel component could also support more complex sizing scenarios, such as mixed conditions combining partial soil infiltration with constant discharge rates. This would be useful in contexts characterised by poor soil performance, but where partial infiltration remains possible. However, two fundamental aspects must always be considered: first, that the applicability of the proposed methods depends on their conformity with any regional and local regulations and planning instruments in force; and second, that in the project's executive definition phase, the results must be verified through more complex hydrological and hydraulic modelling.

The development of the pilot project also demonstrated that, for a practical application of the tool, access to a range of local information, often not readily available, is essential. Therefore, the WMs could, in the future, interact with other platforms, becoming part of a broader instrument (Fig. 18) capable of collecting regional and local open data and GIS-based thematic maps, thus facilitating access to technical and regulatory information and supporting designers in a more informed decision-making process. Finally, since designing for climate adaptation and resilience requires multiple, interconnected types of knowledge and assessments, dynamic interaction with existing parametric and generative tools for microclimatic and environmental evaluations could provide a more comprehensive set of variables, guiding the project toward the most effective and sustainable choices.

Looking ahead, the tool offers a concrete opportunity to more systematically integrate water management within the design process, bridging the

gap between specialised technical knowledge and architectural practice. Its ability to reorganise heterogeneous data – technical, climatic, and regulatory – into a coherent operational workflow reduces analysis time while increasing the quality and transparency of design choices. Strategically, the tool can help disseminate resilient practices, fostering greater alignment between planning instruments and design actions. Far from being a finished instrument, the WMs represents an open operational foundation for future interdisciplinary developments, in line with the climatic and environmental challenges of our time.

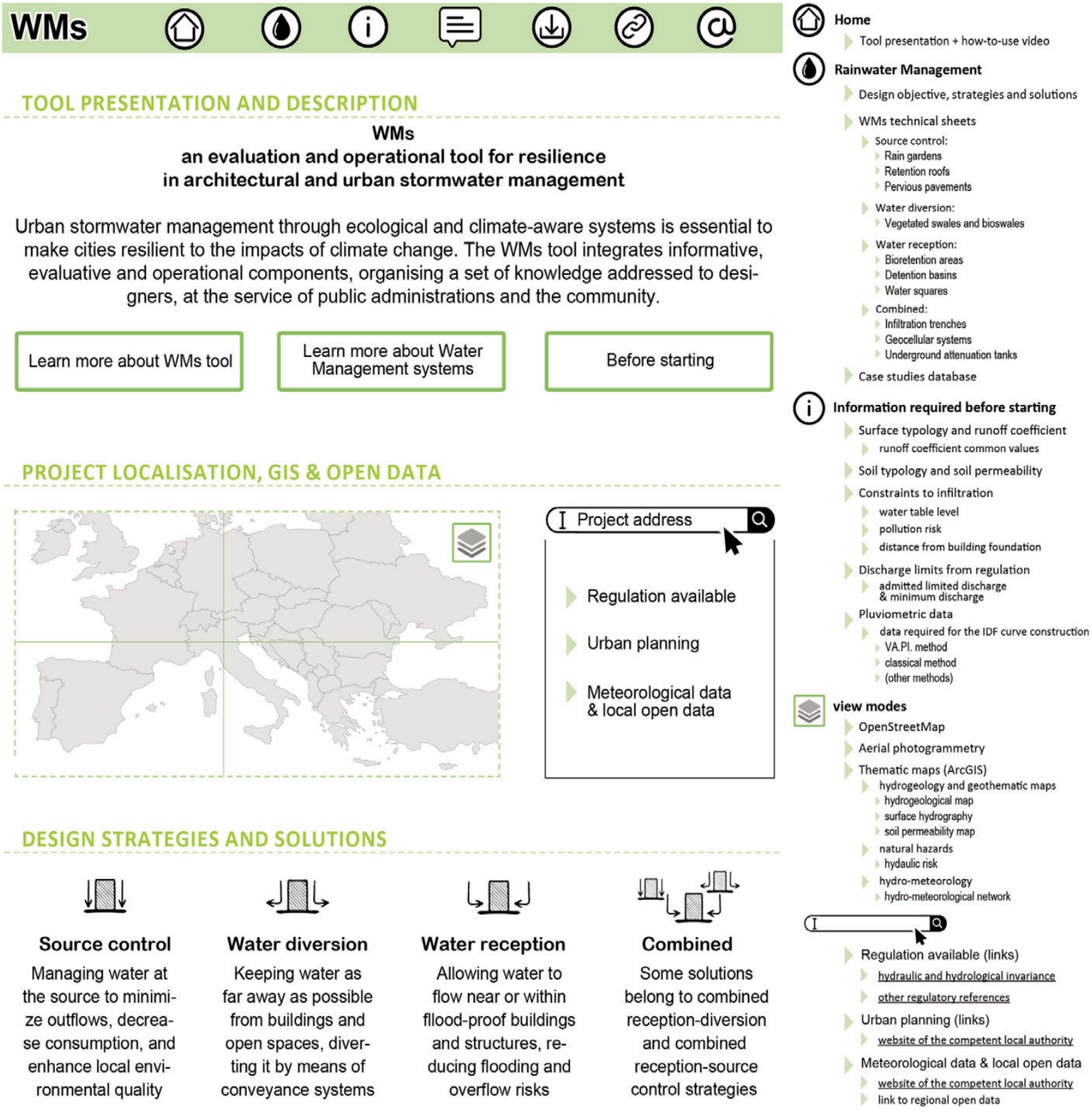


Fig. 18 | Proposal for the layout and interface of a unified multi-platform tool that interacts with GIS and open data, to facilitate the future dissemination and use of research results (credit: the Authors, 2025).

Acknowlwdgements

This paper is the result of a joint effort by the Authors, structured as follows. Conceptualisation: P. Marin, F. Tucci, and L. M. Giannini; Introduction and analysis of simulation and water modelling tools: P. Marin, F. Tucci, and L. M. Giannini; Methodology: P. Marin, F. Tucci, and L. M. Giannini; Tool structure and development of parametric algorithms and spreadsheets: P. Marin and L. M. Giannini; Selection of case studies and identification of the pilot project area: F. Tucci and L. M. Giannini; Application of the tool, from the standard lot to the pilot project: L. M. Giannini, under the supervision of P. Marin and F. Tucci; Conclusions and future developments: P. Marin, F. Tucci, and L. M. Giannini. The original manuscript was drafted and subsequently reviewed and edited by all the Authors, who have read and approved the final version of the paper.

The research is part of the broader project conducted by the Department of Planning, Design, and Technology of Architecture (PDTA) at 'Sapienza' University of Rome, titled 'Natural Capital and Protected Areas – Territorial Governance, Digital Transition, and Ecological Efficiency – New Tools for Integrated Management' (2023-2025), within the thematic line 'Environmental Technological Design, Natural Capital and Protected Areas – Towards Ecological, Energy, and Climatic Efficiency', coordinated by Principal Investigator Prof. F. Tucci. Specifically, the research was carried out as part of the PhD Thesis by L. M. Giannini, under the supervision of Prof. F. Tucci and Prof. P. Marin, with co-supervision by G. Romano, within the PhD Programme in 'Planning, Design, and Technology of Architecture' (curriculum in 'Environmental Technological Design'), with the conferment of the Doctor Europaeus title. The thesis was developed in collaboration with the MHA Laboratory (Méthodes et Histoire de l'Architecture), directed by Prof. P. Marin at the École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble – Université Grenoble Alpes (ENSAG-UGA, France), and was supported by research mobility grants awarded by 'Sapienza' University of Rome (Call for funding of international mobility periods for PhD Candidates of the XXXVII and XXXVIII cycles, D.R. 1505/2023; Call for funding of joint and individual research projects for international mobility of PhD Candidates of the XXXVI and XXXVII cycles, D.R. 1806/2022), both awarded to L. M. Giannini, with Prof. F. Tucci as Scientific Supervisor.

Notes

1) For further information, see the following regulations: 'Regolamento Regionale Lombardia 7/2017'; 'Decreto del Presidente della Regione Friuli-Venezia Giulia 83/2018'; 'Deliberazione della Giunta Regionale Veneto 2948/2009'; 'Decreto del Dirigente Generale Sicilia 102/2021'; 'Delibera del Comitato Istituzionale Sardegna 2/2017'; 'Deliberazione della Giunta Regionale Lazio 117/2020'; 'Delibera del Comitato Istituzionale Emilia-Romagna 3/2/2003'; and 'Deliberazione della Giunta Regionale Marche 53/2014'.

2) The verification procedures range from simplified to detailed methods. If the project involves improvements in permeability, the provisions do not apply in many contexts (see 'Decreto del Presidente della Regione Friuli-Venezia Giulia 83/2018'; 'Deliberazione della Giunta Regionale Lazio 117/2020'; and 'Deliberazione della Giunta Regionale Marche 53/2014').

3) The method is provided for by 'Regolamento Regionale Lombardia 7/2017', 'Decreto del Presidente della Regione Friuli-Venezia Giulia 83/2018', and 'Decreto del Dirigente Generale Sicilia 102/2021' in cases of average potential impermeabilisation, while its use is systematic in France during preliminary design phases to ensure compliance with the 'zero discharge' (0 rejet) principle (ASTEE, 2017).

4) Project on Flood Evaluation in Italy (VAPI), developed by Line 1 of the National Group for the Defence Against Hydrogeological Disasters (GNDCI/CNR).

5) A comprehensive summary of runoff coefficient values derived from regulations is provided in Delibera del Comitato Istituzionale Sardegna 2/2017.

6) In accordance with the minimum values established for residential areas by the UNI EN 752:2017 standard.

References

ASTEE – Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement (2017), *Mémento technique 2017 – Conception et dimensionnement des systèmes de gestion des eaux pluviales et de collecte des eaux usées*. [Online] Available at: astee.org/publications/memento-technique-2017/ [Accessed 28 September 2025].

Claghorn, J. (2016), "Water runoff script – Example 8.6", in *Generative Landscape*, 31/05/2006. [Online] Available at: generative-landscapes.com/water-runoff-script-example-8-6/ [Accessed 28 September 2025].

Dierna, S. (1995), "Tecnologie del progetto ambientale, per una trasformazione sostenibile", in Sala, M. (ed.), *Teaching in Architecture Energy and Environment World Network – Proceedings of the Florence International Conference for Teachers of Architecture, Firenze, Italy, September 28-30, 1995*, Alinea Editrice, Firenze, article 4.03.

EEA – European Environment Agency (2024), *European Climate Risk Assessment – Executive Summary,* EEA Report 01/2024. [Online] Available at: eea.europa.eu/en/ analysis/publications/european-climate-risk-assessment [Accessed 28 September 2025].

Ferrari, E. and Versace, P. (eds) (1994), *La valutazione delle piene in Italia – Rapporto nazionale di sintesi*. [Online] Available at: idrologia.polito.it/gndci/rapportiPdf/Vapi_Nazionale.pdf [Accessed 28 September 2025].

Ibrahim, Y. I., Kershaw, T. and Shepherd, P. (2020), "A Methodology for Modelling Microclimate – A Ladybug-tools and ENVI-met Verification Study", in *35th Plea Conference Sustainable Architecture and Urban Design – A Coruña, Spain, 01/09/20-03/09/20*. [Online] Available at: purehost.bath.ac.uk/ws/portalfiles/portal/212194165/A_methodology_For_Modelling_Microclimate._A_Ladybug_tools_and_ENVI_met_Verification_Study.pdf [Accessed 28 September 2025].

Leskens, J. G., Brugnach, M. and Hoekstra, A. Y. (2014), "Application of an Interactive Water Simulation Model in urban water management – A case study in Amsterdam", in *Water Science and Technology*, vol. 70, issue 11, pp. 1729-1739. [Online] Available at: doi.org/10.2166/wst.2014.240 [Accessed 28 September 2025].

Marin, P. (2018), "D'une conception informée par des données à la généralisation des systèmes cyber-physiques", in *Les Cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère*, vol. 3, pp. 66-83. [Online] Available at: doi.org/10.4000/craup.1043 [Accessed 28 September 2025].

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Matthews, J. B. R., Berger, S., Huang, M., Yelekci, O., Yu, R., Zhou, B., Lonnoy, E., Maycock, T. K., Waterfield, T., Leitzell, K. and Caud, N. (eds) (2021), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis – Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (UK) and New York (NY). [Online] Available at: doi.org/10.1017/9781009157896 [Accessed 28 September 2025].

Morschek, J., König, R. and Schneider, S. (2019), "An integrated urban planning and simulation method to enforce spatial resilience towards flooding hazards", in *SimAUD 2019 – 10th Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design, Atlanta, Georgia, April 7-9, 2019*, Society for Computer Simulation International, San Diego (CA), article 10, pp. 1-8. [Online] Available at: dl.acm.org/doi/pdf/10.5555/3390098.3390108 [Accessed 28 September 2025].

Nava, C. and Melis, A. (2024), "IA generativa e complessità – Verso un nuovo paradigma nel design digitale rigenerativo | Generative IA and complexity – Towards a new paradigm in regenerative digital design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 40-49. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1632024 [Accessed 28 September 2024].

Negretto, V., Giacomello, E., Gava, B. and Romanato, N. (2021), *Linee guida per il Drenaggio Urbano Sostenibile – Tecniche e principi per la pianificazione urbanistica*, Corila, Venezia. [Online] Available at: air.iuav.it/retrieve/de164c2b-acdb-60ee-e053-3a05fe0a7787/Linee%20guida%20per%20il%20drenaggio%20urbano%20sostenibile_web.pdf [Accessed 28 September 2025].

Tucci, F., Cecafosso, V., Altamura, P. and Giampaoletti, M. (2022), "Simulazione e modellazione per l'adattamento e la mitigazione climatica – Esperienze di riqualificazione ambientale a Roma | Simulation and modelling for climate adaptation and mitigation – Experiences of environmental renovation in Rome", in *Agathón – International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 106-121. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12102022 [Accessed 28 September 2025].

Un-Habitat (2024), *Cities and Climate Action – World Cities Report 2024*. [Online] Available at: unhabitat.org/sites/default/files/2024/11/wcr2024_-_full_report.pdf [Accessed 28 September 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development – A/RES/70/1*, United Nations, New York. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication [Accessed 28 September 2025].

Vahid, A., Qaddumi, H. M., Dickson, E., Diez, S. M., Danilenko, A. V., Hirji, R. F., Puz, G., Pizarro, C., Jacobsen, M. and Blankespoor, B. (2009), *Water and climate change – Understanding the risks and making climate-smart investment decisions*. [Online] Available at: documents1.worldbank.org/curated/en/362051468328208633/pdf/529110NWP0Box31ge0web0large01128110.pdf [Accessed 28 September 2025].

Valente, R., Mozingo, L. A., Bosco, R. and Giacobbe, S. (2024), "Gestione integrata delle risorse naturali in contesti urbani sostenibili | Integrated natural resource management in sustainable urban context", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 180-189. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15142024 [Accessed 28 September 2025].

WMO – World Meteorological Organization (2021), *2021 State of climate services – Water*. [Online] Available at: library.wmo.int/viewer/57630/download?file=1278_en.pdf&type=pdf&navigator=1 [Accessed 28 September 2025].

Woods-Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Hillman, S., Scott, T., Ashley, R. and Kellagher, R. (2015), *The SUDS Manual*, CIRIA, London (UK). [Online] Available at: ciria.org/CIRIA/Books/Free_publications/C753F.aspx [Accessed 28 September 2025].

Zarcone, R., Nava, F. and Tucci, F. (2024), "Mitigazione del clima e comfort umano – Uno strumento per la modellazione e simulazione di supporto alle decisioni | Climate mitigation and human comfort – A decision-support modeling and simulation tool", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 228-237. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15182024 [Accessed 28 September 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 212-223
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18112025

Article Info

Received 22 September 2025
Revised 22 October 2025
Accepted 23 October 2025
Published 30 December 2025

PARAMETRI DI MORFOLOGIA URBANA E DISTRETTI A ENERGIA POSITIVA

I Campus universitari motori delle transizioni urbane

URBAN MORPHOLOGY PARAMETERS AND POSITIVE ENERGY DISTRICTS

University Campuses as drivers of urban transitions

Michela Barosio, Martina Crapolicchio, Rossella Gugliotta, Marco Trisciuoglio

Abstract

Com'è possibile attivare processi di co-creazione di strategie di transizione energetica utilizzando i Campus universitari come promotori dell'iniziativa? Per rispondere a questa domanda il contributo presenta i primi esiti del progetto EDUPED che si pone l'obiettivo di accelerare la transizione verso i Distretti a Energia Positiva applicando approcci tipo-morfologici alla rigenerazione urbana e assumendo i Campus universitari come motori, orchestratori e hub di conoscenza. Attraverso la definizione di parametri morfologici e linee guida, cinque Living Lab situati nei Paesi Bassi, in Spagna, in Austria, in Italia e in Romania integrano le dimensioni tecniche, socio-economiche e di governance. L'innovazione risiede nel ruolo centrale dei Campus universitari, capaci di agire come laboratori urbani e catalizzatori di pratiche sostenibili. I primi risultati riguardano la definizione dei parametri morfologici urbani, base per i piani di retrofit e di adattamento climatico nei distretti universitari.

How can co-creation processes be activated for energy transition strategies through university campuses as promoters of the initiative? To answer this question, the paper presents the first results of the EDUPED project, which aims to accelerate the transition towards Positive Energy Districts by applying typo-morphological approaches to urban regeneration and assuming university campuses as drivers, orchestrators, and knowledge hubs. Through the definition of morphological parameters and guidelines, five Living Labs located in the Netherlands, Spain, Austria, Italy, and Romania integrate technical, socio-economic, and governance dimensions. The innovation lies in the central role of university Campuses, which act as urban laboratories and catalysts of sustainable practices. The first results concern the definition of urban morphological parameters, which form the ground for retrofit and climate adaptation plans in university districts.

Keywords

distretti a energia positiva, parametri morfologici, campus universitari, laboratori urbani, transizione urbana

positive energy districts, morphological parameters, university campuses, urban laboratories, urban transition

Michela Barosio, Architect and PhD in Architecture and Building Design, is an Associate Professor at the Department of Architecture and Design, Politecnico di Torino (Italy). She conducts research on urban morphology, computational design, and design education and pedagogy. E-mail: michela.barosio@polito.it

Martina Crapolicchio, Architect and PhD in Architecture, History, and Project, is a Postdoctoral Research Fellow at the Department of Architecture and Design, Politecnico di Torino (Italy). E-mail: martina.crapolicchio@polito.it

Rossella Gugliotta, PhD in Architecture, History, and Project, is a Postdoctoral Research Fellow at the Department of Architecture and Design, Politecnico di Torino (Italy). E-mail: rossella.gugliotta@polito.it

Marco Trisciuoglio, Architect and PhD, is a Full Professor at the Department of Architecture and Design, Politecnico di Torino (Italy). His research explores the city as a collective construction of buildings, spaces, and symbols in the international context, drawing on the methods and tools of the Italian morphological tradition. E-mail: marco.trisciuoglio@polito.it



Questo contributo presenta i risultati della prima fase del progetto di ricerca EDUPED (Educational campuses as the drivers for Positive Energy Districts), finanziato nell'ambito della terza Call (2023) del programma Driving Urban Transitions Partnership (DUT) co-finanziato dalla Commissione Europea nel quadro del programma Horizon Europe. Il progetto mira ad accelerare la transizione verso Distretti a Energia Positiva (PED), applicando sistematicamente i principi della morfologia urbana per la rigenerazione e la riqualificazione delle città. Nel dettaglio EDUPED si concentra sul ruolo delle Istituzioni universitarie con consistenti Patrimoni edilizi come possibili attori per le transizioni PED nelle città europee, sperimentando possibili strategie in cinque Living Labs collocati nei Paesi Bassi (The Hague University of Applied Sciences), in Spagna (Universitat Politècnica de Catalunya), in Austria (Technische Universität Graz), in Italia (Politecnico di Torino) e in Romania (Technical University of Cluj-Napoca), selezionati per l'elevato potenziale di integrazione con il contesto circostante e la diversità di sviluppo.

L'impatto del progetto, che adotta un approccio tipo-morfologico, è concepito come complementare, a quanto sta avvenendo nelle cinque città di riferimento in termini di riqualificazione di edifici pubblici, rigenerazione di sistemi energetici di distretto e rivitalizzazione delle strutture urbane storiche nell'ambito di iniziative locali e nazionali, con attenzione anche a missioni come '100 Climate-Neutral Cities'[1] e Renovation Wave (European Commission, 2020).

In questo contesto il progetto EDUPED, nel pieno rispetto del programma DUT nel quale si colloca, adotta un approccio orientato alla ricerca per ottenere nel lungo periodo risultati concreti e scalabili a livello comunitario, che comprendono soluzioni tecniche, quadri socio-economici, considerazioni di governance e regolamentari. Gli obiettivi riguardano la riduzione del consumo energetico tramite azioni di profondo retrofitting, la massimizzazione del potenziale locale di fonti rinnovabili e la flessibilità di utilizzo tramite reti intelligenti multi-commodity, nonché la mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici e l'aumento di richieste di raffrescamento / riscaldamento (Fig. 1).

Per garantire un impatto di portata elevata il progetto propone di coinvolgere tutti gli stakeholder mediante il confronto fra municipalità, cittadini e proprietari immobiliari, allo stato dell'arte attuale non sufficientemente considerati nei processi decisionali a scala di distretto. Il consorzio di ricerca di EDUPED è infatti composto da Università, imprese e ONG con competenze / interessi negli ambiti della morfologia urbana, dei sistemi energetici, della digitalizzazione e delle scienze sociali.

Avvalendosi di competenze diversificate il progetto intende contribuire all'obiettivo dell'Unione Europea di assumere, a livello globale, il ruolo di leader nella transizione verso i PED, lavorando sulle diverse sfide che conducono a questo obiettivo, ovvero ragionare sul tipo di distretto, sul clima, sulla collocazione topografica, sulle regolamentazioni e sui caratteri del contesto urbano (Hedman et alii, 2021).

Uno studio analitico, condotto su oltre 60 progetti PED in Europa da Zhang et alii (2021), rivela come la maggior parte dei progetti si concentri sui quartieri residenziali, sfruttando le superfici di copertura che sono a disposizione per i sistemi energetici, mentre i progetti focalizzati su edifici e distretti pubblici sono in ritardo. EDUPED propone l'uso dei principi di morfologia urbana come parte di un approccio sistemico in grado di favorire un approccio multiscalare. Il contributo che segue è pertanto strutturato come un report di ricerca sugli aspetti morfologici che fanno parte del più complesso progetto EDUPED e che allo stesso tempo ne governano l'indirizzo. L'impatto che il progetto EDUPED si propone di avere, delineato da subito in questa introduzione, è costruito innanzitutto su una rilettura critica della letteratura esistente sulla morfologia urbana e su una breve descrizione dei temi e delle linee di sviluppo che il progetto si è dato nel suo impianto. Ciò consente di descrivere il ruolo che la morfologia urbana può assumere nella concezione, nella progettazione, nella realizzazione e nell'esistenza stessa di Distretti a Energia Positiva: i parametri di morfologia urbana che il progetto di ricerca elabora e conduce finalmente a una sorta di tassonomia energetica sono il vero originale contributo di questo lavoro di ricerca.

L'impatto che la ricerca potrà avere, non solo sui cinque Campus universitari che ne costituiscono semplicemente i primi campi di sperimentazione (living labs), ma sullo spazio e sugli edifici delle città europee, in genere resta rilevante, così come rilevante è la capacità di ritrovare nei temi della forma urbana i criteri per una progettazione sostenibile, non solo dal punto di vista energetico, ma anche economico, con rinnovata attenzione al senso di comunità e a diversi e possibili assetti di governance.

Stato dell'arte | Se la forma urbana è generalmente compresa attraverso i suoi elementi di base (strade, lotti ed edifici), a seconda dell'obiettivo della ricerca, questi elementi possono essere definiti con livelli di specificità variabili (Kropf, 2017). Il processo di parametrizzazione della forma urbana permette ai ricercatori di tradurre questi elementi in indicatori misurabili che possono essere analizzati, confrontati e applicati a differenti scale urbane. Un copioso corpo di studi ha dimostrato il forte legame tra morfologia urbana e prestazioni energetiche (Ratti, Baker and Steemers, 2005), sottolineando l'importanza di identificare e quantificare parametri che descrivono la configurazione fisica dell'ambiente costruito.

Come osservano Fleischmann, Romice e Porta (2020), la ricerca sulla morfologia urbana soffre di incoerenze terminologiche poiché gli stessi concetti sono spesso descritti con termini diversi (metriche, indicatori, parametri o fattori) a seconda del contesto disciplinare. Questa mancanza di allineamento si estende alla granularità delle definizioni: per esempio, area di impronta, altezza dell'edificio e volume sono frequentemente trattati come misure di base in vari ambiti, ma il volume viene spesso calcolato semplicemente come prodotto dell'impronta per l'altezza, e quindi considerato come una misura derivata (Asadi, Arefi and Fathipoor, 2020). Un'ulteriore fonte di variabilità risiede nella scala di aggregazione: la maggior parte degli studi combina misure a livello edilizio in unità spaziali più ampie (lotti, zone o aree censuarie) che possono essere rappresentate tramite cluster morfologici o come confini amministrativi (Li, Song and Kaza, 2018).

Oltre alle sfide legate alla definizione di termini propri della morfologia urbana (verso la costruzione di un lessico condiviso) vi sono anche sfide legate alla possibilità di considerare in maniera olistica parametri differenti benché apparentabili. Un numero crescente di studi collega i parametri morfologici alle prestazioni energetiche a diverse scale (Ahmadian et alii, 2021; Bourdic, Salat and Nowacki, 2012; Rode et alii, 2014; Silva et alii, 2018): a scala edilizia studi empirici e parametrici hanno mostrato che l'aumento dell'area dell'involucro, della profondità di pianta (Steadman, Hamilton and Evans, 2014) e dell'altezza (Godoy-Shimizu et alii, 2018) tende a fare aumentare la domanda energetica; a scala di distretto o di canyon stradale, parametri come il rapporto altezza / larghezza e densità hanno dimostrato di influenzare la domanda di raffrescamento e di riscaldamento (Li, Song and Kaza, 2018; Futcher et alii, 2018; Leng et alii, 2020); altri studi si concentrano sull'intorno immediato degli edifici, evidenziando come variazioni locali di forma influenzino i carichi energetici (Wong et alii, 2011).

Sebbene la relazione tra forma urbana e prestazioni energetiche degli edifici sia ampiamente riconosciuta, i meccanismi di influenza e la loro intensità relativa restano insufficientemente compresi, in particolare per quanto riguarda il raffrescamento degli spazi (Ko, 2013; Silva et alii, 2017). Tutto ciò è ovviamente dovuto alla natura multipla, multiscalare e multidominio del problema: da un lato il comportamento termico degli edifici dipende da attributi legati alla forma, come la geometria, l'involucro e l'orientamento (Anderson, Wulfhorst and Lang, 2015), dall'altro il contesto urbano influenza le prestazioni in modo indiretto, modellando condizioni microclimatiche come l'ombreggiamento, la ventilazione e l'accumulo di calore. Purtroppo questi effetti indiretti sono spesso studiati in modo frammentario: la letteratura affronta solo un insieme limitato di variabili di forma e clima alla volta (Kolokotroni and Salvati, 2021).

I parametri di forma correlati all'energia riferiti all'unità edilizia sono quelli maggiormente riconosciuti nella letteratura più legata agli ambiti della progettazione e della pianificazione. L'efficacia di metriche specifiche dipende frequentemente dal contesto locale, dalla scala e dalla loro definizione o implementazione (Fleischmann, Feliciotti and Kerr, 2021; Zhang, Ghosh and Park, 2023). Poiché la ricerca energetica tradizionalmente si concentra sul singolo edificio, la prestazione energetica è solitamente indagata in relazione a caratteristiche geometriche dirette dell'involucro edilizio e dello spazio da esso racchiuso, a livello di volume e di pianta (Maiullari, 2023).

Mentre la letteratura tradizionalmente si concentra sulla scala edilizia lavori recenti hanno iniziato a estendere le analisi morfologico-energetiche a sistemi urbani complessi, propri della scala dei Campus universitari che, in fondo, costituiscono microcittà poiché combinano un'elevata concentrazione di popolazione con funzioni collettive e infrastrutture che li rendono siti strategici per esplorare l'interazione tra forma urbana e prestazioni energetiche.

In questa prospettiva la morfologia del Campus può essere studiata come fattore di transizione urbana, offrendo un laboratorio controllato e allo stesso tempo realistico per testare strategie sostenibili. Alcuni studi (Salat, 2011; Razavivand Fard, Demir and Trisciuoglio, 2019) hanno già evidenziato come il progetto dei Campus influenzi direttamente sia la domanda energetica sia le prestazioni ambientali urbane, rafforzando l'importanza di un approccio multiscalare che consideri il continuum dagli involucri edilizi agli spazi aperti e ai sistemi infrastrutturali.

Considerando la grande dimensione e la diversità di funzioni il Campus universitario condivide molte caratteristiche proprie dello spazio urbano, inclusi spazi costruiti, spazi aperti, reti di circolazione e la loro configurazione e le relazioni tra questi componenti. Pertanto i principi progettuali applicati allo spazio urbano possono essere applicati anche al Cam-

pus e la sostenibilità e la vivibilità correlate alla forma urbana possono essere riferite alla forma del Campus. In questo contesto le Università, per missione educativa, grandezza e impatto sulla società, sono agenti chiave nel dirigere la società, formare il futuro e la transizione verso un ambiente vivibile e sostenibile. Esse sono infatti tra le principali organizzazioni nella società che comprendono infrastrutture, strutture, terreni, capitale umano ed economico e funzionano come grandi imprese urbane.

In tale ottica le iniziative di sostenibilità possono essere incorporate nelle loro agende di ricerca e formazione e dovrebbero manifestarsi nel loro impianto fisico: per fare ciò le Università devono adottare strategie che avvantaggino studenti, personale e anche una comunità più ampia. Oggi molte Università cercano di migliorare le loro strutture considerando concetti di sostenibilità e vivibilità per essere più connesse, coerenti, verdi e pedonali (Wheeler, 2004) nonché parte integrante del contesto urbano circostante (Razavivand Fard, Demir and Trisciuoglio, 2019).

Il progetto EDUPED | Il progetto EDUPED va oltre lo stato dell'arte e introduce una strategia innovativa: attribuire alle Istituzioni di formazione accademica il ruolo di driver principali dei PED, come mai era sinora avvenuto in progetti simili (JPI Urban Europe, 2020). La metodologia individuata da EDUPED esplora in profondità la morfologia urbana ed energetica dei Campus universitari e valorizza l'immenso potenziale di questi luoghi per guidare la transizione PED anche con il coinvolgimento delle comunità locali attraverso l'estensione degli effetti ai quartieri circostanti e ad altri complessi di edifici pubblici. Questa strategia innovativa e anche transdisciplinare (Lang et alii, 2012) sfrutta la posizione unica delle Istituzioni preposte alla formazione per facilitare cambiamenti profondi nei sistemi urbani, promuovere pratiche sostenibili, favorire collaborazioni tra stakeholder e, coinvolgendo gli studenti, facilitare l'attitudine alla trasformazione delle future figure professionali.

Con riferimento ai Living Lab individuati da EDUPED (Campus universitari e distretti urbani circostanti) il progetto punta a dotarsi di: 1) Parametri di morfologia urbana per strategie di riqualificazione e rigenerazione nelle transizioni PED; 2) Processi di cocreazione con molteplici stakeholder sui Piani di accelerazione delle transizioni PED; 3) Piani di retrofit distrettuale per ridurre la domanda energetica per riscaldamento e raffrescamento nei PED; 4) Piani di adattamento climatico per aumentare la resilienza e la capacità degli edifici esistenti e delle infrastrutture urbane nei PED di fronte a temperature più elevate e ondate di calore più frequenti e severe; 5) Piani di rigenerazione distrettuale per sbloccare il pieno potenziale di reti energetiche flessibili e multi-commodity; 6) Espansione del corpus di conoscenze e competenze sui PED tramite apprendimento incrociato tra Living Lab e disseminazione delle buone pratiche, nonché sfruttamento e scaling-up dei risultati di progetto. In questa sede si presenta il primo dei sei output qui descritti: l'insieme dei parametri di morfologia urbana utili per i piani di retrofit distrettuale e per i piani di adattamento climatico. Nella prima fase della ricerca ci si è infatti concentrati sulla definizione di un insieme di parametri morfologici urbani utili per la pianificazione e l'implementazione dei PED, enfatizzando soprattutto la relazione tra configurazione spaziale e prestazioni energetiche. Una volta assunto che la forma urbana influenza in maniera significativa la domanda energetica, il potenziale di produzione e la risposta climatica, la ricerca mira a stabilire un quadro morfologico applicabile ai diversi contesti europei.

Tale quadro si compone di elementi fisici chiave alla scala di distretto, che includono la forma e l'orientamento degli isolati, le caratteristiche dell'involucro edilizio, i rapporti di superficie, gli indici di copertura e il grado di mineralizzazione del suolo, compresa la presenza di acqua superficiale. Tutti questi sono parametri cardine per determinare l'accesso alla luce solare, la potenzialità di ventilazione, i pattern di ombreggiamento e le opportunità offerte da strategie energetiche passive e attive.

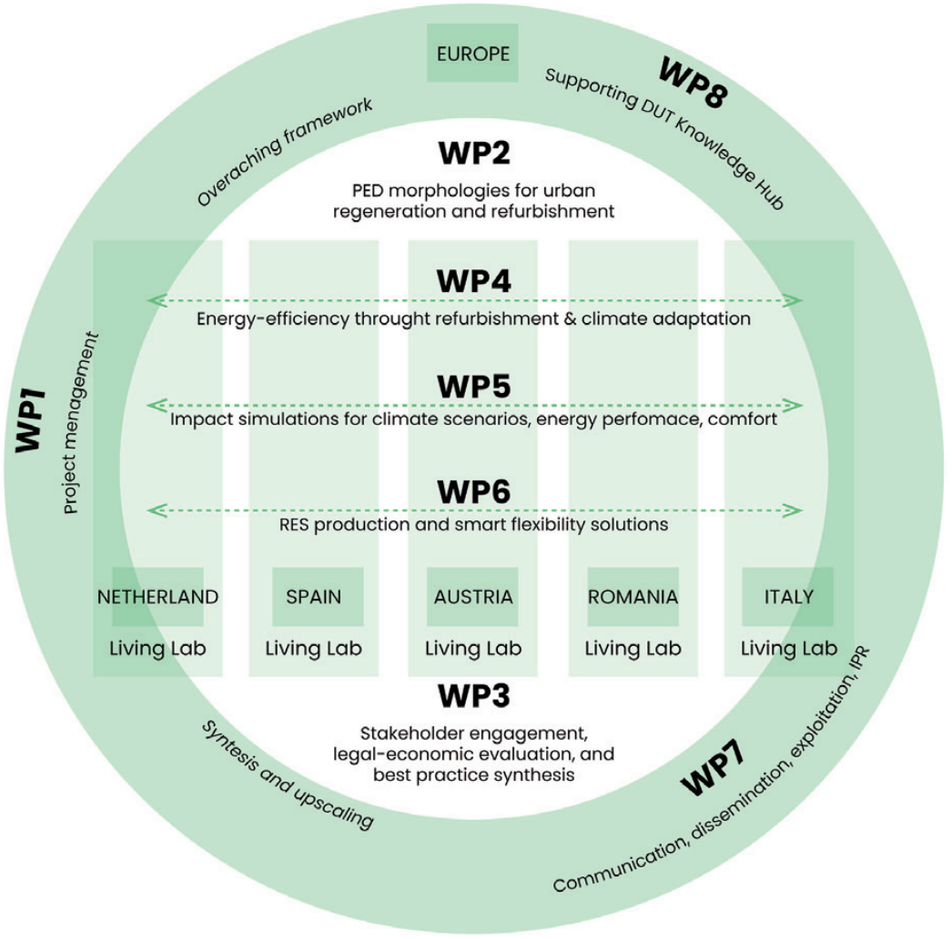


Fig. 1 | Diagram of the structure of the EDUPED project (credit: EDUPED Consortium, 2023; adapted by R. Gugliotta, 2025).

Il ruolo della morfologia urbana | La morfologia urbana è lo studio degli insediamenti umani, della loro forma, della loro struttura e dei processi di trasformazione, attraverso il tempo e attraverso le diverse scale. Come sostiene Kropf (2017) la morfologia urbana fornisce sia un linguaggio descrittivo sia un kit analitico per leggere l'ambiente costruito, mettendo in relazione edifici, lotti, strade e spazi aperti con le forze culturali, sociali ed economiche che li plasmano. La morfologia urbana considera la città come un oggetto fisico complesso, un artefatto culturale e un fenomeno quasi naturale; per questa ragione la morfologia urbana come disciplina consolidata propone metodi di studio adatti sia al confronto rigoroso tra luoghi e periodi diversi, sia allo studio di specificità locali e di realtà storiche (Oliveira, 2016; Whitehand, 2001).

Seguendo la sintesi interdisciplinare di Moudon (1997), la morfologia urbana contemporanea attinge a tre tradizioni convergenti: l'analisi della topografia di Conzen (1960) in Inghilterra, la tipologia procedurale di Muratori e Caniggia in Italia (Muratori, 1960; Caniggia and Maffei, 2017) e l'approccio tipo-morfologico della scuola francese (Panerai, Castex and Depaule, 1977).

Nonostante le molte differenze metodologiche queste scuole condividono tre presupposti fondamentali sulla forma urbana che ne definiscono la composizione (gli elementi fisici fondamentali sono edifici e spazi aperti, lotti e strade), il livello di risoluzione a cui deve essere esaminata (dall'edificio / lotto alla strada / blocco, alla città e alla regione) e le modalità di lettura (solo diacronicamente poiché i suoi elementi subiscono trasformazioni continue).

L'unità di base dell'analisi morfologica è quindi tanto spaziale quanto temporale: la cellula (lotto, edificio e spazio aperto) si aggrega in tessuti e distretti, la cui evoluzione riflette cicli di appropriazione, regolamentazione e uso. Brenda Scheer (2016) chiarisce come la morfologia generi conoscenza attraverso la raccolta sistematica di dati formali (mappe, confini di lotti e strade, attributi misurati degli edifici), il riconoscimento di pattern nel tempo e nello spazio, le teorie del cambiamento autonomo (persistenza, vincoli, cicli dei lotti, processi tipologici) e il collegamento alle condizioni non formali (dettate da eco-

nomia, politica, cultura). Cruciale nella morfologia urbana è la distinzione tra dati (forma oggettiva e mappabile) e analisi (pattern astratti) che finisce con il proporre una triade primaria composta da forma costruita, matrice dei confini (lotti, percorsi / diritti di passaggio) e suolo, utile a mantenere le osservazioni comparabili tra contesti diversi: questa triade previene la confusione tra tipo ed esemplare individuale.

Il tipo è una classe astratta ricavata da molti edifici simili e il processo tipologico descrive come i tipi si diffondono, si adattano e si trasformano nel tempo (Caniggia and Maffei, 2017; Whitehand et alii, 2014): in una reciprocità tra edificio e lotto i tipi originari generano strutture di lotto che poi vincolano l'evoluzione dei tipi successivi (Scheer, 2010). Molti casi studio, prevalenti in letteratura, sono chiamati a consolidare questi principi: la trama a griglia dell'Eixample di Barcellona (Fig. 2) è un tessuto riproducibile che combina perimetri di isolato, angoli arrotondati e uso misto; i boulevards haussmanniani di Parigi (Fig. 3) ristrutturano lotti e blocchi su scala metropolitana; i tessuti arcati di Bologna (Fig. 4) codificano una grammatica durevole di edificio lotto; in alcune morfologie vernacolari riproposte in ambito urbano – ad esempio le Machiya di Kyoto (Fig. 5) o le case a schiera britanniche (Fig. 6) – al pari di profondi lotti e facciate strette determinano il contributo della luce naturale e la ventilazione, influendo sull'uso sociale dello spazio (Marshall, 2004; Carmona, 2021).

Per la pianificazione e il progetto contemporanei la morfologia offre ben più della descrizione dell'esistente: innanzitutto fornisce quadri sulle prestazioni, sull'uso energetico, sul microclima, sul movimento e sul valore del suolo, anche in relazione alla compatibilità delle forme con gli scopi e le condizioni posti da una prefigurazione progettuale (Salat, 2011; Berghauser Pont and Haupt, 2021). La configurazione strada / isolato influenza anche i flussi pedonali (Hillier and Hanson, 1984), la profondità del blocco e la geometria dei cosiddetti canyon urbani influenza l'accesso solare e la temperatura percepita (Ratti and Richens, 1999; Oke, 1988; Stewart and Oke, 2012), mentre la densità e la forma costruita codeterminano energia e emissioni dei trasporti (Nam et alii, 2012; Rode et alii, 2014).

Indicatori morfologici (quali ad esempio FSI, GSI e densità di rete) collegano la texture urbana a effetti di energia e di comfort (Morganti et alii, 2017; Salvati, Coch Roura and Cecere, 2017). Recenti progressi, indotti da tecnologie avanzate nel campo del trattamento dei dati e della mappatura, rafforzano queste potenzialità: GIS basati sulla gestione delle particelle fondiarie, modelli 3D della città, gemelli digitali e registri edilizi supportano oggi dataset multiscalari che collegano forma fisica a prestazioni socio-ambientali, estendendo l'analisi anche dai nuclei storici ai tessuti metropolitani e periurbani (Batty, 2013); e ancora, analisi di reti digitali rivelano pattern di centralità nei sistemi stradali (Porta, Crucitti and Latora, 2006), mentre tecniche di statistica morfologica accoppiano modelli solari, eolici e termici, per valutare potenzialità passive e strategie di retrofit.

Nel complesso questa ampia letteratura dimostra come la morfologia urbana fornisca oggi l'impalcatura concettuale e operativa per una pianificazione basata su evidenze, conservazione, codifica del progetto e master-planning, sfruttando serie di dati per guidare interventi futuri che allineino la forma urbana con l'energia e l'adattamento climatico, quindi con il perseguimento di obiettivi sociali.

Nel costruire relazioni tra morfologia urbana e prestazioni energetiche la chiarificazione terminologica è un passaggio metodologico fondamentale perché garantisce che i parametri morfologici siano compresi in modo coerente tra i diversi ambiti disciplinari, che gli indicatori orientati alle prestazioni possano essere comparati in modo affidabile e che l'integrazione della morfologia nelle strategie PED rimanga trasparente e comunicabile.

In questo senso è innanzitutto importante definire i concetti di misure (unità elementari per quantificare attributi fisici dell'ambiente costruito come impronta, altezza e volume), di parametri (fattori numerici o misurabili che descrivono caratteristiche dimensionali, strutturali e prestazionali della forma urbana), di indicatori (metriche aggregate che sintetizzano parametri in strumenti di confronto) e indici (valori numerici specifici che raffinano l'analisi basata su indicatori, spesso utilizzati per misure di forma).

I parametri di morfologia urbana | Nell'ambito del progetto EDUPED la morfologia urbana è adottata non solo come disciplina descrittiva, ma anche come quadro metodologico capace di colmare il divario tra teoria e pratica nella trasformazione urbana orientata all'energia. La morfologia consente al progetto di identificare, strutturare e rendere operativi i parametri che collegano direttamente la forma spaziale della città con la domanda energetica, con la produzione rinnovabile e con la flessibilità del sistema; attraverso la raccolta e la sistematizzazione dei dati dai cinque Living Lab il progetto sviluppa un set coerente e replicabile di indicatori morfologici.

Questi indicatori restituiscono sia potenzialità di adattamento passivo, come esposizione solare, ventilazione naturale, isolamento termico o strategie di ombreggiamento, sia interventi attivi, incluse integrazioni di infrastrutture rinnovabili, teleriscaldamento / teleraffrescamento o smart grids. In questo modo la morfologia urbana fornisce la base per un quadro in cui efficienza energetica, qualità spaziale e resilienza climatica convergono in strategie di rigenerazione sostenibile.

La morfologia urbana diventa base metodologica per una parametrizzazione dei PED strutturata su tre dimensioni chiave (Fig.7). La prima dimensione organizza l'analisi su più scale spaziali, dall'edificio e dal lotto all'isolato o al tessuto urbano fino al quartiere, riconoscendo come le dinamiche energetiche emergano dall'interazione tra forme urbane (edifici e spazi). La seconda dimensione traduce elementi astratti in misure operative: involucri edilizi e altezze, rapporti di copertura, profondità di blocco, canyon urbani o sistemi di spazi aperti diventano parametri quantificabili e perciò comparabili tra contesti. Infine la terza lavora sulla variabile tempo nelle strategie di trasformazione, riconoscendo che la forma urbana non è mai statica, ma soggetta a fasi, cicli di riqualificazione, conservazione del Patrimonio e ritmi d'uso, tutti eventi che determinano la fattibilità e la resilienza delle transizioni PED. Questo quadro consente la determinazione di parametri basati



Fig. 2 | Bird's-eye view of Barcelona, Spain (credit: Rockwell Branding Agency).

sulla morfologia che lavorino simultaneamente su prestazioni passive (come l'accesso solare, la penetrazione della luce diurna, la ventilazione naturale e la mitigazione del calore urbano) e l'integrazione di sistemi attivi (come la raccolta di energia rinnovabile, la connettività smart grid e la flessibilità della domanda).

Una vasta letteratura ha dimostrato il legame tra morfologia urbana e prestazioni energetiche, tuttavia permangono incertezze sui meccanismi e sulle interazioni multiscala che ne determinano gli effetti.

Per sistematizzare la letteratura e garantire comparabilità i parametri morfologici sono raggruppati in cinque categorie (Fig. 8), coerenti con revisioni precedenti e adattate al caso dei Campus universitari: a) Boundary parameters (definizione delle unità spaziali, dall'involucro edilizio agli spazi aperti e ai perimetri del Campus); b) Use-related parameters (distribuzione funzionale, mix funzionale e intensità di occupazione); c) Urban-scale parameters (densità, connettività, rapporti canyon / strada e configurazione spaziale); d) Building parameters (indicatori geometrici e dimensionali dell'edificio quali altezza, impronta, volume, profondità di pianta e rapporti superficie / volume; e) System parameters (aspetti infrastrutturali e ambientali, inclusi dispositivi di ombreggiamento, strategie di ventilazione e sistemi energetici).

La classificazione mette in evidenza come l'analisi morfologica colleghi forma urbana e studi energetici, in particolare quando i Campus fungono da siti sperimentali per la transizione urbana sostenibile; in questo modo la forma urbana assume il ruolo non solo di mero contenitore di processi energetici, ma anche di motore della stessa transizione energetica.

La prospettiva morfologica amplia la portata dei PED oltre le valutazioni di carattere meramente tecnico perché fornisce strumenti per la governance, la cultura e la creatività condivisa, rendendo le logiche spaziali leggibili a un ampio spettro di stakeholders. Pertanto la morfologia aiuta a negoziare i compromessi tra obiettivi energetici e altre priorità urbane, come il ridisegno degli spazi, la conservazione del Patrimonio, l'inclusione sociale, i bisogni abitativi o la qualità del paesaggio: fornisce nei fatti evidenze utili a supportare più ampie riqualificazioni contestuali, guidando interventi in sintonia con l'identità locale e la storia, allo stesso tempo badando agli obiettivi europei di decarbonizzazione.

Nell'allineare forma urbana, energia, adattamento climatico e obiettivi sociali, la morfologia urbana può permettere ai PED di emergere come modelli replicabili di rigenerazione sostenibile, offrendo soluzioni locali e conoscenze trasferibili per una più ampia transizione urbana.

Riflessioni conclusive su criticità, limiti e potenziali prospettive di sviluppo della relazione tra sistemi energetici sostenibili e forma urbana | L'energia riveste un ruolo cruciale nello sviluppo economico e sociale globale, rappresentando al contempo uno strumento fondamentale nella lotta ai cambiamenti climatici: la città da un lato funge da motore di questo sviluppo, dall'altro si configura come principale responsabile delle criticità ambientali connesse alla crisi climatica.

L'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile (SDG) 7 mira a garantire entro il 2030 l'accesso universale a sistemi energetici economici, affidabili, sostenibili e innovativi; in particolare si pone l'obiettivo di aumentare significativamente la quota di energie rinnovabili e di raddoppiare il tasso di miglioramento dell'efficienza energetica a livello globale. Come contributo agli SDG delle Nazioni Unite l'SDG 7 (Energia accessibile e pulita) si integra strettamente con l'11 (Città e comunità sostenibili), il 13 (Azione per il clima), il 4 (Istruzione di qualità) e il 17 (Partnership per gli obiettivi).

In che modo la progettazione urbana e architettonica può contribuire al conseguimento di tali obiettivi? Già ampiamente documentati a livello internazionale contributi teorici e pratici in ambito architet-





Fig. 3 | Aerial view of Place de l'Étoile, Paris, France (credit: M. Nilov).

Fig. 4 | The porticoes of Bologna, Italy (credit: Hub JACQU).

Next page

Fig. 5 | Machiya houses in Kyoto, Japan (credit: E. Bronzini).

tonico e urbano affrontano questo tema: alcuni studi propongono linee guida progettuali derivanti da esperienze di rigenerazione urbana integrate con i principi di sostenibilità e qualità degli spazi pubblici (Lanini et alii, 2025); altri sviluppano metodi sistemici, utili anche alla definizione di soluzioni tecnologiche e di Piani di azione per i centri urbani (Ferrante, Romagnoli and Villani, 2023).

Altri ancora hanno studiato living labs europei che sperimentano mercati energetici di prossimità, co-design e partecipazione cittadina attiva (Crippa et alii, 2024); infine si sono indagate specifiche metriche, ad esempio per le isole di calore urbane, per riconnettere le performance microclimatiche con gli aspetti morfologici dell'urbanistica (Magliocco and Oneto, 2023), tuttavia tali esperienze non trovano oggi ancora sintesi in un quadro teorico unificato e stabile.

Si avverte invece con maggiore urgenza, a livello comunitario, la necessità di definire parametri condivisi di morfologia urbana per strategie di riqualificazione e rigenerazione in ottica di transizioni energetiche positive. Tali strategie includono Piani di co-creazione con stakeholder urbani, Piani di riqualificazione a livello di quartiere o distretto per ridurre domanda energetica sia per riscaldamento che per raffreddamento, nonché interventi di adattamento climatico finalizzati ad aumentare la resilienza di edifici e infrastrutture di fronte a temperature elevate e a ondate di calore più frequenti e intense; in questo contesto si prevedono anche Piani di rigenerazione distrettuale per attivare le reti energetiche flessibili e multi-commodity, sbloccando il pieno potenziale di questi sistemi.

In tale scenario il progetto EDUPED si inserisce come espressione di una ricerca transnazionale, volta a contribuire sia alla risoluzione delle principali sfide legate alle transizioni urbane verso un modello economico più sostenibile, sia al funzionamento efficace dei Distretti Energetici Positivi, così come definiti nel quadro delle azioni del Piano SET[2] dell'UE (Azione 3.2), di JPI Urban Europe (2020) e del programma EERA Joint Programme on Smart Cities[3] del 2018.

Il ruolo attivo di stakeholder pubblici, imprese e ONG è determinante per la corretta realizzazione e validazione degli impatti del progetto, tuttavia l'analisi tipo-morfologica urbana attraverso la mappatura e la lettura morfologica dei PED riveste un'importanza strategica per riconoscere e valorizzare il contributo della forma urbana al raggiungimento dell'SDG 7.

Il progetto EDUPED si propone di sviluppare nuove conoscenze attraverso studi morfologici in-



novativi, basati su metodi di alta qualità e strumenti avanzati, per favorire le transizioni energetiche nei contesti urbani esistenti. L'analisi degli impatti a lungo termine consentirà di individuare strategie di co-creazione integrate nei Piani di transizione e nelle operazioni di rigenerazione urbana, con soluzioni di riqualificazione energetica dei PED, validate su diverse tipologie di distretto. Tali soluzioni progettuali si ispirano alle caratteristiche specifiche fisiche e formali di ogni contesto, mirano a essere tecnicamente solide ed economicamente sostenibili e sono orientate all'adattamento climatico a lungo termine, con l'obiettivo di ridurre drasticamente la domanda energetica per riscaldamento e raffreddamento.

I parametri morfologici urbani, come illustrato nel precedente paragrafo, rappresentano oggi l'avanguardia nelle analisi di questo tipo e costituiscono anche una prospettiva di sviluppo operativo. EDUPED si propone di utilizzare tali parametri per elaborare soluzioni pratiche e integrate, rispondendo alle criticità della rigenerazione e riqualificazione urbana nei PED. A tal fine il progetto intende sviluppare, ottimizzare e verificare in cinque casi di studio in diversi Stati membri dell'UE Piani di transizione PED che affrontino contemporaneamente la rigenerazione urbana, l'efficienza energetica (bilanciando le esigenze tra diversi settori), la produzione di energia locale e la gestione della flessibilità della domanda e dell'offerta energetica. attraverso tecnologie e strategie di stoccaggio, integrazione di fonti rinnovabili e sistemi elettronici di potenza.

In conclusione attraverso l'applicazione di un approccio multidisciplinare e basato sulla ricerca scientifica, EDUPED mira a definire metodi innovativi e strumenti pratici applicabili per l'implementazione di PED efficienti, resilienti e sostenibili. La definizione e l'applicazione di parametri morfologici e metriche specifiche si configurano come strumenti fondamentali per portare avanti questa sfida, posizionando la forma urbana come elemento chiave nel processo di transizione energetica (SDG 7) e nel raggiungimento degli SDG correlati.

This paper presents the results of the first phase of the research project EDUPED (Educational Campuses as the Drivers for Positive Energy Districts), funded under the third Call (2023) of the Driving Urban Transitions Partnership (DUT) programme, co-financed by the European Commission within the framework of the Horizon Europe programme. The project aims to accelerate the transition towards Positive Energy Districts (PEDs) by systematically applying the principles of urban morphology to the regeneration and redevelopment of cities. Specifically, EDUPED focuses on the role of university institutions with substantial building assets as potential actors in the PED transitions of European cities, experimenting with possible strategies within five Living Labs located in: the Netherlands (The Hague University of Applied Sciences), Spain (Universitat Politècnica de Catalunya), Austria (Technische Universität Graz), Italy (Politecnico di Torino) and Romania (Technical University of Cluj-Napoca). These sites were selected for their high potential for integration with the surrounding context and for the diversity of their development conditions.

The impact of the project, which adopts a typo-morphological approach, is conceived as complementary to the ongoing processes in the five reference cities in terms of renovation of public buildings, regeneration of district energy systems, and revitalisation of historic urban structures, all within the scope of local and national initiatives, with attention also to EU missions such as '100 Climate-Neutral Cities'[1] and the Renovation Wave (European Commission, 2020).



Within this framework, the EDUPED project, fully aligned with the DUT programme in which it is embedded, adopts a research-oriented approach to achieve, in the long term, concrete and scalable results at the community level. These include technical solutions, socio-economic frameworks, and governance and regulatory considerations. The objectives concern reducing energy consumption through deep retrofitting actions, maximising local renewable energy potential and flexibility of use through multi-commodity smart grids, and mitigating the effects of climate change, particularly the increasing demand for cooling and heating (Fig. 1).

To ensure a wide-reaching impact, the project proposes to involve all stakeholders, fostering dialogue among municipalities, citizens, and property owners who are currently underrepresented in district-scale decision-making processes. The EDUPED research consortium comprises universities, enterprises, and NGOs with expertise and interests in urban morphology, energy systems, digitalisation, and the social sciences.

By leveraging these diversified competencies, the project aims to contribute to the European Union's goal of assuming a global leadership role in the transition towards PEDs, addressing the various challenges that lead to this objective, namely, district typology, climate, topographical location, regulations, and the characteristics of the urban context (Hedman et alii, 2021).

An analytical study conducted on over 60 PED projects in Europe by Zhang et alii (2021) reveals that most of these projects focus on residential neighbourhoods and exploit available roof surfaces for energy systems. In contrast, there is a lack projects centred on public buildings and districts. EDUPED proposes the use of urban morphology principles as part of a systemic approach that promotes multi-scalar reasoning.

Accordingly, the following paper is structured as a research report on the morphological aspects that form part of the broader EDUPED project and simultaneously guide its direction. The impact that EDUPED aims to generate, outlined from the outset in this introduction, is grounded first and foremost on a critical rereading of existing literature on urban morphology and a concise description of the themes and development lines guiding the project's structure. This makes it possible to describe the role that urban morphology can assume in the conception, design, implementation, and very existence of Positive Energy Districts. Within this framework, the so-called urban morphology parameters, which the research project develops and leads toward a form of energy taxonomy, represent the truly original contribution of this research work.

The research's potential impact is significant, not only on the five university campuses, which merely constitute the first experimental fields (Living Labs), but also on the spaces and buildings of European cities in general. Equally significant is its capacity to rediscover, within the themes of urban form, the criteria for sustainable design, not only from an energy standpoint, but also from an economic one, paying renewed attention to the sense of community and to the various possible governance arrangements.

State of the art | If urban form is generally understood through its basic elements – streets, plots, and buildings – these elements can be defined with varying levels of specificity depending on the research objective (Kropf, 2017). The process of parameterising urban form enables researchers to translate these elements into measurable indicators that can be analysed, compared, and applied across different urban scales. A substantial body of studies has demonstrated a strong link between urban morphology and energy performance (Ratti, Baker and Stee-

Previous page

Fig. 6 | Terraced houses in Fortuneswell, England (credit: U. Jain).

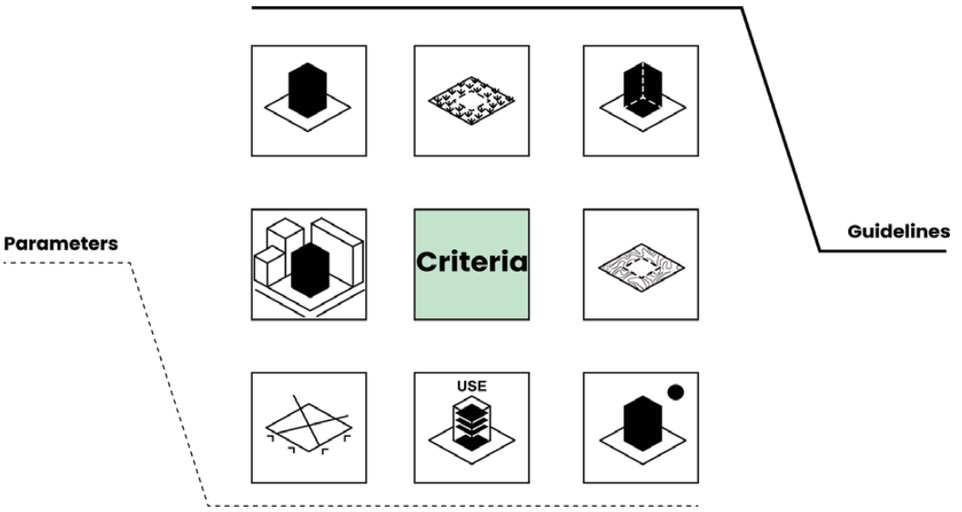


Fig. 7 | Diagram of the methodology illustrating the transition from morphological parameters, through defined criteria, to guidelines for Positive Energy District transitions (credit: the Authors, 2025).

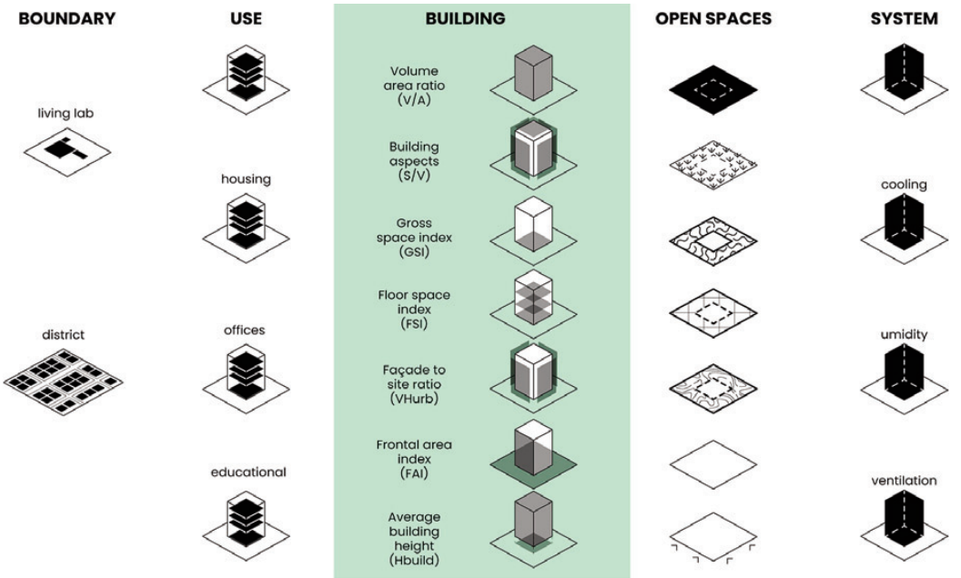


Fig. 8 | Graphic scheme of morphological parameters divided by category, with emphasis on parameters related to the building scale (credit: the Authors, 2025).

mers, 2005), highlighting the importance of identifying and quantifying parameters that describe the built environment's physical configuration.

As observed by Fleischmann, Romice and Porta (2020), research on urban morphology suffers from terminological inconsistencies, as the same concepts are often described using different terms, metrics, indicators, parameters, or factors across disciplinary contexts. This lack of alignment also extends to the granularity of definitions: for example, footprint area, building height, and volume are frequently treated as basic measures in various fields, while volume is often calculated simply as the product of footprint and height, and therefore considered a derived measure (Asadi, Arefi and Fathipoor, 2020). Another source of variability lies in the aggregation scale: most studies combine building-level measures into broader spatial units (plots, zones, or census areas), which can be represented through morphological clusters or administrative boundaries (Li, Song and Kaza, 2018).

In addition to challenges in defining the terminology of urban morphology (toward building a shared lexicon), there are also difficulties in considering different yet comparable parameters holistically. A growing number of studies link morphological parameters to energy performance across various scales (Ahmadian et alii, 2021; Bourdic, Salat and Nowacki, 2012; Rode et alii, 2014; Silva et alii, 2018). At the building scale, empirical and parametric studies have shown that increases in envelope surface area, plan depth (Steadman, Hamilton and Evans, 2014) and height (Godoy-Shimizu et alii, 2018) tend to raise energy demand. At the district or street-canyon scale, parameters such as height-to-width ratio and density have been shown to influence heating and cooling demand (Li, Song and Kaza, 2018; Futcher et alii, 2018; Leng et alii, 2020). Other studies focus on the immediate surroundings of buildings, showing how local shape variations affect energy loads (Wong et alii, 2011).

Although the relationship between urban form and building energy performance is widely recognised, the mechanisms of influence and their relative intensity remain insufficiently understood, particularly regarding space cooling (Ko, 2013; Silva et alii, 2017). This is evidently due to the multiple, multiscale, and multidomain nature of the issue: on the one hand, the thermal behavior of buildings depends on form-related attributes such as geometry, envelope, and orientation (Anderson, Wulfhorst and Lang, 2015); on the other, the urban context indirectly influences performance by shaping microclimatic conditions such as shading, ventilation, and heat accumulation. Unfortunately, these indirect effects are often studied in a fragmented way, with the literature addressing only a limited set of form and climate variables at a time (Kolokotroni and Salvati, 2021).

The energy-related form parameters for the building unit are among the most widely recognised in the literature, particularly in the fields of design and planning. The effectiveness of specific metrics often depends on local context, scale, and definition or implementation (Fleischmann, Feliciotti and Kerr, 2021; Zhang, Ghosh and Park, 2023). Since energy research traditionally focuses on the individual building, energy performance is usually investigated in relation to the building envelope's direct geometric features and the enclosed space, at the levels of volume and plan (Maiullari, 2023). While the literature has traditionally focused on the building scale, recent work has begun to extend morphological-energy analyses to complex urban systems, specifically university campuses, which are essentially micro-cities combining high population density with collective functions and infrastructure. These features make them strategic sites for exploring the interaction between urban form and energy performance.

From this perspective, the campus morphology can be studied as a factor of urban transition, offering a controlled yet realistic laboratory for testing sustainable strategies. Some studies (Salat, 2011; Razavivand Fard, Demir and Trisciuoglio, 2019) have already shown how campus design directly influences both energy demand and urban environmental performance, reinforcing the importance of a multi-scalar approach that considers the continuum from building envelopes to open spaces and infrastructural systems.

Given their large scale and functional diversity, university campuses share many features of urban space, including built areas, open spaces, circulation networks, and the relationships among these components. Therefore, the design principles used in urban spaces can also be applied to campuses, and the concepts of sustainability and livability linked to urban form can similarly be extended to campus design.

In this context, universities, due to their educational mission, size, and social impact, are key agents in guiding society, shaping the future, and driving the transition toward a livable and sustainable environment. They are among the leading organisations in society, encompassing infrastructure, facilities, land, human and economic capital, and operating as large urban enterprises. From this standpoint, sustainability initiatives can be embedded in their research and educational agendas and should be reflected in their physical layout. To do so, universities must adopt strategies that benefit students, staff, and the wider community. Today, many universities seek to improve their facilities by incorporating sustainability and livability concepts, becoming more connected, coherent, green, and pedestrian-friendly (Wheeler, 2004), as well as more integrated into the surrounding urban context (Razavivand Fard, Demir and Trisciuoglio, 2019).

The EDUPED Project | The EDUPED project goes beyond the state of the art. It introduces an innovative strategy: assigning the role of main drivers of Positive Energy Districts (PEDs) to academic institutions. This role has never been attributed to them in similar projects (JPI Urban Europe, 2020). The methodology developed by EDUPED deeply explores the urban and energy morphology of university campuses. It enhances the immense potential of these sites to lead the PED transition, while involving local communities by extending their effects to surrounding neighbourhoods and other public building complexes. This innovative and transdisciplinary strategy (Lang et alii, 2012) leverages the unique position of educational institutions to facilitate profound transformations in urban systems, promote sustainable practices, foster collaboration among stakeholders, and, by engaging students, encourage a transformative mindset among future professionals.

With reference to the Living Labs identified by EDUPED (university campuses and their surrounding urban districts), the project aims to develop: 1) Urban morphology parameters for redevelopment and regeneration strategies in the PED transitions; 2) Co-creation processes with multiple stakeholders for PED Transition Acceleration Plans; 3) District retrofit plans to reduce energy demand for heating and cooling in PEDs; 4) Climate adaptation plans to enhance the resilience and capacity of existing buildings and urban infrastructures in PEDs against higher temperatures and more frequent and severe heat waves; 5) District regeneration plans to unlock the full potential of flexible and multi-commodity energy networks; 6) Expansion of knowledge and competencies on PEDs through cross-learning among Living Labs, dissemination of best practices, and the exploitation and scaling-up of project results.

This paper presents the first of the six outputs described above: the set of urban morphological parameters applicable for district retrofit plans and climate adaptation plans.

In the first phase of the research, attention was focused on defining a set of urban morphological parameters helpful in planning and implementing PEDs, with particular emphasis on the relationship between spatial configuration and energy performance. Once it is established that urban form significantly influences energy demand, production potential, and climate response, the research seeks to develop a morphological framework applicable to different European contexts.

This framework is composed of key physical elements at the district scale, consisting of the shape and orientation of blocks, characteristics of building envelopes, surface ratios, coverage indexes, and the degree of soil mineralisation, including the presence of surface water. All these are fundamental parameters in determining solar access, ventilation potential, shading patterns, and the opportunities offered by passive and active energy strategies.

The role of urban morphology | Urban morphology is the study of human settlements, namely of their form, structure, and transformative processes, examined over time and across different scales. As Kropf (2017) argues, urban morphology provides both a descriptive language and an analytical toolkit for interpreting the built environment, relating buildings, plots, streets, and open spaces to the cultural, social, and economic forces that shape them. Urban morphology looks at the city as a complex physical object, a cultural artefact, and an almost natural phenomenon. For this reason, as a well-established discipline, it proposes methods of study suitable both for rigorous comparisons across places and periods and for the examination of local specificities and historical realities (Oliveira, 2016; Whitehand, 2001).

Following Moudon's interdisciplinary synthesis (Moudon 1997), contemporary urban morphology draws on three converging traditions: Conzen's analysis of topography in England (Conzen, 1960), the procedural typology of Muratori and Caniggia in Italy (Muratori, 1960; Caniggia and Maffei, 2017) and the typo-morphological approach of the French school (Panerai, Castex and Depaule, 1977). Despite methodological differences, these schools share three fundamental assumptions about urban form: its composition (the basic physical elements being buildings, open spaces, plots, and streets); its scale of resolution, which must range from building /plot to street/block, city, and region; and its mode of analysis, which must be diachronic, since the city's elements are continuously transformed.

The basic unit of morphological analysis is therefore both spatial and temporal: the cell (plot, build-

ing, and open space) aggregates into tissues and districts, whose evolution reflects cycles of appropriation, regulation, and use. Brenda Scheer (2016) explains that morphology produces knowledge through the systematic collection of formal data (maps, plot and street boundaries, measurable attributes of buildings), the recognition of spatial and temporal patterns, the theories of autonomous change (persistence, constraints, plot cycles, typological processes), and the connection with non-formal conditions (economic, political, and cultural factors).

Crucial to urban morphology is the distinction between data (objective, mappable form) and analysis (abstract patterns), which yields a primary triad: built form, boundary matrix (plots, paths/rights-of-way), and ground. This triad ensures that observations remain comparable across different contexts and prevents confusion between type and individual specimen.

A type is an abstract class derived from many similar buildings, and the typological process describes how types spread, adapt, and transform over time (Caniggia and Maffei, 2017; Whitehand et alii, 2014). In the reciprocal relationship between building and plot, original types generate plot structures that, in turn, constrain the evolution of subsequent types (Scheer, 2010). Numerous case studies in literature consolidate these principles: the grid fabric of Barcelona's Eixample (Fig. 2) is a reproducible tissue combining block perimeters, chamfered corners, and mixed uses; the Haussmannian boulevards of Paris (Fig. 3) restructure plots and blocks at a metropolitan scale; the arcaded fabrics of Bologna (Fig. 4) encode a lasting grammar of building-plot relationships; and specific vernacular morphologies reinterpreted in urban contexts, such as the Machiya houses of Kyoto (Fig. 5) or British terraced houses (Fig. 6), reveal how deep plots and narrow facades influence natural light, ventilation, and the social use of space (Marshall, 2004; Carmona, 2021). For contemporary planning and design, morphology offers far more than a description of what exists: it provides frameworks for understanding performance, energy use, microclimate, mobility, and land value, and for assessing the compatibility of forms with design intentions and contextual conditions (Salat, 2011; Berghauser Pont and Haupt, 2021). The street-block configuration influences pedestrian flows (Hillier and Hanson, 1984); the depth of blocks and the geometry of urban canyons affect solar access and perceived temperature (Ratti and Richens, 1999; Oke, 1988; Stewart and Oke, 2012); while density and built form co-determine transport energy use and emissions (Nam et alii, 2012; Rode et alii, 2014).

Morphological indicators (e.g., FSI – Floor Space Index, GSI – Ground Space Index, and network density) link urban texture to energy and comfort effects (Morganti et alii, 2017; Salvati, Coch Roura and Cecere, 2017). Recent advances in data processing and mapping technologies reinforce these possibilities: GIS systems based on land parcel management, 3D city models, digital twins, and building registries now support multiscale datasets that connect physical form with socio-environmental performance, extending analysis from historic cores to metropolitan and peri-urban fabrics (Batty, 2013). Furthermore, digital network analyses reveal centrality patterns in street systems (Porta, Crucitti and Latora, 2006), while morphological statistics integrate solar, wind, and thermal models to assess passive potentials and retrofit strategies.

Overall, this vast body of literature demonstrates that urban morphology now provides both the conceptual and operational framework for evidence-based planning, heritage conservation, design codification, and master planning, using data series to guide future interventions that align urban form with energy efficiency and climate adaptation, and therefore with social objectives.

In building relationships between urban morphology and energy performance, terminological clarification is a crucial methodological step. It ensures that morphological parameters are consistently understood across disciplines, that performance-oriented indicators can be reliably compared, and that the integration of morphology into PED strategies remains transparent and communicable.

In this sense, it is essential to define the concepts of: Measures (elementary units used to quantify physical attributes of the built environment, such as footprint, height, and volume); Parameters (numerical or measurable factors describing dimensional, structural, and performance characteristics of urban form); Indicators (aggregated metrics that synthesise parameters into comparative tools); and Indexes (specific numerical values that refine indicator-based analysis, often used for shape measurements).

Urban morphology parameters | Within the EDU-PED project, urban morphology is adopted not only as a descriptive discipline, but also as a methodological framework capable of bridging the gap between theory and practice in energy-oriented urban transformation. Morphology enables the project to identify, structure, and operationalise parameters that directly link the city's spatial form to energy demand, renewable production, and system flexibility. By collecting and systematising data from the five Living Labs, the project develops a coherent, replicable set of morphological indicators.

These indicators reflect both passive adaptation potentials, such as solar exposure, natural ventilation, thermal insulation, and shading strategies, and active interventions, including the integration of renewable infrastructures, district heating/cooling, and smart grids. In this way, urban morphology provides a framework in which energy efficiency, spatial quality, and climate resilience converge within sustainable regeneration strategies.

Urban morphology thus becomes the methodological basis for a parameterisation of PEDs structured around three key dimensions (Fig.7). The first dimension organises analysis across multiple spatial scales, from the building and plot to the block or urban fabric and finally to the district, recognising that energy dynamics emerge from the interaction between urban forms (buildings and spaces). The second dimension translates abstract elements into operational measures: building envelopes and heights, coverage ratios, block depths, urban canyons, and open-space systems become quantifiable and therefore comparable parameters across different contexts. Finally, the third dimension addresses the temporal variable in transformation strategies, acknowledging that urban form is never static, but subject to phases, cycles of redevelopment, heritage conservation, and rhythms of use, all of which determine the feasibility and resilience of PED transitions.

This framework enables the identification of morphology-based parameters that simultaneously affect passive performance – such as solar access, daylight penetration, natural ventilation, and urban heat mitigation – and the integration of active systems, including renewable energy collection, smart grid connectivity, and demand flexibility.

A vast body of literature has demonstrated the link between urban morphology and energy performance; however, uncertainties remain regarding the mechanisms and multiscale interactions that determine these effects.

To systematise the literature and ensure comparability, the morphological parameters are grouped into five categories (Fig. 8), consistent with previous reviews but adapted to the specific case of university campuses: a) Boundary parameters – definition of spatial units, from the building envelope to open spaces and campus perimeters; b) Use-related parameters – functional distribution, functional mix, and occupancy intensity; c) Urban-scale parameters – density, connectivity, street / canyon ratios, and spatial configuration; d) Building parameters – geometric and dimensional indicators of buildings such as height, footprint, volume, plan depth, and surface-to-volume ratios; e) System parameters – infrastructural and environmental aspects, including shading devices, ventilation strategies, and energy systems.

This classification highlights how morphological analysis bridges urban form and energy studies, particularly when university campuses serve as experimental sites for sustainable urban transitions. In this way, urban form assumes the role not merely of a container of energy processes, but of an actual driver of the energy transition itself.

The morphological perspective broadens the scope of PEDs beyond purely technical assessments by providing tools for governance, culture, and shared creativity, making spatial logics intelligible to a wide range of stakeholders. Thus, morphology helps negotiate trade-offs between energy objectives and other urban priorities, such as spatial redesign, heritage conservation, social inclusion, housing needs, and landscape quality. In practice, it offers evidence-based insights that support broader contextual regenerations, guiding interventions that are in harmony with local identity and history, while simultaneously addressing European decarbonisation goals.

By aligning urban form, energy, climate adaptation, and social objectives, urban morphology can enable PEDs to emerge as replicable models of sustainable regeneration, offering local solutions and transferable knowledge for a wider urban transition.

Concluding reflections on critical issues, limitations, and potential development perspectives in the relationship between sustainable energy systems and urban form | Energy plays a crucial role in global economic and social development and is a key instrument in the fight against climate change. The city, on the one hand, acts as a driving force of this development. However, it constitutes the primary source of the environmental challenges associated with the climate crisis.

The Sustainable Development Goal (SDG) 7 aims to ensure, by 2030, universal access to affordable, reliable, sustainable, and modern energy systems. Specifically, it seeks to significantly increase the share of renewable energy and double the global rate of improvement in energy efficiency. As a contribution to the United Nations Sustainable Development Goals, SDG 7 (Affordable and Clean Energy) is closely interconnected with SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), SDG 13 (Climate Action), SDG 4 (Quality Education), and SDG 17 (Partnerships for

the Goals). However, in what ways can urban and architectural design contribute to achieving these objectives? At the international level, numerous theoretical and practical contributions in architecture and urbanism address this question. Some studies propose design guidelines derived from urban regeneration experiences integrated with principles of sustainability and public space quality (Lanini et alii, 2025); others develop systemic methods practical for the definition of technological solutions and action plans for urban centres (Ferrante, Romagnoli and Villani, 2023); still others have examined European living labs that experiment with local energy markets, co-design, and active citizen participation (Crippa et alii, 2024); finally, some have investigated specific metrics, for example, those concerning urban heat islands, to reconnect microclimatic performance with the morphological aspects of urban planning (Magliocco and Oneto, 2023). However, these experiences have not yet converged into a unified and stable theoretical framework.

At the European level, there is an increasingly urgent need to define shared parameters for urban morphology to support rehabilitation and regeneration strategies aimed at positive energy transitions. Such strategies include: Co-creation plans with urban stakeholders; Neighbourhood or district-scale retrofit plans to reduce energy demand for heating and cooling; Climate adaptation interventions designed to increase the resilience of buildings and infrastructures against rising temperatures and more frequent and intense heat waves; and district regeneration plans to activate flexible and multi-commodity energy networks, unlocking their full potential. Within this scenario, the EDUPED project positions itself as an expression of transnational research, aimed at contributing both to the resolution of significant challenges associated with urban transitions toward a more sustainable economic model, and to the effective functioning of Positive Energy Districts (PEDs), as defined within the framework of the EU SET Plan[2] (Action 3.2), JPI Urban Europe (2020), and the EERA Joint Programme on Smart Cities[3] (2018).

The active involvement of public stakeholders, enterprises, and NGOs is crucial to the successful implementation and validation of the project's impacts. Nevertheless, the typo-morphological analysis of urban space, through mapping and morphological reading of PEDs, assumes strategic importance in recognising and enhancing the contribution of urban form to achieving SDG 7.

The EDUPED project aims to develop new knowledge through innovative morphological studies, based on high-quality methods and advanced tools, to foster energy transitions within existing urban contexts. The long-term impact analysis will enable the identification of co-creation strategies integrated into transition plans and urban regeneration operations, providing energy retrofit solutions for Positive Energy Districts (PEDs) validated across different district typologies. These design solutions, inspired by the specific physical and formal characteristics of each context, are intended to be technically sound, economically sustainable, and oriented toward long-term climate adaptation, aiming to drastically reduce energy demand for heating and cooling.

As illustrated in the previous section, urban morphological parameters currently represent the state of the art in this type of analysis and also offer a promising operational development perspective. EDUPED intends to use these parameters to develop practical, integrated solutions that address the challenges of urban regeneration and redevelopment within PEDs. To this end, the project aims to develop, optimise, and validate, through five case studies in different EU Member States, a set of PED Transition Plans that simultaneously address: Urban regeneration, Energy efficiency (balancing needs across various sectors), Local energy production, and Management of demand and supply flexibility through storage technologies, integration of renewable sources, and electronic power systems.

In conclusion, through a multidisciplinary, research-based approach, EDUPED seeks to develop innovative methods and practical tools for implementing efficient, resilient, and sustainable PEDs. The definition and application of morphological parameters and specific metrics emerge as fundamental tools for advancing this challenge, positioning urban form as a key element in the energy transition (SDG 7) and in achieving the related Sustainable Development Goals.

Acknowledgements

The EDUPED research project (EDUcational Campuses as the Drivers for Positive Energy Districts), F-DUT-2023-0023, is led by The Hague University of Applied Sciences (Principal Investigator Prof. R. Sebastian, WP1 and WP8 Leader) and involves the participation of: the Universitat Politècnica de Catalunya (Prof. N. Garrido Soriano, WP6 Leader), the Technische Universität Graz (Prof. A. Schreuer, WP3 Leader), the Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca (Prof. T. Rus, WP7 Leader), and the Politecnico di Torino, Department of Architecture and Design (Prof. M. Trisciuoglio, WP2 Leader) and Department of Energy (Prof. C. Becchio, WP4 Leader). The project was funded under the 'DUT 2023 / PED Transition Pathway' call. The present paper addresses the themes developed by the Research Unit of the Politecnico di Torino, engaged in urban morphology studies.

This contribution is the outcome of a shared reflection among the Authors. Nevertheless, the introductory paragraph and 'The EDUPED Project' are to be attributed to M. Barosio; 'Concluding reflections on critical issues, limitations, and potential development perspectives in the relationship between sustainable energy systems and urban form' to M. Trisciuoglio; the 'State of the Art' to R. Gugliotta; 'Urban morphology parameters' to M. Crapolicchio; and 'The role of urban morphology' to R. Gugliotta for the first seven paragraphs and to M. Crapolicchio for the following eight paragraphs.

Notes

1) For further information, see: research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/eu-missions-horizon-europe/climate-neutral-and-smart-cities_en [Accessed 4 October 2025].

2) For further information, see: energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/strategic-energy-technology-plan_en [Accessed 4 October 2025].

3) For further information, see: eera-sc.eu/ [Accessed 4 October 2025].

References

Ahmadian, E., Sodagar, B., Bingham, C., Elnokaly, A. and Mills, G. (2021), "Effect of urban built form and density on building energy performance in temperate climates", in *Energy and Buildings*, vol. 236, article 110762, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110762 [Accessed 4 October 2025].

Anderson, J. E., Wulfhorst, G. and Lang, W. (2015), "Energy analysis of the built environment – A review and outlook", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, pp. 149-158. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.027 [Accessed 4 October 2025].

Asadi, A., Arefi, M. and Fathipoor, A. (2020), "Simulation of green roofs and their potential mitigating effects on the urban heat island using an artificial neural network – A case study in Austin, Texas", in *Advances in Space Research*, vol. 66, issue 8, pp. 1846-1862. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.asr.2020.06.039 [Accessed 4 October 2025].

Batty, M. (2013), *The New Science of Cities*, MIT Press, Cambridge (MA). [Online] Available at: doi.org/10.7551/mitpress/9399.001.0001 [Accessed 4 October 2025].

Berghauser Pont, M. and Haupt, P. (2021), *Spacematrix – Space, Density and Urban Form*, TU Delft OPEN Books, Delft. [Online] Available at: doi.org/10.59490/mg.38 [Accessed 4 October 2025].

Bourdic, L., Salat, S. and Nowacki, C. (2012), "Assessing cities – A new system of cross-scale spatial indicators", in *Building Research and Information*, vol. 40, issue 5, pp. 592-605. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09613218.2012.703488 [Accessed 4 October 2025].

Caniggia, G. and Maffei, G. L. (2017), *Interpreting basic building* [or. ed. *Composizione architettonica e tipologia edilizia*, 1979], Altralinea Edizioni, Firenze.

Carmona, M. (2021), *Public Places – Urban Spaces – The dimensions of urban design*, Routledge, London.

Conzen, M. R. G. (1960), *Alnwick, Northumberland – A study in town-plan analysis*, Wiley, London. [Online] Available: jstor.org/stable/i225590 [Accessed 4 October 2025].

Crippa, D., Di Prete, B., Fagnoni, R. and Leonardi, C. (2024), "Distretti energetici collaborativi – Laboratori urbani per un'energia di prossimità | Collaborative energy districts – Urban workshops for proximity energy", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 296-305. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15242024 [Accessed 4 October 2025].

European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives*, document 52020DC0662, 662 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662 [Accessed 4 October 2025].

Ferrante, T., Romagnoli, F. and Villani, T. (2023), "Sviluppo urbano sostenibile – Organizzazione di contenuti informativi per la transizione verso i Distretti a Energia Positiva | Sustainable urban development – Organizing information content for the transition to Positive Energy Districts", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 191-204. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13162023 [Accessed 4 October 2025].

Fleischmann, M., Feliciotti, A. and Kerr, W. (2021), "Evolution of urban patterns – Urban Morphology as an Open Re-

producible Data Science", in *Geographical Analysis | An International Journal of Theoretical Geography*, vol. 54, issue 3, pp. 536-558. [Online] Available at: doi.org/10.1111/gean.12284 [Accessed 4 October 2025].

Fleischmann, M., Romice, O. and Porta, S. (2020), "Measuring urban form – Overcoming terminological inconsistencies for a quantitative and comprehensive morphologic analysis of cities", in *Environment and Planning B | Urban Analytics and City Science*, vol. 48, issue 8, pp. 2133-2150. [Online] Available at: doi.org/10.1177/2399808320910444 [Accessed 4 October 2025].

Futcher, J., Mills, G. and Emmanuel, R. (2018), "Interdependent energy relationships between buildings at the street scale", in *Building Research and Information*, vol. 46, issue 8, pp. 829-844. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09613218.2018.1499995 [Accessed 4 October 2025].

Godoy-Shimizu, D., Steadman, P., Hamilton, I., Donn, M., Evans, S., Moreno, G. and Shayesteh, H. (2018), "Energy use and height in office buildings", in *Building Research and Information*, vol. 46, issue 8, pp. 845-863. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09613218.2018.1479927 [Accessed 4 October 2025].

Hedman, Å., Rehman, H. U., Gabaldón, A., Bisello, A., Albert-Seifried, V., Zhang, X., Guarino, F., Grynning, S., Eicker, U., Neumann, H.-M., Tuominen, P. and Reda, F. (2021), "IEA EBC Annex 83 Positive Energy Districts", in *Buildings*, vol. 11, issue 3, article 130, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings11030130 [Accessed 4 October 2025].

Hillier, B. and Hanson, J. (1984), *The social logic of space*, Cambridge University Press, Cambridge. [Online] Available at: doi.org/10.1017/CBO9780511597237 [Accessed 4 October 2025].

JPI Urban Europe (2020), *Positive Energy Districts – Mission approach for sustainable urban transformation*. [Online] Available at: jpi-urbaneurope.eu/wp-content/uploads/2020/06/PED-Booklet-Update-Feb-2020_2.pdf [Accessed 4 October 2025].

Ko, Y. (2013), "Urban form and residential energy use – A review of design principles and research findings", in *Journal of Planning Literature*, vol. 28, issue 4, pp. 327-351. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0885412213491499 [Accessed 4 October 2025].

Kolokotroni, M. and Salvati, A. (2021), "Comfort and energy implications of urban microclimate in high latitudes", in Palme, M. and Salvati, A. (eds), *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*, Springer, Cham, pp. 79-104. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4_5 [Accessed 4 October 2025].

Kropf, K. (2017), *The handbook of urban morphology*, Wiley-Blackwell, Chichester.

Lang, D. J., Wiek, A., Bergmann, M., Stauffacher, M., Martens, P., Moll, P., Swilling, M. and Thomas, C. J. (2012), "Transdisciplinary research in sustainability science – Practice, principles and challenges", in *Sustainability Science*, vol. 7, issue supp. 1, pp. 25-43. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11625-011-0149-x [Accessed 4 October 2025].

Lanini, L., Sepe, M., Barsanti, E., Crudeli, A., and Marcheschi, C. (2025), "Abitare l'Università – Linee guida per nuovi poli e spazi pubblici per una vivibilità urbana sostenibile | Living the University – Guidelines for new campuses and public spaces for sustainable urban livability", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 208-225. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17142025 [Accessed 4 October 2025].

Leng, H., Chen, X., Ma, Y., Wong, N. H. and Ming, T. (2020), "Urban morphology and building heating energy consumption – Evidence from Harbin, a severe cold region city", in *Energy and Buildings*, vol. 224, article 110143, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110143 [Accessed 4 October 2025].

Li, C., Song, Y. and Kaza, N. (2018), "Urban form and household electricity consumption – A multilevel study", in *Energy and Buildings*, vol. 158, pp. 181-193. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.007 [Accessed 4 October 2025].

Magliocco, A. and Oneto, G. (2023), "Configurazioni spaziali nell'analisi ambientale urbana – Il contributo dell'isola di calore | Spatial configurations in urban environmental analysis – The role of the heat island effect", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 216-223. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14182023 [Accessed 4 October 2025].

Maiullari, D. (2023), *Urban form influence on microclimate and building cooling demand – An analytical framework and its application on the Rotterdam case*, Doctoral Thesis, Delft University of Technology, Germany. [Online] Available at: resolver.tudelft.nl/uuid:da2f850e-653a-4654-9e4a-4e3009bbc785 [Accessed 4 October 2025].

Marshall, S. (2004), *Streets and Patterns*, Routledge, London.

Morganti, M., Salvati, A., Coch, H. and Cecere, C. (2017), "Urban morphology indicators for solar energy analysis", in *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 807-814. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.533 [Accessed 4 October 2025].

Moudon, A. V. (1997), "Urban morphology as an emerging interdisciplinary field", in *Urban Morphology | Journal of the International Seminar on Urban Form*, vol. 1, issue 1, pp. 3-10. [Online] Available at: doi.org/10.51347/jum.v1i1.4047 [Accessed 4 October 2025].

Muratori, S. (1960), *Studi per una operante storia urbana di Venezia*, Istituto Poligrafico dello Stato, Roma.

Nam, K., Lim, U. and Kim, B. H. S. (2012), "'Compact' or 'Sprawl' for sustainable urban form? – Measuring the effect on travel behavior in Korea", in *The Annals of Regional Science*, vol. 49, issue 1, pp. 157-173. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s00168-011-0443-7 [Accessed 4 October 2025].

Oke, T. R. (1988), "Street design and urban canopy layer climate", in *Energy and Buildings*, vol. 11, issue 1-3, pp. 103-113. [Online] Available at: doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6 [Accessed 4 October 2025].

Oliveira, V. (2016), *Urban morphology – An introduction to the study of the physical form of cities*, Springer, Cham. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-319-32083-0 [Accessed 4 October 2025].

Panerai, P., Castex, J. and Depaule, J.-C. (1977), *Formes urbaines – De l'îlot à la barre*, Dunod, Paris.

Porta, S., Crucitti, P. and Latora, V. (2006), "The network analysis of urban streets – A primal approach", in *Environment and Planning B | Planning and Design*, vol. 33, issue 5, pp. 705-725. [Online] Available at: doi.org/10.1068/b32045 [Accessed 4 October 2025].

Ratti, C., Baker, N. and Steemers, K. (2005), "Energy consumption and urban texture", in *Energy and Buildings*, vol. 37, issue 7, pp. 762-776. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010 [Accessed 4 October 2025].

Ratti, C. and Richens, P. (1999), "Urban texture analysis with image processing techniques", in Augenbroe, G. and Eastman, C. (eds), *Computers in Building | Proceedings of the CAADfutures '99 Conference – Proceedings of the Eighth International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures held at Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, June 7-8, 1999*, Springer, Boston (MA), pp. 49-64. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-1-4615-5047-1_4 [Accessed 4 October 2025].

Razavivand Fard, H., Demir, Y. and Trisciuoglio, M. (2019), "The histology atlas of campus form – A framework to explore liveability and sustainability in university campuses", in *A|Z | ITU Journal of the Faculty of Architecture*, vol. 16, issue 3, pp. 87-102. [Online] Available at: doi.org/10.5505/itujfa.2019.32650 [Accessed 4 October 2025].

Rode, P., Keim, C., Robazza, G., Viejo, P. and Schofield, J. (2014), "Cities and energy – Urban morphology and residential heat-energy demand", in *Environment and Planning B | Planning and Design*, vol. 41, issue 1, pp. 138-162. [Online] Available at: doi.org/10.1068/b39065 [Accessed 4 October 2025].

Salat, S. (2011), *Cities and forms – On sustainable urbanism*, Editeurs des Sciences et des Arts Hermann, Paris.

Salvati, A., Coch Roura, H. and Cecere, C. (2017), "Assessing the urban heat island and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate – Barcelona case study", in *Energy and Buildings*, vol. 146, pp. 38-54. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.025 [Accessed 4 October 2025].

Scheer, B. C. (2016), "The epistemology of urban morphology", in *Urban Morphology | Journal of the International Seminar on Urban Form*, vol. 20, issue 1, pp. 5-17. [Online] Available at: doi.org/10.51347/jum.v20i1.4052 [Accessed 4 October 2025].

Scheer, B. C. (2010), *The evolution of urban form – Typology for planners and architects*, American Planning Association, Chicago.

Silva, M., Leal, V., Oliveira, V. and Horta, I. M. (2018), "A scenario-based approach for assessing the energy performance of urban development pathways", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 40, pp. 372-382. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.028 [Accessed 4 October 2025].

Silva, M. C., Horta, I. M., Leal, V. and Oliveira, V. (2017), "A spatially-explicit methodological framework based on neural networks to assess the effect of urban form on energy demand", in *Applied Energy*, vol. 202, pp. 386-398. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.113 [Accessed 4 October 2025].

Steadman, P., Hamilton, I. and Evans, S. (2014), "Energy and urban built form – An empirical and statistical approach", in *Building Research and Information*, vol. 42, issue 1, pp. 17-31. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09613218.2013.808140 [Accessed 4 October 2025].

Stewart, I. D. and Oke, T. R. (2012), "Local climate zones for urban temperature studies", in *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, issue 12, pp. 1879-1900. [Online] Available at: doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1 [Accessed 4 October 2025].

Wheeler, S. M. (2004), *Planning for sustainability – Creating livable, equitable and ecological communities*, Routledge, New York.

Whitehand, J. W. R. (2001), "British urban morphology – The Conzenian tradition", in *Urban Morphology | Journal of the International Seminar on Urban Form*, vol. 5, issue 2, pp. 103-109. [Online] Available at: doi.org/10.51347/jum.v5i2.3896 [Accessed 4 October 2025].

Whitehand, J. W. R., Gu, K., Conzen, M. P. and Whitehand, S. M. (2014), "The typological process and the morphological period – A cross-cultural assessment", in *Environment and Planning B | Planning and Design*, vol. 41, issue 3, pp. 512-533. [Online] Available at: doi.org/10.1068/b39097 [Accessed 4 October 2025].

Wong, N. H., Jusuf, S. K., Syafii, N. I., Chen, Y., Hajadi, N., Sathyanarayanan, H. and Manickavasagam, Y. V. (2011), "Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption", in *Solar Energy*, vol. 85, issue 1, pp. 57-71. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.solener.2010.11.002 [Accessed 4 October 2025].

Zhang, P., Ghosh, D. and Park, S. (2023), "Spatial measures and methods in sustainable urban morphology – A systematic review", in *Landscape and Urban Planning*, vol. 237, article 104776, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104776 [Accessed 4 October 2025].

Zhang, X., Penaka, S. R., Giriraj, S., Sánchez, M. N., Civiero, P. and Vandevyvere, H. (2021), "Characterizing Positive Energy District (PED) through a preliminary review of 60 existing projects in Europe", in *Buildings*, vol. 11, issue 8, article 313, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings11080318 [Accessed 4 October 2025].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 224-237
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18122025

Article Info

Received 15 September 2025
Revised 23 October 2025
Accepted 25 October 2025
Published 30 December 2025

AGRICOLTURA URBANA E ARCHITETTURA
L'acqua per ottimizzare la sinergia edificio-vegetazione

URBAN AGRICULTURE AND ARCHITECTURE
Water for optimising the building-vegetation synergies

Valentina Dessì, Matteo Clementi, Erpinio Labrozzi, Filippo Oppimitti, Michele D'Ostuni, Chew B. Soh, Szu C. Chien, Barbara Ting W. Ang

Abstract

Il paper invita a riflettere su come le pratiche sostenibili fondate sul metabolismo urbano possano generare sinergie tra gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), proponendo un approccio metodologico per l'integrazione architettonica dell'agricoltura urbana. Al centro pone l'acqua, per connettere abitanti, ambiente costruito e aree verdi, migliorando la resilienza urbana. La metodologia procede dall'analisi alla scala di quartiere a quella dell'isolato / blocco edilizio, per definire soluzioni di agricoltura integrata in edifici a emissioni zero con l'obiettivo di chiudere i cicli energetici e idrici e contribuire agli SDG 2, 6, 11 e 12.

The paper invites reflection on how sustainable practices grounded in urban metabolism can generate synergies among the Sustainable Development Goals (SDGs). It proposes a methodological approach for the architectural integration of urban agriculture. It centres on water, to connect residents, the built environment, and green areas, thereby enhancing urban resilience. The methodology progresses from analysis at the neighbourhood scale to the block / building scale to define solutions for integrated agriculture within zero-emission buildings, aiming to close energy and water cycles and contribute to SDGs 2, 6, 11, and 12.

Keywords

agricoltura urbana, produzione a emissioni zero, metabolismo urbano sostenibile, agricoltura integrata negli edifici, gestione idrica circolare

urban agriculture, zero-emission production, sustainable urban metabolism, building-integrated agriculture, circular water management

Valentina Dessì is an Associate Professor at the Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering, Politecnico di Milano (Italy). E-mail: valentina.dessi@polimi.it

Matteo Clementi is an Associate Professor of Architectural Technology and Environmental Design at the Politecnico di Milano (Italy). E-mail: matteo.clementi@polimi.it

Erpinio Labrozzi, PhD Candidate at the Politecnico di Milano (Italy), focuses his research on sustainable architectural and urban design. E-mail: erpinio.labrozzi@polimi.it

Filippo Oppimitti, PhD, is a Postdoctoral Researcher at the Free University of Bozen-Bolzano (Italy). He research on XR and AI in domestic spaces. E-mail: filippo.oppimitti@polimi.it

Michele D'Ostuni, Architect, is a Researcher at the DISTAL, University of Bologna (Italy). He specialises in urban agri-food systems. E-mail: michele.dostuni@unibo.it

Chew Beng Soh is an Associate Professor at the Singapore Institute of Technology. His research focuses on compound semiconductors, light-conversion materials, and technological innovations. E-mail: chewbeng.soh@singaporetech.edu.sg

Szu Cheng Chien is an Associate Professor at the Singapore Institute of Technology. His research includes human-centric lighting, BIM management systems, and high-performance building design and diagnostics. E-mail: szucheng.chien@singaporetech.edu.sg

Barbara Ting Wei Ang is a Chemical Engineer and Researcher at the Singapore Institute of Technology (Singapore). Her research focuses on the synthesis of light-conversion materials and technological innovations. E-mail: barbara.ang@singaporetech.edu.sg



Mancano solo pochi anni alla scadenza del raggiungimento dei 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) e in riferimento all'SDG 6 (Acqua pulita e relativo accesso ai servizi) vari studi hanno documentato tra il 2015 e il 2024 un progresso modesto, registrando un miglioramento globale nell'accesso all'acqua dal 70% al 74% e un potenziamento dei servizi igienici dal 47% al 54% (Rajapakse, Otoo and Danso, 2023; Requejo-Castro, Giné-Garriga and Pérez-Foguet, 2020). Se tutti concordano sulla necessità di ridare slancio alle strategie per raggiungere gli obiettivi entro il 2030, è il momento di ricordare che all'avvio dell'Agenda è stata sottolineata la natura integrata e indivisibile degli SDG (UN, 2015): comprendere in che modo sono interconnessi può supportare lo sviluppo con strategie che massimizzano i benefici e le sinergie e ridurre i compromessi tra i diversi SDG (Beisheim and Weinlich, 2023; Pradhan, 2023; Nicholls et alii, 2020), spesso causa di rallentamenti nell'Agenda.

Fin dalla loro entrata in vigore un numero crescente di studi e pubblicazioni si è concentrato sull'identificazione e l'analisi delle interconnessioni tra gli SDG (Bennich et alii, 2023), ma anche su metodi, approcci e strumenti per svilupparle e ottimizzarle (Bennich et alii, 2023; Rajapakse, Otoo and Danso, 2023; Horvath, 2022; Fader et alii, 2018). Alcuni autori hanno indagato le interconnessioni con l'SDG 6, in certi casi necessarie, in altri casi auspicabili (Raman, Lathabai and Nedungadi, 2024; Bennich et alii, 2023), in quanto è uno tra gli obiettivi con il maggior numero di interazioni e sinergie positive (Fader et alii, 2018), mentre all'opposto l'SDG 2 presenta il più alto numero di interazioni negative, dovute al fatto che la produzione alimentare estensiva dipende fortemente dall'uso di altre risorse e raggiungere questo obiettivo con tecniche convenzionali, non sempre sostenibili, rischia di danneggiare gli ecosistemi (Fader et alii, 2018; FAO, 2019, 2021).

In tale ottica l'articolo offre un contributo a supporto dell'attivazione di potenziali interconnessioni positive, illustrando l'approccio metodologico sviluppato – nell'ambito dei progetti di grande rilevanza (2023-2025) – nel corso della ricerca bilaterale BIZE_UrFarm, coordinata dal Politecnico di Milano e dal Singapore Institute of Technology, con la collaborazione della Facoltà di Agraria di Bologna e finanziata in parte dal Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale e dall'Agenzia A*STAR di Singapore.

La ricerca ha sviluppato un metodo per favorire l'integrazione architettonica di pratiche di agricoltura urbana a emissioni climalteranti nulle con un focus su due contesti molto diversi: Milano, caratterizzata da un clima temperato, e Singapore, che si trova in zona climatica caldo-umida. Parallelamente ha individuato, attraverso un sistema basato su un gemello digitale (Clementi et alii, 2024), soluzioni innovative per migliorare la produttività agricola di sistemi integrati nell'architettura (trattati solo parzialmente in questo articolo). Da questo approccio metodologico sono state sviluppate linee guida per offrire indicazioni a chi intende attivare un percorso di integrazione architettonica sostenibile, frutto di una valutazione sinergica di risorse e scarti, in primo luogo l'acqua, provenienti dagli ambiti interessati.

L'acqua è sempre stata associata alla crescita della materia vegetale e l'agricoltura convenzionale e industriale sono tutt'oggi le attività umane che più drenano le risorse idriche del pianeta, infatti circa il 70% delle riserve idriche disponibili vengono utilizzate per attività agricole (Kay, 2022). L'SDG 6 mira anche a strategie efficaci per un'agricoltura urbana sostenibile integrata nell'ambiente costruito; l'acqua è presente all'interno degli edifici e dovunque sia prevista la presenza di persone; la richiesta d'acqua cambia anche a seconda delle piante, della stagione e dell'orientamento dei dispositivi produttivi integrati nell'edificio, mentre a parità di utenza nel corso dell'anno il fabbisogno di acqua legato alle attività antropiche rimane pressoché costante.

Questo tema apre a diverse chiavi di lettura, riflessioni e approfondimenti a seconda del contesto al quale ci si riferisce, questo perché l'acqua sottende a tutti gli ecosistemi e attività umane. L'acqua è infatti una risorsa potenzialmente disponibile nelle città (quella piovana può essere raccolta dalle superfici impermeabili), ma rappresenta anche una delle risorse con maggiori volumi di spreco: l'acqua entra per pochi secondi in un edificio e lo lascia sotto forma di scarto, insieme ad altri rifiuti metabolici, detergenti e inquinanti. Rispetto ai target associati all'SDG 6, riferiti tanto ai Paesi del Sud globale quanto a quelli del Nord, è da rilevare che essi presentano tematiche che vanno oltre la disponibilità di acqua potabile, i servizi igienico-sanitari e l'igiene per affrontare anche la qualità e la sostenibilità nella gestione delle risorse idriche (target 6.3 e 6.4).

Alla luce di quanto sopra premesso, il presente contributo introduce l'approccio metodologico sviluppato nella ricerca BIZE_UrFarm illustrando la sequenza di analisi e l'applicazione di possibili proposte migliorative, utili per l'integrazione architettonica di dispositivi per l'agricoltura urbana in un contesto urbanizzato e in grado di intercettare interdipendenze e interazioni positive tra gli SDG 2, 6, 7, 11, 12, 13 e 15 (Basso et alii, 2023; Valente et alii, 2022; Vacanti and Leonardi, 2024; Raman, Lathabai and Nedungadi, 2024).

Dopo aver esplicitato gli obiettivi del contributo e la sua collocazione nel panorama scientifico l'articolo descrive il processo di integrazione a partire da una prima fase di analisi caratterizzata dalla mappatura di risorse e consumi idrici ed energetici alle scale di quartiere e di blocco edilizio, utilizzando dati provenienti da fonti prevalentemente aperte. A seguire si illustrano i dispositivi per l'ottimizzazione del sistema produttivo da integrare nell'edificio, per concludere con la definizione di scenari possibili per attivare molteplici benefici tra gli SDG e limitarne le interferenze secondo un modello denominato BIZEA (Building Integrated Zero Emission Agriculture).

Obiettivi, approccio metodologico e fasi della ricerca | L'agricoltura urbana rappresenta una delle possibili sintesi di aspetti ambientali, sociali e in parte economici che sono alla base dello sviluppo sostenibile, già definito alla fine degli anni '80 del secolo scorso e promosso dalle Nazioni Unite. Sono ben note ormai le ricadute positive dell'agricoltura urbana, che vanno oltre la sicurezza alimentare e incidono sul miglioramento della qualità ambientale (Deksissa et alii, 2021) e dell'infrastruttura verde urbana (Susca, Gaffin and Dell'Osso, 2011; Hung and Peng, 2017), sulla coesione sociale e sul miglioramento della qualità architettonica degli edifici, in particolare per quelle forme che maggiormente si relazionano con l'ambiente costruito, come l'Agricoltura Integrata negli Edifici (BIA – Building Integrated Agriculture). Quest'ultima prevede l'inserimento di sistemi agroproduttivi fuori-suolo ad alte prestazioni (idroponici, aeroponici e acquaponici), all'interno di edifici, in facciata o sulla loro sommità con l'obiettivo di valorizzare le sinergie tra ambiente costruito e sistema produttivo in contesti urbani (D'Ostuni et alii, 2022).

I benefici menzionati intercettano, in forma più o meno diretta, molti dei 17 SDG (Fig. 1) e affinché si strutturino sinergie tra gli obiettivi è di fondamentale importanza mirare a forme di integrazione architettonica che consentano da un lato la riduzione delle emissioni di CO_2 (Tucci, Altamura and Pani, 2023) e degli apporti di elementi esterni al sistema (acqua, nutrienti, energia elettrica), dall'altro una simbiotica integrazione tra lo spazio fisico e le persone che usano gli edifici destinati a residenze, uffici, scuole, ecc. (Thomaier et alii, 2014; Specht et alii, 2014).

In tale ottica la ricerca BIZE_UrFarm ha sviluppato un approccio metodologico utile a ridefinire la BIA in chiave sostenibile, ovvero in chiave BIZEA (Building Integrated Zero Emission Agriculture), concetto che consente di affrontare aspetti quali la valorizzazione delle interazioni positive e la riduzione delle interferenze tra gli SDG e il riconoscimento di pratiche sostenibili di valutazione delle risorse e dei consumi basate sul metabolismo urbano (Valverde and Avilés-Palacios, 2021). In tal modo si intersecano i flussi di energia e di materia, si ottimizzano le risorse e si migliora il metabolismo urbano, riducendo gli impatti negativi sui cambiamenti climatici (Fig. 2).

Considerando che il 15-20% del cibo a scala globale viene prodotto all'interno dei contesti urbanizzati (Armar-Klemesu, 2000; Payen et alii, 2022), risulta sempre più importante osservare l'interdipendenza tra produzione sostenibile di cibo e uso dell'acqua, elemento alla base dell'agricoltura (Alcalde Sanz and Man, 2014). In relazione al fatto che l'acqua ha un elevato potenziale per contribuire a raggiungere anche gran parte degli altri obiettivi, il paper riporta un esempio di applicazione del percorso metodologico, articolato in linee guida, mirato a promuovere il sistema BIZEA.

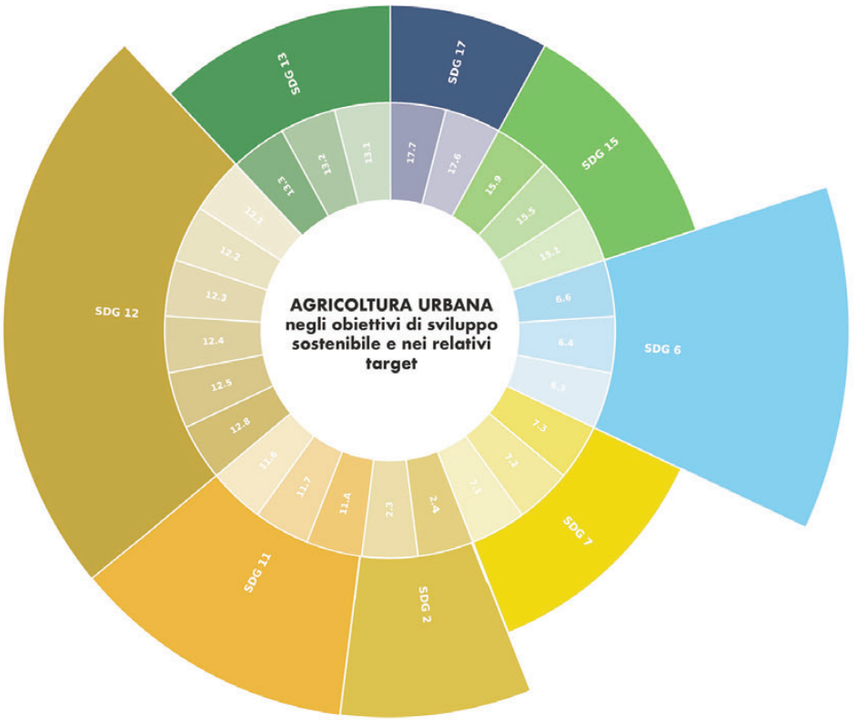
Il tema BIZEA si declina in modi diversi a seconda del contesto al quale si applica perché risponde a esigenze sociali, ambientali ed economiche con pesi e priorità che possono cambiare in maniera consistente in base al sito, esattamente come le priorità dei 17 SDG. L'implementazione dell'approccio attraverso il percorso tracciato dalle linee guida è rivolta a cittadini, associazioni o Pubbliche Amministrazioni che intendono realizzare un'integrazione architettonica di un modello di agricoltura urbana circolare per ridurre o persino annullare i consumi di energia e di acqua provenienti dall'esterno. Il sistema integrato edificio-pianta nasce dalla sinergia tra quattro ambiti, come riportato nella Figura 3.

In BIZE_UrFarm l'ambito della zona climatica, che prende in considerazione il clima temperato (Milano) e caldo-umido (Singapore), è strettamente legato a quello delle piante orticole (che possono variare molto in base al clima e al portamento) e in parte alla tecnologia produttiva. La scelta delle piante è strettamente connessa all'edificio: un piccolo albero può essere messo a dimora in copertura e non su una facciata, dove invece è possibile prevedere una pianta rampicante o decombente. Allo stesso modo la tecnologia produttiva, prevalentemente relativa al substrato, deve essere selezionata pensando all'elemento dell'edificio nel quale si può integra-

re: una copertura piana, una loggia o una facciata. Sulla base di questa connessione si innesta un ulteriore elemento, il dispositivo per l'ottimizzazione della produzione e del metabolismo che può essere una serra agricola in copertura, la chiusura di una loggia con funzione di serra agricola o bioclimatica, o tipologie di involucro performanti in grado di accelerare la crescita delle piante per ottenere più cicli di crescita in una stagione.

In questa fase si incrociano tipologie architettoniche e flussi di energia e materia molto differenti, perché legati alle specifiche funzioni degli edifici (diverse ad esempio quelle ad uso abitativo da quelle del terziario) e alla tipologia di utenza. Quindi nelle due sezioni che seguono si riportano la fase di mappatura dei flussi, che mette a sistema tutte le variabili presenti, e quella dell'individuazione dei dispositivi di supporto, che ottimizzano i flussi e contribuiscono alla riduzione dei consumi e degli scarti. La fase conclusiva del percorso indicato nelle linee guida rappresenta un supporto alle scelte progettuali di integrazione architettonica sostenibile per valutare scenari possibili che provengono da riferimenti a pratiche virtuose desunte dalla letteratura (Fig. 4).

Le immagini a supporto del testo si riferiscono ad alcuni risultati riportati su mappe elaborate in ambiente GIS di un'area localizzata a Milano (Fig. 5), individuata come caso studio per l'implementazione del processo. Il processo che guida l'integrazione architettonica intercetta le diverse scale della città e si basa su un percorso che dall'analisi delle risorse arriva all'individuazione di scenari migliorativi di integrazione architettonica dell'agricoltura a consumo zero. Al fine di illustrare le fasi principali della metodologia a supporto dell'applicazione delle linee guida, sono stati individuati due macroambiti di indagine relativi a differenti scale, quella urbana di quartiere e quella relativa all'edificio.



SDG 6 - ACQUA PULITA E SERVIZI IGIENICO-SANITARI	6.3 Migliorare la qualità dell'acqua riducendo l'inquinamento e aumentando il riciclaggio
	6.4 Aumentare in modo sostanziale l'efficienza nell'uso dell'acqua in tutti i settori
	6.6 Proteggere e ripristinare gli ecosistemi legati all'acqua (zone umide, fiumi, falde, laghi)
SDG 12 - CONSUMO E PRODUZIONE RESPONSABILI	12.1 Attuare il quadro decennale di programmi su consumo e produzione sostenibili
	12.2 Raggiungere la gestione sostenibile e l'uso efficiente delle risorse naturali
	12.3 Dimezzare lo spreco alimentare globale pro capite e ridurre le perdite lungo la filiera
	12.4 Conseguire una gestione ecologicamente corretta dei rifiuti durante il ciclo di vita
	12.5 Ridurre la produzione di rifiuti tramite prevenzione, riduzione, riciclaggio e riutilizzo
	12.8 Garantire informazioni e consapevolezza per sviluppo sostenibile in armonia con la natura
SDG 11 - CITTÀ E COMUNITÀ SOSTENIBILI	11.6 Ridurre l'impatto ambientale pro capite delle città (aria e rifiuti)
	11.7 Accesso universale a spazi verdi e pubblici sicuri, inclusivi e accessibili
	11.a Collegamenti economici, sociali e ambientali positivi tra aree urbane, periurbane e rurali
SDG 2 - SCONFIGGERE LA FAME	2.3 Sostegno ad agricoltori familiari e creazione di valore/occupazione non agricola
	2.4 Garantire sistemi alimentari sostenibili e pratiche agricole resilienti
SDG 7 - ENERGIA PULITA E ACCESSIBILE	7.1 Accesso universale a servizi energetici economici, affidabili e moderni
	7.2 Aumentare la quota di energia rinnovabile
	7.3 Raddoppiare il tasso di miglioramento dell'efficienza energetica
SDG 13 - LOTTA CONTRO IL CAMBIAMENTO CLIMATICO	13.1 Rafforzare resilienza e capacità di adattamento ai rischi climatici
	13.2 Integrare il clima in politiche, strategie e pianificazioni nazionali
	13.3 Migliorare istruzione, consapevolezza e capacità su mitigazione/adattamento
SDG 15 - VITA SULLA TERRA	15.1 Conservazione/ripristino e uso sostenibile degli ecosistemi terrestri e acque interne
	15.5 Ridurre il degrado degli habitat e arrestare la perdita di biodiversità
	15.9 Integrare i valori di ecosistemi e biodiversità nella pianificazione e nelle strategie
SDG 17 - PARTNERSHIP PER GLI OBIETTIVI	17.6 Rafforzare la cooperazione su scienza/tecnologia/innovazione e condivisione conoscenze
	17.7 Promuovere lo sviluppo e diffusione di tecnologie rispettose dell'ambiente nei PVS

Fig. 1 | SDGs compatible with a BIZEA approach (credit: the Authors, 2025).

Analisi transcalare e mappatura delle risorse locali | Una volta identificato il contesto generale attraverso la definizione della zona climatica e delle piante orticole compatibili, si possono mappare le informazioni relative alle specificità del contesto urbano e rappresentarne le potenziali interazioni. L'acquisizione di dati ad accesso aperto su popolazione, clima (radiazione solare e piovosità) e vegetazione urbana e il loro successivo inserimento in un GIS open source (Fig. 6) consentono di integrare informazioni di contesto in un unico supporto informatico e di produrre mappe tematiche utili a verificare l'applicabilità e l'efficacia delle strategie, a loro volta archiviate con specifiche schede di approfondimento. Tale disponibilità di informazione consente anche di elaborare linee guida in grado di orientare differenti tipi di utenza (cittadini, progettisti e pianificatori) nel riconoscere le potenzialità dell'area e identificare strategie sostenibili che riducano i consumi e gli scarti del complesso sistema edificio-dispositivi produttivi. Con questo tipo di analisi è possibile concorrere al raggiungimento di diversi SDG limitandone i potenziali compromessi.

A partire dalla scala di quartiere (su una maglia di circa 1.000 x 1.000 metri, utile a evidenziare le differenze tra sezioni censuarie) si definiscono le potenzialità dell'area in termini di clima, radiazione solare e DLI (Daily Light Integral, parametro legato alle ore di luce fotosinteticamente attiva in aree specifiche), disponibilità di acqua piovana e consumi delle utenze elaborati a partire da dati statistici. La mappatura della disponibilità di risorse, in particolare dell'acqua, è un valido metodo per mettere in relazione il tessuto urbano di un quartiere con la reale disponibilità idrica, per ridurre gli impatti negativi (target 11.6) e quantificare l'acqua che si riesce a raccogliere e riutilizzare. Importanti sono quindi i dati sulla piovosità dell'area (Tab. 1), necessari per elaborare l'effettiva capacità di captazione delle superfici disponibili, a terra e in copertura (Fig. 7).

Se la scala urbana serve prevalentemente a comprendere le potenzialità del contesto nell'accogliere interventi BIZEA, il passaggio alla scala dell'isolato / blocco edilizio (200 x 200 metri) e dell'edificio stesso è necessario per determinare le reali capacità di integrazione simbiotica tra edificio-agri-

coltura-persone (Clementi, Pereira Guimarães and Dessì, 2024): è qui che si definiscono una serie di variabili legate al metabolismo dell'edificio-sistema produttivo e al microclima locale, attraverso la valutazione del numero di ore di soleggiamento e dell'intensità della radiazione solare sulle superfici edificate esposte e sugli spazi esterni (Fig. 8). Questa risorsa varia molto a seconda della stagione e del fronte dell'edificio da valutare, che è condizionato dall'orientamento e dalla presenza di alberi o costruzioni limitrofe.

Per la valutazione del Bilancio Idrico Urbano, utile a definire le quantità che possono essere recuperate e riutilizzate, si individuano e si elaborano le variabili utili al calcolo utilizzando mappe tematiche specifiche, organizzandole in due macrocategorie relative a input e output (Dessì and Clementi, 2023): il calcolo si basa sul principio di conservazione della massa al trasferimento dell'acqua attraverso un bacino idrografico specifico (Chrysoulakis, De Castro and Moors, 2014), secondo la formula

$$P + I + F = E + R + \Delta W + \Delta A$$

dove P è la precipitazione, I è la fornitura idrica urbana (che si stima finisca al 90% nella fognatura), F è l'acqua rilasciata a causa dell'attività umana (per esempio l'acqua di condensa dell'impianto di condizionamento), E è l'evapotraspirazione, R è il deflusso, cioè la quantità di acqua intercettata dalle superfici impermeabili negli spazi aperti, mentre ΔW è la variazione netta dell'accumulo idrico e ΔA è l'advezione netta di umidità dentro e fuori dal volume di controllo. La formula utilizzata nella mappatura riportata in questo contributo è frutto di una semplificazione, perché prende in considerazione solo elaborazioni possibili a partire dagli dati disponibili sul territorio nazionale, escludendo di fatto le variabili ΔW e ΔA (Fig. 9).

Le variabili associate al bilancio idrico sono calcolate per sezione censuaria e consentono di elaborare possibili scenari di recupero dell'acqua, mettendo a sistema in maniera sostenibile l'edificio, la vegetazione produttiva e gli abitanti, tramite l'impiego di risorse che per un ambito (per esempio il residenziale) rappresentano scarti. Tra gli scenari possibili, oltre all'uso dell'acqua raccolta dalle coperture, si possono considerare le acque grigie, che, se opportunamente trattate, possono rientrare nel ciclo produttivo vegetazionale, rinsaldando la sinergia edificio-coltivazione.

Inoltre, nello specifico caso di dispositivi produttivi idroponici, soluzioni migliorative possono essere riferite all'approvvigionamento dei nutrienti, minerali solubili in soluzioni idriche (in quantità e metodi diversi in base al tipo di sistema di coltivazione e alla specie coltivata) che, se generati dal processo di recupero della sostanza organica prodotta nell'edificio, rafforzano la simbiosi edificio-coltivazione.

Individuazione dei dispositivi di supporto all'integrazione architettonica | L'analisi effettuata alla scala urbana, di isolato e di edificio permette di valutare la potenzialità dei manufatti esistenti di integrare dispositivi per la produzione agricola e di riconoscere la reale disponibilità di risorse provenienti dall'esterno (radiazione solare, acqua piovana) e dall'edificio stesso (scarti alimentari, acqua per uso domestico e da impianti di condizionamento). Tale potenzialità trova espressione tramite l'integrazione di dispositivi di supporto ai sistemi produttivi, anche multifunzionali come le serre in copertura, con l'applicazione di specifici elementi di involucro e l'uso di materiali innovativi (Ang et alii, 2024). Questi sistemi possono migliorare la produttività e ridurre i consumi delle risorse non rinnovabili e al contempo migliorare le condizioni dello spazio abitato.

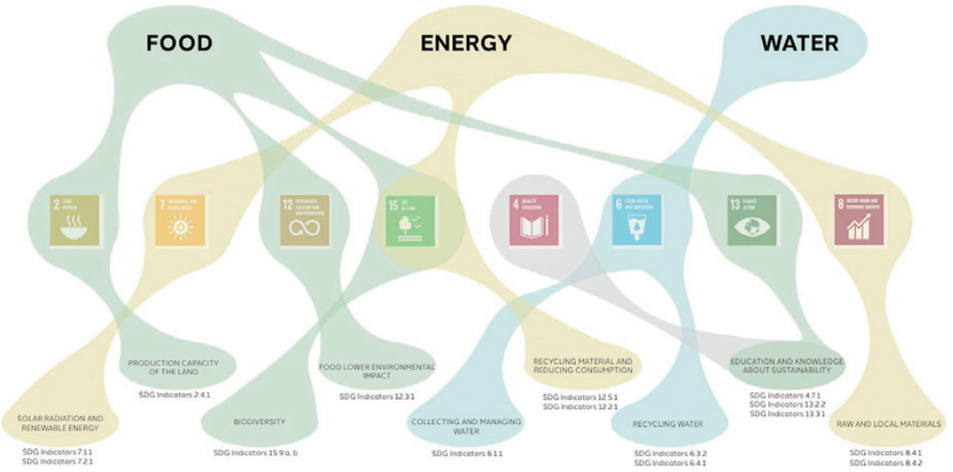


Fig. 2 | Example of SDG interconnections in a study of the metabolic system of a primary school (credit: Z. Delic and S. Fierro, 2025).

Un ulteriore aspetto da considerare riguarda le modalità di integrazione architettonica dell'agricoltura urbana e dei suoi dispositivi di ottimizzazione della produzione: essi rappresentano una vera e propria azione di progetto che, oltre a questioni di produzione (SDG 2) e recupero di scarti per trasformarli in nuove risorse (SDG 12), interessano direttamente la qualità architettonica dell'edificio, della città e della vita dei suoi abitanti (SDG 11).

Le modalità e le possibilità per integrare i dispositivi per la produzione agricola (vasche, serre, sistemi di irrigazione, produzione di energia, ecc.) nell'edificio sono selezionati tra i casi studio e le buone pratiche in grado di disegnare scenari migliorativi che sono riportati in schede di sintesi (Figg. 10, 11) e sono quindi parte integrante delle linee guida. In particolare le schede raccolgono informazioni su strategie, sistemi produttivi e dispositivi di supporto e possono essere utilizzate per l'integrazione di sistemi di produzione orticola in edifici di differenti tipologie e funzioni (residenze, scuole, uffici, ecc.) in diversi contesti urbani e climatici (Figg. 12, 13).

Risultati attesi | L'approccio metodologico proposto è supportato da valutazioni riportate in letteratura, ma anche da simulazioni e sperimentazioni sul campo i cui risultati confortano dal punto di vista della circolarità, con particolare riferimento all'interazione tra produzione / consumi energetici e tra approvvigionamento / consumo locale di acqua e nutrienti.

In particolare sulla base del sistema idroponico scelto, delle tecnologie applicate e dell'impianto installato, secondo Carotti et alii (2023) è possibile recuperare tra il 65 e il 96% dell'acqua utilizzata per ogni ciclo: nel caso in esame il risparmio idrico è generato dall'installazione di sistemi a ciclo chiuso che raccolgono l'acqua utilizzata e la rimettono in circolo, con le dovute precauzioni per mantenere costante la qualità ed entro i limiti dei valori di salinità e acidità per irrigare le piante. Grazie alla loro capacità di garantire un risparmio idrico significativo, di consentire un maggior controllo sulla produzione e sul raccolto e di ridurre la durata dei cicli produttivi le coltivazioni idroponiche si sono sempre più diffuse negli ultimi decenni.

Tuttavia accanto all'efficienza idrica emerge oggi un'altra questione centrale: la sostenibilità dell'approvvigionamento dei nutrienti. I principali macronutrienti impiegati in idroponica – azoto, fosforo e potassio – derivano da risorse finite e la loro estrazione o produzione è associata a significativi impatti ambientali. Il fosforo ad esempio proviene da rocce fosfatiche concentrate in poche aree del mondo (Africa e Medio Oriente), estratte con processi energivori che causano degrado del paesaggio ed elevate emissioni di CO_2 (Tervahauta, 2014; Holmes, Dang and Smith, 2019); l'azoto sintetizzato tramite il processo Haber-Bosch contribuisce a forti emissioni climalteranti e, se somministrato in eccesso, determina il fenomeno dell'eutrofizzazione delle acque; infine il potassio proviene anch'esso da estrazioni minerarie che comportano pressioni ambientali significative.

Anche in questo caso l'approccio BIZEA apre nuove possibilità, trasformando i flussi di scarto urbani in risorse per i sistemi idroponici. Recenti studi hanno dimostrato come i reflui degli edifici urbani possano essere trattati e trasformati in soluzioni nutritive per coltivazioni fuori suolo integrate nel contesto edilizio, chiudendo il ciclo dei nutrienti e riducendo la dipendenza da fertilizzanti di sintesi (D'Ostuni et alii, 2023). Sistemi di separazione alla fonte e tecnologie di trattamento innovative (come i processi di nitrificazione dei reflui) permettono di recuperare fino al 100% di fosforo e potassio e il 99% di azoto, garantendo al tempo stesso la depurazione dei reflui urbani (Magwaza et alii, 2020): tale strategia non solo riduce l'impatto ambientale rispetto ai fertilizzanti convenzionali, ma crea sinergie tra metabolismo urbano e sistemi alimentari, ponendo la coltivazione urbana, idroponica e fuori suolo al centro di strategie per la creazione di nuove relazioni metaboliche urbane che consentano un uso più efficiente delle risorse idriche in città (Zaffi and D'Ostuni, 2020).

Come accennato, il modello BIZEA valorizza le risorse che l'agricoltura urbana impiega, soprattutto quelle idriche (acqua piovana raccolta e intercettata dalle superfici impermeabilizzate) o recuperate dopo l'uso all'interno degli edifici (Ahmadi et alii, 2020), in un'ottica di produzione e consumo responsabile (SDG 12). Questa sinergia tra gli SDG 6 e 12 può determinare ulteriori sinergie con l'SDG 11, con riflessi positivi sul verde urbano (spazi verdi e pub-

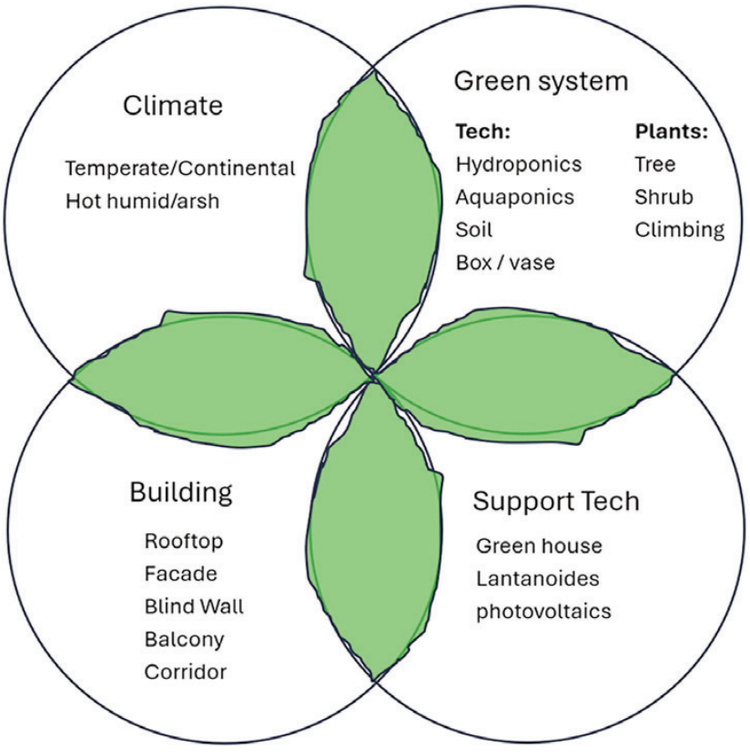


Fig. 3 | Domains involved in the BIZEA guidelines for developing a zero-emission, building-integrated urban agriculture system, highlighting the integration of climate, vegetation, the built environment, and supporting technologies for production optimisation (credit: the Authors, 2025).

blici sicuri, inclusivi e accessibili), sull'adattamento agli impatti dei cambiamenti climatici, con alleggerimento dei carichi delle infrastrutture grigie (Deksissa et alii, 2021) e delle isole di calore urbane (Iungman et alii, 2023; Žuvela-Aloise et alii, 2016; Muñoz-Liesa et alii, 2020; Susca, Zanghirella and Del Fatto, 2023), evidenziando ulteriormente la multifunzionalità degli elementi e l'interdipendenza degli obiettivi.

Lo stesso SDG 2, che è spesso rallentato dai sistemi di produzione estensiva legati all'uso di pesticidi con ricadute negative sugli altri SDG, è in grado nell'approccio BIZEA di generare interazioni positive: l'impiego di elementi di involucro innovativi nei dispositivi per la produzione orticola, per esempio in una serra, basati sull'uso di lantanoidi, può incrementare la quantità giornaliera di radiazione solare a onda corta e regolare la temperatura dell'aria, accelerando la crescita delle piante e la loro capacità produttiva, come sperimentato presso il Singapore Institute of Technology (Ang et alii, 2024) e nella ricerca BIZE_UrFarm (Goh et alii, 2025).

Questi benefici intercettano anche altri SDG; per esempio la stessa serra integrata nella loggia di un edificio residenziale (con funzione agricola e bioclimatica) è capace di determinare rilevanti differenze di temperatura tra la serra e l'esterno, con un delta che varia a seconda della zona climatica: in una zona a clima continentale in regime invernale la differenza può raggiungere i 10 °C (Reinberg, 2006), consentendo da un lato di coltivare alcuni tipi di ortaggi anche nella stagione invernale, dall'altro di ridurre il fabbisogno energetico per il riscaldamento dell'edificio di una percentuale variabile tra il 20 e l'80% (Reinberg, 2006; Herzog, Battisti and Tucci, 2012). In tal modo si soddisfano gli SDG 7 sull'accesso alle forme di energia e 13 nell'adattamento agli impatti dei cambiamenti climatici.

La produzione orticola in facciata o sulla copertura modifica il ruolo dell'edificio stesso, che non interrompe più l'infrastruttura verde, ma la rafforza a livello urbano (Susca, Gaffin and Dell'Osso, 2011); la stessa presenza di vegetazione, che rappresenta un miglioramento in termini di biodiversità per la presenza non solo di nuova flora, ma anche di microfauna, contribuisce al raggiungimento dell'SDG 15 (Lin, Philpott and Jha, 2015). Il verde multifunzionale pensato in chiave circolare genera così una relazione simbiotica tra l'edificio, i suoi utilizzatori e le piante, adeguandosi alle richieste dell'Agenda 2030 con un approccio sistemico nel quale l'attenzione agli aspetti di vulnerabilità non genera conflitti tra gli SDG.

Anche dal punto di vista della sostenibilità declinata nei tre ambiti ambientale, sociale ed economico, si può osservare che questo approccio metodologico risponde alle tre declinazioni, tenendo in considerazione non solo le capacità di ridurre il rischio di sicurezza alimentare e di incoraggiare l'autoproduzione, ma anche di ridurre gli sprechi.

Rischio di interazioni negative | L'approccio sistemico presentato, e soprattutto l'integrazione simbiotica dell'agricoltura urbana negli edifici, mettono al riparo da numerosi rischi di interazioni negative con gli SDG. In particolare pratiche agricole che richiedono elevate quantità d'acqua possono entrare in conflitto con il target 4 dell'SDG 6 che mira a incrementare l'efficienza nell'uso delle risorse idriche. Allo stesso modo l'impiego di fertilizzanti o substrati non sostenibili può compromettere il raggiungimento del target 2 dell'SDG 12 relativo al consumo e alla gestione sostenibile delle risorse naturali.

Sistemi produttivi energivori come le serre riscaldate o le colture idroponiche con elevati consumi di elettricità possono determinare un aumento delle emissioni climalteranti, ostacolando i progressi verso il target 2 dell'SDG 13, che promuove l'integrazione delle misure di mitigazione nelle politiche urbane. Ulteriori criticità potrebbero insorgere con l'SDG 9 per la competizione sullo spazio necessario alle infrastrutture e nell'SDG 11 per la realizzazione di nuovi edifici residenziali. Inoltre interventi mal pianificati negli spazi verdi urbani possono ridurre la biodiversità locale, entrando in potenziale contrasto con il target 5 dell'SDG 15, orientato a proteggere gli ecosistemi terrestri. Infine permangono rischi rispetto all'SDG 16 derivanti dalla mancanza di supporto o di promozione dei sistemi virtuosi da parte delle Istituzioni, assenza che limita un processo decisionale reattivo, inclusivo e rappresentativo a tutti i livelli.

Per evitare che tali criticità si traducano in compromessi strutturali il progetto deve incorporare fin dall'origine – e non in fase avanzata – strategie di mitigazione mirate, mentre sul piano istituzionale, è necessario attivare quadri di governance che prevedano incentivi fiscali, linee guida condivise e procedure autorizzative snelle, ma ancorate a rigorosi obiettivi ambientali; percorsi partecipativi con comunità e stakeholder assicurano trasparenza e legittimazione, contribuendo a un processo decisionale inclusivo in linea con lo spirito dell'SDG 16. In questo modo l'agricoltura urbana simbiotica diventa non solo compatibile con gli altri Obiettivi, ma catalizzatrice di sinergie: riduce la domanda di risorse, crea lavoro qualificato, rinforza i servizi ecosistemici e rafforza la resilienza urbana, dimostrando che un approccio integrato può trasformare i potenziali conflitti in opportunità di sviluppo sostenibile.

Riflessioni conclusive | Il modello BIZEA, basato sulla circolarità e finalizzato a raggiungere la neutralità climatica, prevede la messa a sistema di acqua, energia e materia vegetale al fine di limitare o azzerare l'impiego di risorse esterne al sistema, intercettando prioritariamente gli SDG 2, 6, 11 e 12 e favorendone il raggiungimento. I primi risultati dello studio offrono spunti di riflessione che sembrano confermare l'efficacia dell'approccio metodologico adottato e in particolare:

– l'analisi condotta a due scale urbane complementari (quella di quartiere su una maglia di 1.000 × 1.000 metri e quella dell'isolato su una maglia di 200 × 200 metri) consente di ottenere una visione complessiva delle risorse disponibili e delle caratteristiche del contesto e al contempo di produrre la mappatura dei flussi di energia e materia in termini di disponibilità / consumi / scarti;
– la formalizzazione delle soluzioni progettuali in schede BIZEA rende possibile la formulazione di scenari comparabili e verificabili, facilmente comprensibili ai potenziali pianificatori e utilizzatori finali;
– la metodologia sviluppata, restituita in termini di linee guida utilizzabili da diverse tipologie di fruitori, è trasferibile perché si adatta a diversi contesti spesso portatori di differenti esigenze e priorità, a condizione tuttavia che vi sia disponibilità di dati locali;
– l'impiego di dati pubblici e strumenti open source (workflow GIS e tabelle parametriche) garantisce la possibilità di implementare i dati nel tempo, seppur permangano i rischi generati da assunzioni e approssimazioni e da dati secondari con risoluzioni e aggiornamenti non omogenei;
– i processi naturali, caratterizzati da una variabilità stagionale meteorologica e colturale, possono essere rappresentati in modo non corretto se l'analisi o la restituzione dei dati si riferisce a un periodo limitato, legato a una specifica fase stagionale.

Tuttavia, affinché l'approccio metodologico si diffonda e trovi applicazione, si richiama il necessario supporto delle istituzioni (ad esempio per agevolare la reperibilità, la qualità e l'aggiornamento dei dati ad accesso aperto) e il coinvolgimento delle comunità locali per migliorare la gestione dell'acqua e dei servizi igienico-sanitari. La sinergia tra stile di vita, comportamenti degli utenti di un edificio e dispositivi di autoproduzione alimentare è in grado di innescare un meccanismo di consapevolezza che porta a comportamenti virtuosi e dunque sostenibili. È proprio il coinvolgimento della comunità nei processi la chiave per imprimere una spinta al raggiungimento degli SDG, soprattutto nei sistemi urbani, dove per definizione non esistono elementi isolati ma reti di interazioni, che possono produrre sinergie o conflitti a seconda del grado di sostenibilità perseguito.

A few years remain before the deadline for achieving the 17 Sustainable Development Goals (SDGs). Regarding SDG 6 (Clean Water and Sanitation), several studies conducted between 2015 and 2024 have documented only modest progress, reporting a global improvement in access to water from 70% to 74% and an increase in sanitation services from 47% to 54% (Rajapakse, Otoo and Danso, 2023; Requejo-Castro, Giné-Garriga and Pérez-Foguet, 2020). While there is a broad consensus on the need to reinvigorate strategies to achieve the goals by 2030, it is worth recalling that, from the outset of the Agenda, the integrated and indivisible nature of the SDGs was emphasised (UN, 2015). Understanding how these goals are interconnected can support the development of strategies that maximise co-benefits and synergies while minimising trade-offs among the various SDGs (Beisheim and Weinlich, 2023; Pradhan, 2023; Nicholls et alii, 2020), which are often a considerable source of slowdowns in implementing the Agenda.

Since their adoption, a growing number of studies and publications have focused on identifying and analysing the interconnections among the SDGs (Bennich et alii, 2023), as well as on methods, approaches, and tools to develop and optimise these linkages (Bennich et alii, 2023; Rajapakse, Otoo and Danso, 2023; Horvath, 2022; Fader et alii, 2018). Several authors have examined the interconnections involving SDG 6, which in some cases are necessary and in others desirable (Raman, Lathabai and Nedungadi, 2024; Bennich et alii, 2023), as it is among the goals with the highest number of positive interactions and synergies (Fader et alii, 2018).

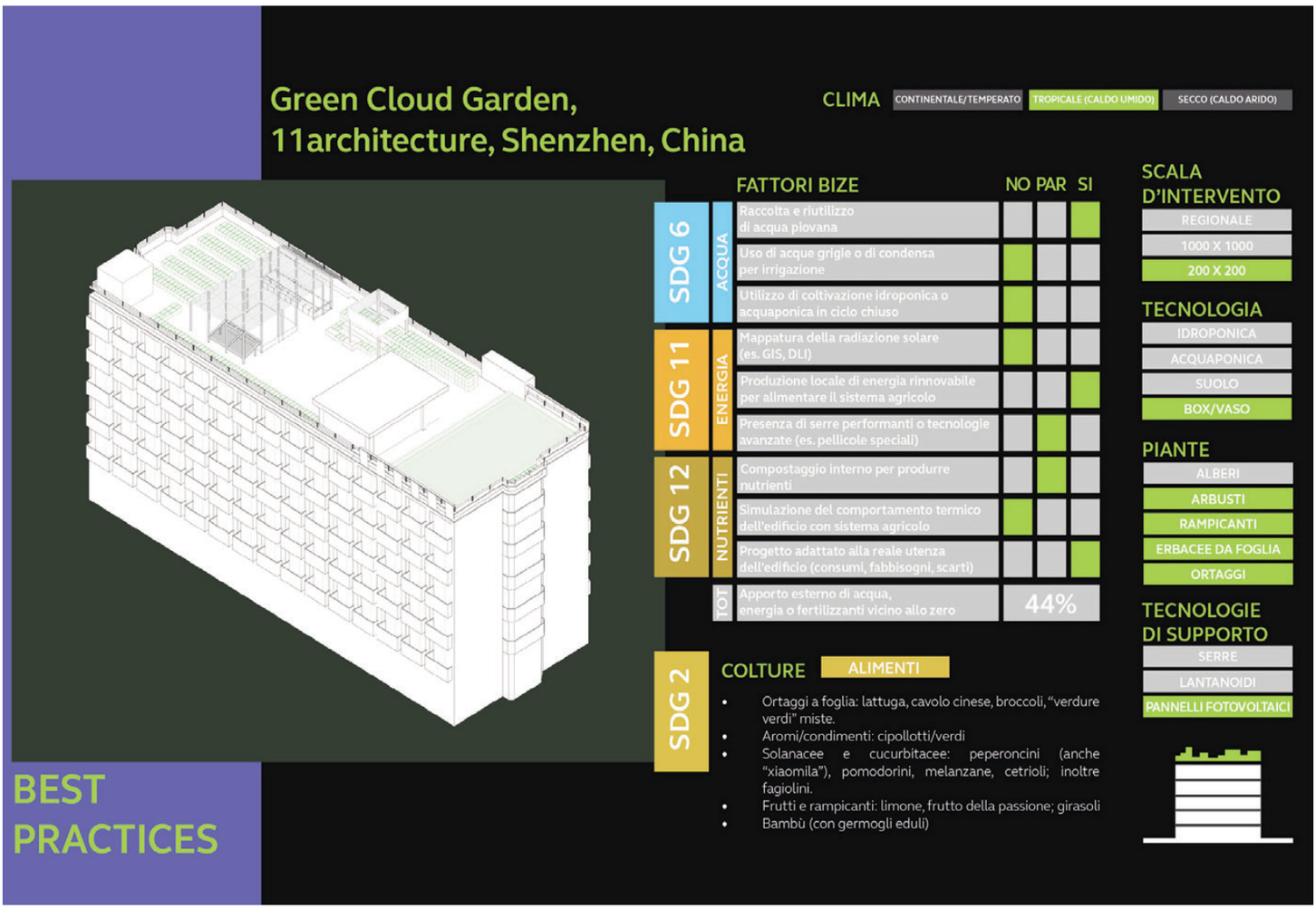


Fig. 4 | Template of a best-practice sheet, part of the BIZE_UrFarm guidelines, helpful in guiding BIA interventions (credit: the Authors, 2025).

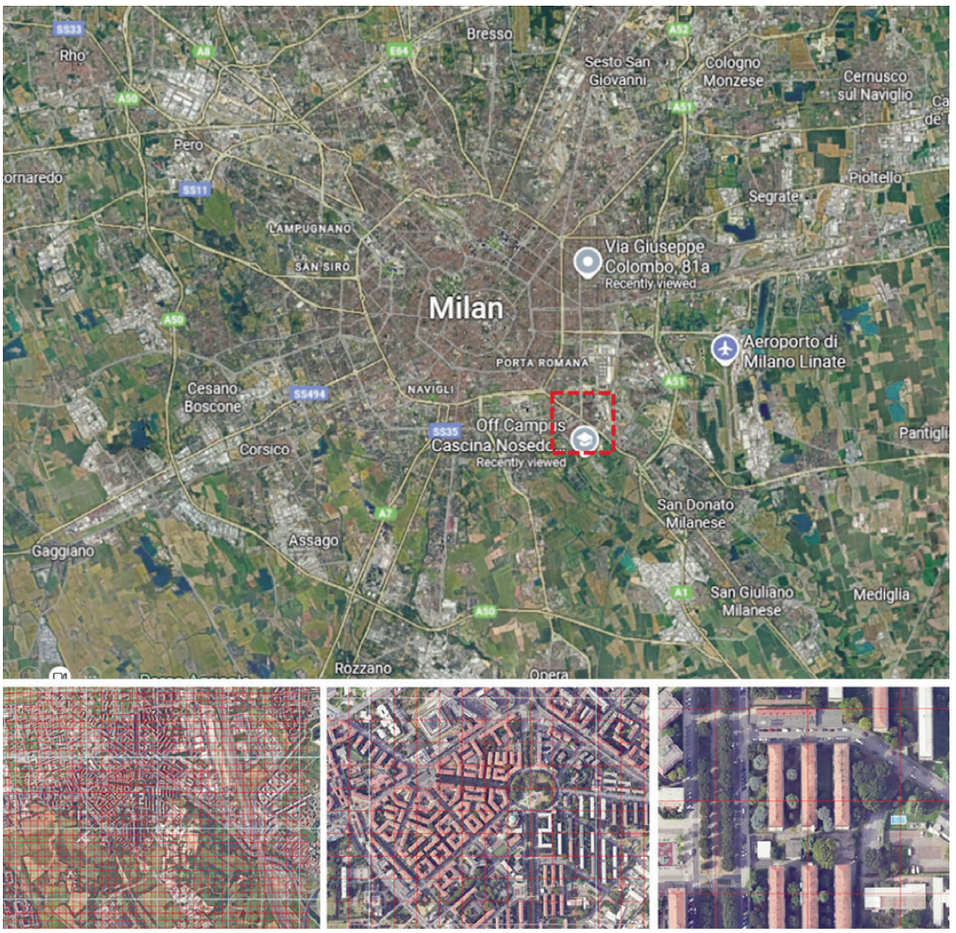


Fig. 5 | Map of the selected case study area, the Corvetto district in Milan, with extracts from 1,000 × 1,000 m and 200 × 200 m grids (credit: the Authors, 2025).

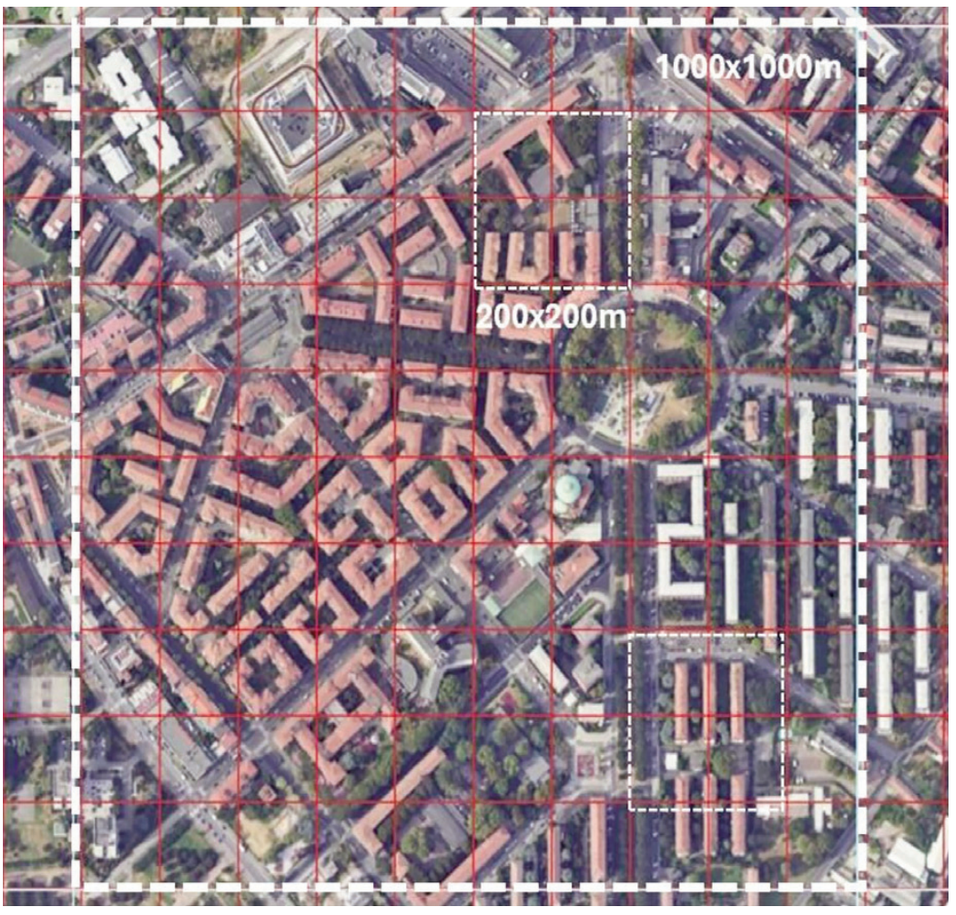


Fig. 6 | 1,000 × 1,000 m and 200 × 200 m grids overlaid on a city portion, showing the areas used for analyses appropriate to each scale (credit: the Authors, 2025).

By contrast, SDG 2 exhibits the most significant number of negative interactions, as extensive food production is heavily dependent on other resources. Achieving this goal through conventional – often unsustainable – methods risks causing significant harm to ecosystems (Fader et alii, 2018; FAO, 2019, 2021).

From this perspective, the article aims to foster potential positive interconnections by presenting the methodological approach developed under the 'Progetti di Grande Rilevanza' program (2023-2025), as part of the bilateral research initiative BIZE_UrFarm. This project is coordinated by the Politecnico di Milano and the Singapore Institute of Technology, in collaboration with the Faculty of Agriculture of the University of Bologna, and it is partially funded by the Italian Ministry of Foreign Affairs and International Cooperation and Singapore's A*STAR Agency.

The research developed a method to promote the architectural integration of urban agriculture practices with net-zero greenhouse gas emissions, focusing on two markedly different contexts: Milan, characterised by a temperate climate, and Singapore, located in a hot-humid climatic zone. In parallel, through a digital twin-based system (Clementi et alii, 2024), the study identified innovative solutions to enhance the agricultural productivity of architecture-integrated systems – although these are only partially considered in this article. From this methodological approach, a set of guidelines was derived to provide insights for those aiming to initiate a process of sustainable architectural integration, grounded in the synergistic assessment of local resources and waste flows – primarily water – originating from the contexts under consideration.

Water has always been intrinsically linked to the growth of plant matter, and conventional as well as industrial agriculture remain the human activities that most heavily deplete the planet's freshwater resources. Approximately 70% of the world's available water is currently used for agriculture (Kay, 2022). SDG 6 also calls for the development of effective strategies for sustainable urban agriculture integrated within the built environment. Water is present throughout buildings and wherever people are expected to be; water demand varies according to plant species, season, and the orientation of productive systems integrated into the building, whereas the water needs associated with anthropogenic activities remain relatively constant throughout the year for a given user base.

This topic allows for multiple interpretations and lines of inquiry depending on the context, as water underlies all ecosystems and human activities. Water is, in fact, a resource that can be potentially harnessed within cities – rainwater, for instance, can be collected from impermeable surfaces – yet it also represents one of the most wasted resources: it enters a building for just a few seconds before leaving it as wastewater, combined with other metabolic residues, detergents, and pollutants. With respect to the targets associated with SDG 6, applicable to both the Global South and the Global North, it is important to note that they go beyond mere access to drinking water, sanitation, and hygiene. They also encompass the quality and sustainability of water resource management (targets 6.3 and 6.4).

In light of the above, this contribution presents the methodological approach developed within the BIZE_UrFarm research project, illustrating the sequence of analyses and the application of potential improvement strategies aimed at facilitating the architectural integration of urban agriculture systems within urbanised contexts. This integration seeks to identify and enhance positive interdependencies and interactions among SDGs 2, 6, 7, 11, 12, 13, and 15 (Basso et alii, 2023; Valente et alii, 2022; Vacanti and Leonardi, 2024; Raman, Lathabai and Nedungadi, 2024). After outlining the objectives of the study and situating it within the broader scientific context, the article describes the integration process, which begins with an analytical phase focused on mapping water, energy resources and consumption at both the neighbourhood and building-block scales, primarily utilising open-source data. It then presents the devices proposed to optimise productive systems integrated into buildings, and concludes by defining potential scenarios that generate multiple benefits across the SDGs while minimising trade-offs, based on the BIZEA (Building Integrated Zero Emission Agriculture) model.

Average 2008/2014	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	TOT x year
	79.9	74.1	75.7	97.4	91.8	79.9	76.4	48.1	63.2	69.1	172.2	78.8	1,006.6

Tab. 1 | Monthly rainfall data (mm/month) for the urban area of Milan: values represent the annual average between January 2008 and December 2014 (credit: Comune di Milano, 2022).

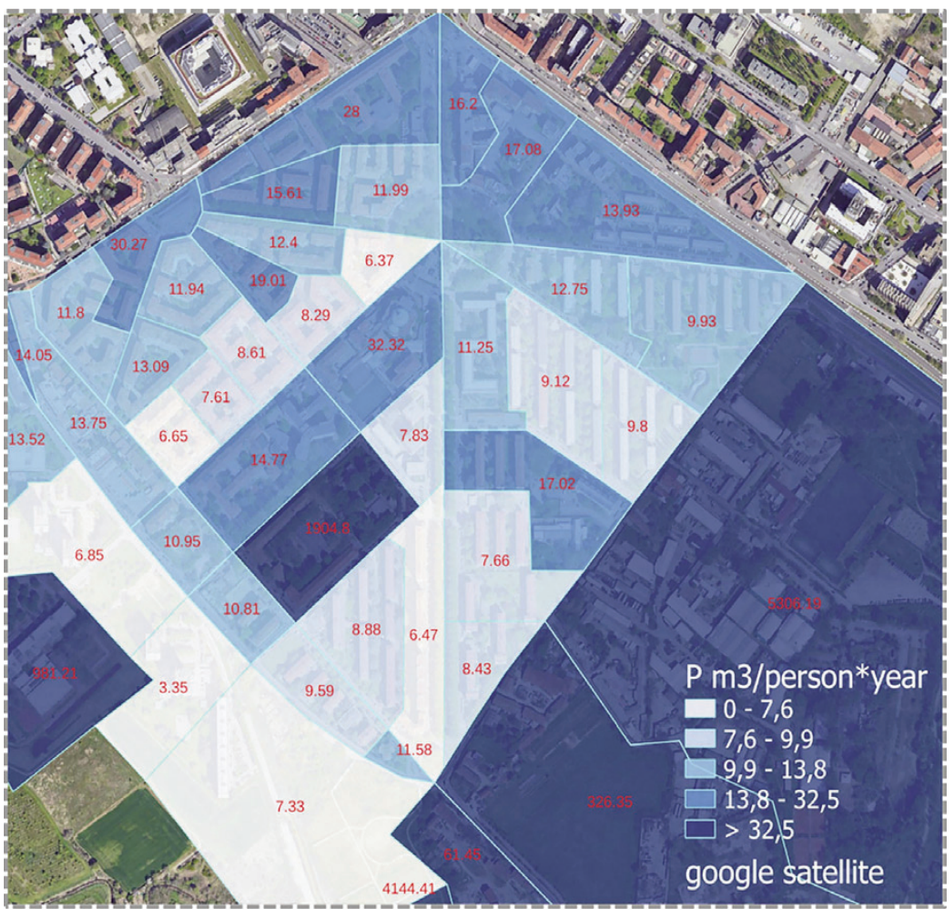


Fig. 7 | Mapping of annual water captured (P) from rooftops and impermeable surfaces within a 1,000 × 1,000 m quadrant (credit: M. Clementi and V. Dessì, 2023).

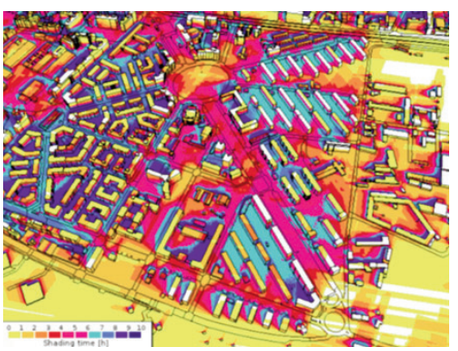


Fig. 8 | Solar radiation availability map for a neighbourhood, created by overlaying hourly shading maps (credit: M. Clementi, V. Dessì, and G. Pereira).



Fig. 9 | Urban block showing water distribution in terms of inflow and consumption: numerical values in circles indicate, from top to bottom, annual cubic meters of water per section (left) and per inhabitant (right), in the order: C, I, F, and R (credit: M. Clementi and V. Dessì, 2023).

Objectives, methodological approach, and research phases | Urban agriculture represents one possible synthesis of environmental, social, and, to some extent, economic dimensions that underpin the concept of sustainable development, first articulated in the late 1980s and promoted by the United Nations. The positive impacts of urban agriculture are now well established, extending beyond food security to include improvements in environmental quality (Deksissa et alii, 2021) and the enhancement of urban green infrastructure (Susca, Gaffin and Dell'Osso, 2011; Hung and Peng, 2017), as well as in social cohesion and the architectural quality of buildings – particularly in forms that interact more directly with the built environment, such as Building Integrated Agriculture (BIA). The BIA concept involves incorporating high-performance soilless agricultural systems (hydroponic, aeroponic, and aquaponic) within, on, or atop buildings to leverage synergies between the built environment and productive systems in urban contexts (D'Ostuni et alii, 2022).

The benefits mentioned above directly or indirectly intersect with many of the 17 SDGs (Fig. 1). To foster synergies among these goals, it is essential to pursue forms of architectural integration that, on the one hand, reduce CO_2 emissions (Tucci, Altamura and Pani, 2023) and the input of external resources (water, nutrients, electricity), and on the other hand, promote a symbiotic relationship between physical space and the people who inhabit buildings – whether residential, office, or educational (Thomaier et alii, 2014; Specht et alii, 2014).

In this context, the BIZE_UrFarm research project has developed a methodological approach that redefines Building Integrated Agriculture (BIA) through a sustainability-oriented BIZEA (Building Integrated Zero Emission Agriculture) perspective. This approach focuses on enhancing positive interactions and reducing trade-offs among the SDGs, while identifying sustainable practices for assessing resource use and consumption in line with the principles of urban metabolism (Valverde and Avilés-Palacios, 2021). By intertwining flows of energy and materials, this methodology optimises resource use and improves urban metabolism, thereby mitigating negative impacts on climate change (Fig. 2).

Considering that 15-20% of global food production takes place within urbanised contexts (Armar-Klemesu, 2000; Payen et alii, 2022), the interdependence between sustainable food production and water use—fundamental to agriculture—has become increasingly evident (Alcalde Sanz and Man, 2014). Given water's immense potential to contribute to achieving numerous SDGs, this paper presents an example of applying the methodological pathway, structured as a set of guidelines, aimed at promoting the BIZEA system.

The BIZEA framework can be adapted to different contexts, as it responds to social, environmental, and economic needs whose priorities may vary significantly by site – much as the 17 SDGs themselves do. The implementation of the approach, guided by the proposed set of guidelines, is aimed at citizens, associations, and public administrations interested in realising an architecturally integrated model of circular urban agriculture capable of reducing or even eliminating external energy and water inputs. The integrated building-plant system arises from the synergy among four key domains, as illustrated in Figure 3.

Within BIZE_UrFarm, the climatic zone – considering both temperate (Milan) and hot-humid (Singapore) climates – is closely linked to the horticultural domain (which varies considerably by climate and growth form) and, to some extent, to productive technology. Plant selection is intrinsically related to the building typology. For example, a small tree may be planted on a rooftop but not on a facade, where climbing or trailing plants would be more appropriate. Similarly, the productive technology, mainly concerning the substrate, must be chosen with respect to the building element into which it will be integrated – such as a flat roof, a loggia, or a facade.

Building upon this connection, an additional element is introduced: the device for optimising production and metabolism, which may consist of an agricultural greenhouse on a rooftop, the enclosure of a loggia functioning as a farming or bioclimatic greenhouse, or high-performance facade systems capable of accelerating plant growth and achieving multiple growth cycles within a single season.

At this stage, architectural typologies intersect with highly variable energy and material flows, as they are linked to the specific functions of buildings (e.g., residential versus tertiary) and to user typologies. The following two sections, therefore, present the mapping phase, which systematises all the variables involved, and the identification phase for supporting devices, which optimise flows and help reduce both consumption and waste. The final phase of the guideline-based process provides design support for sustainable architectural integration, helping to evaluate potential scenarios derived from virtuous practices identified in the literature (Fig. 4).

The images accompanying the text refer to selected results represented on GIS-based maps of an area in Milan (Fig. 5), identified as the case study for process implementation. The process guiding architectural integration operates across multiple urban scales and is structured along a path that progresses from resource analysis to the identification of improved architectural integration scenarios for zero-consumption agriculture. To illustrate the main phases of the methodology supporting the application of the guidelines, two main fields of investigation were identified, corresponding to different scales: the urban / neighbourhood scale and the building scale.

Cross-scale analysis and mapping of local resources | Once the general context has been identified – through the definition of the climatic zone and the selection of compatible horticultural crops – it becomes possible to map the characteristics of the urban context and represent potential interactions. The acquisition of open-access data on population, climate (solar radiation and precipitation), and urban vegetation, followed by their integration into an open-source GIS platform (Fig. 6), allows for the consolidation of contextual information within a single digital framework and the production of thematic maps helpful in assessing the applicability and effectiveness of proposed strategies. These maps are subsequently archived along with detailed informational sheets.

The availability of such data also facilitates the development of guidelines to support different types of users – citizens, designers, and planners – in recognising the area's potential and identifying sustainable strategies that minimise resource consumption and waste within the complex building-productive system. This type of analysis can contribute to achieving multiple SDGs while mitigating potential trade-offs.

At the neighbourhood scale (using a grid of approximately 1,000 × 1,000 meters, suitable for highlighting differences between census tracts), the area's potential is defined in terms of climate, solar radiation, Daily Light Integral (DLI, a measure of photosynthetically active light hours in specific areas), rainfall availability, and utility consumption derived from statistical data. Mapping resource availability

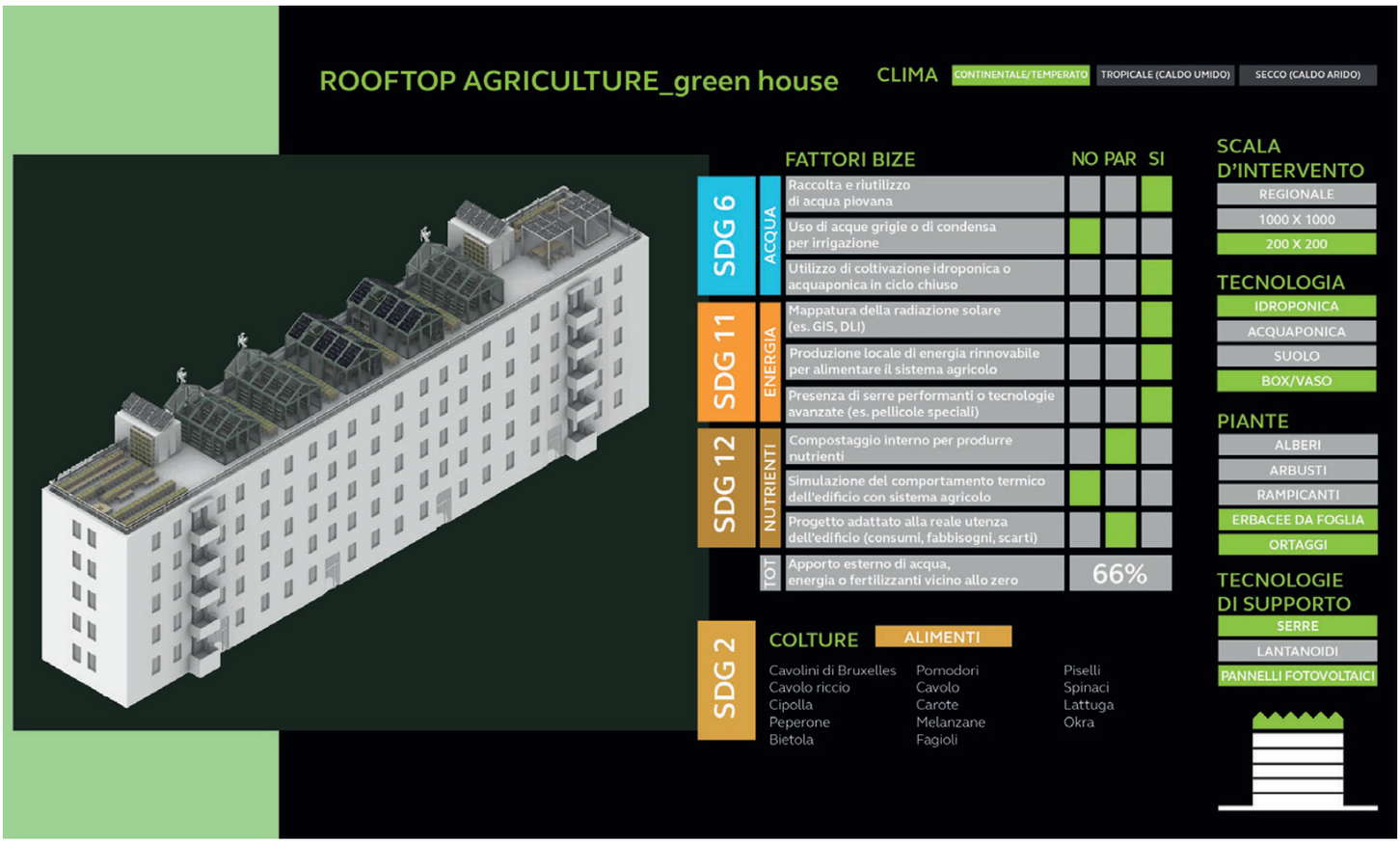


Fig. 10 | Example BIA sheet showing technological description, plant species, supporting technologies (in this case, greenhouses), and correspondence with SDGs (credit: the Authors, 2024).

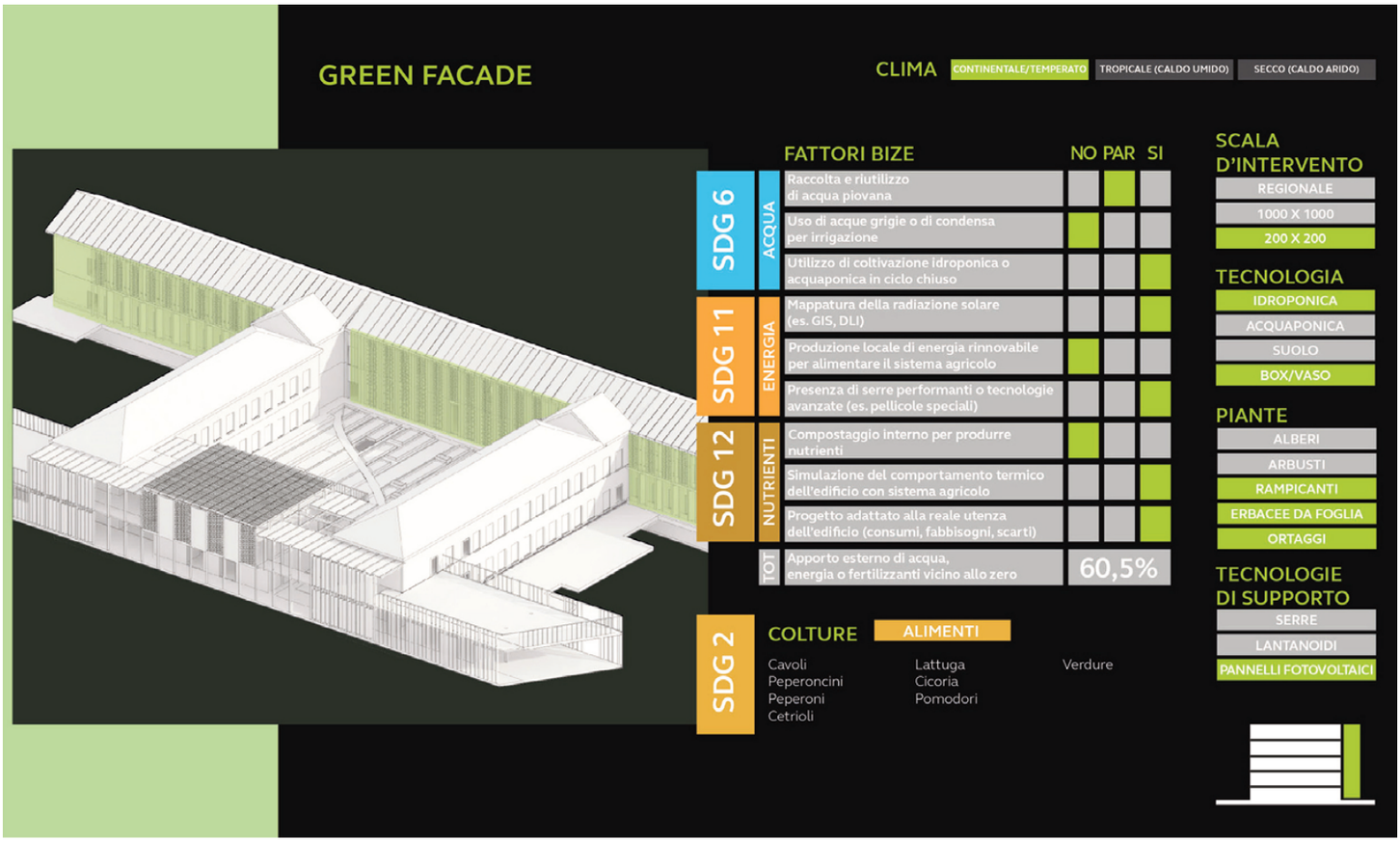


Fig. 11 | Example BIA sheet for facade-based integration, including technologies, plants, and correspondence with SDGs (credit: the Authors, 2024).

– particularly water – is a valuable method to interconnect the urban fabric of a neighbourhood to actual water availability, reduce negative impacts (target 11.6), and quantify the volume of water that can be collected and reused. Data on local precipitation (Tab. 1) are, therefore, essential for understanding the actual capture capacity of available surfaces, both at ground level and on roofs (Fig. 7).

While the urban scale primarily serves to understand the context's potential for hosting BIZEA interventions, transitioning to the block / parcel scale (200 × 200 meters) and to the building level is necessary to determine the real capacities for symbiotic integration between buildings, agriculture, and people (Clementi, Pereira Guimarães and Dessì, 2024). At this scale, a range of variables related to the building-productive system metabolism and the local microclimate are defined, including the assessment of sunlight exposure hours and solar radiation intensity on building envelope surfaces and external spaces (Fig. 8).

These resources vary significantly depending on the season and the building facade under evaluation, which is affected by orientation and the presence of nearby vegetation or constructions. For the assessment of the Urban Water Balance, which informs the quantification of recoverable and reusable water, relevant variables are identified and processed using specific thematic maps, organised into two main categories corresponding to inputs and outputs (Dessì and Clementi, 2023). The calculation is based on the principle of mass conservation during water transfer within a watershed (Chrysoulakis, De Castro and Moors, 2014), according to the formula

$$P + I + F = E + R + \Delta W + \Delta A$$

where P represents precipitation, I the urban water supply (of which approximately 90% is estimated to enter the sewage system), F the water released due to human activities (e.g., water condensation from air conditioning systems), E the evapotranspiration, R represents runoff, i.e., the volume of water intercepted by impermeable surfaces in open spaces, while ΔW is the net change in water storage, and ΔA the net advection of moisture into and out of the control volume. The formula applied in the mapping presented in this study represents a simplification, as it considers only the variables derived from nationally available datasets, effectively excluding ΔW and ΔA (Fig. 9).

The variables associated with the water balance are calculated at the census tract level, allowing the development of potential water recovery scenarios. These scenarios aim to sustainably integrate the building, productive vegetation, and occupants by utilising resources that, in specific contexts (e.g., residential areas), would otherwise be considered waste. Beyond rooftop-harvested water, greywater can also be considered; if appropriately treated, it can re-enter the vegetative production cycle, reinforcing the building-cultivation synergy.

In the specific case of hydroponic production systems, additional improvements can target nutrient supply – soluble minerals in aqueous solutions – which vary in quantity and application depending on the cultivation system and crop species. When nutrients are obtained from the recovery of organic matter generated within the building, this process further strengthens the symbiosis between building and cultivation.

Identification of devices supporting architectural integration | The analysis performed at urban, block, and building scales enables evaluation of existing structures' capacity to accommodate devices for agricultural production. It also facilitates the assessment of resources, both external (solar radiation, rainfall) and internal from the building itself (food waste, domestic water, and water condensation from air-conditioning). This potential is enhanced by integrating support devices for productive systems, such as multifunctional elements, rooftop greenhouses, specific envelope components, and innovative materials (Ang et alii, 2024). Such systems can significantly enhance productivity, reduce consumption of non-renewable resources, and simultaneously improve the quality of occupied spaces.

Another important consideration is the architectural integration of urban agriculture and the optimisation devices used to produce it. These interventions go beyond addressing production needs (SDG 2) and waste recovery for resources (SDG 12) and also have direct impacts on the architectural quality of buildings and urban environments, as well as the lives of their occupants (SDG 11).

The methods and possibilities for integrating agricultural production devices – including planters, greenhouses, irrigation systems, and energy production systems – within buildings are selected from case studies and best practices able to generate improved scenarios. These are presented in synthesis sheets (Figg. 10, 11) and form an integral part of the guidelines. Specifically, the sheets compile information on strategies, production systems, and support devices that can be applied to integrate horticultural production systems into buildings of diverse types and functions (residential, educational, office, and more) across different urban and climatic contexts (Figg. 12, 13).

Expected results | The proposed methodological approach is supported by both literature-based evaluations and field simulations and experiments, whose results are consistent with circularity princi-

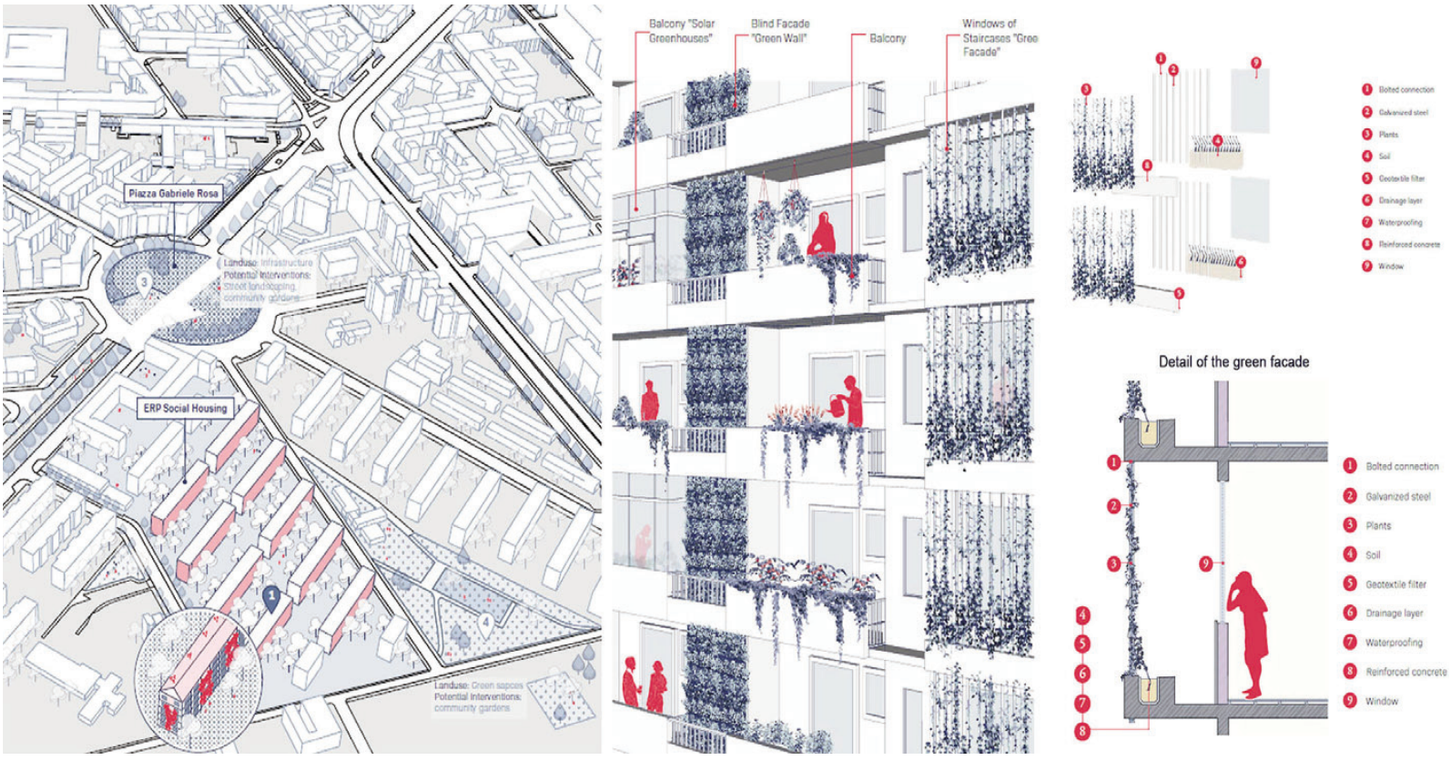


Fig. 12 | Architectural integration scenario of urban agriculture devices on the facade of a residential building (credit: S. Kelesouglu and I. H. Sreihin, 2024).

ples, particularly regarding interactions between production and energy consumption, as well as local water and nutrient supply and use. Specifically, based on the chosen hydroponic system, applied technologies, and installed facilities, Carotti et alii (2023) report that between 65% and 96% of water used per production cycle can be recovered. In the this case, water saving is performed through closed-loop systems that collect and recirculate water, with appropriate precautions to maintain water quality and keep salinity and pH within acceptable limits for irrigation. Due to their ability to achieve water savings, provide greater control over production and harvest, and shorten production cycles, hydroponic cultivation systems have become increasingly widespread in recent decades.

While improving water-use efficiency, the sustainability of nutrient supply has become an equally critical issue. The main macronutrients used in hydroponics – nitrogen, phosphorus, and potassium – are derived from finite resources, and their extraction or production is associated with significant environmental impacts. For example, phosphorus is obtained from phosphate rock concentrated in a few global regions (Africa and the Middle East), extracted via energy-intensive processes that cause landscape degradation and high CO_2 emissions (Tervahauta, 2014; Holmes, Dang and Smith, 2019). Nitrogen, synthesised via the Haber-Bosch process, is a notable source of greenhouse gas emissions. Excessive application can also cause water eutrophication. Similarly, potassium is sourced from mining operations that exert considerable environmental pressure.

The BIZEA approach offers innovative solutions by transforming urban waste flows into resources for hydroponic systems. Recent studies demonstrate that urban building effluents can be treated and converted into nutrient solutions for soilless cultivation integrated within buildings, closing nutrient cycles and reducing dependence on synthetic fertilisers (D'Ostuni et alii, 2023). Source-separation systems and innovative treatment technologies, such as effluent nitrification, permit recovery of up to 100% of phosphorus and potassium and 99% of nitrogen, while simultaneously purifying urban wastewater (Magwaza et alii, 2020). This strategy not only mitigates environmental impacts compared with conventional fertilisers but also generates synergies between urban metabolism and food systems, positioning urban, hydroponic, and soilless cultivation at the centre of strategies for creating new urban metabolic relationships and more efficient urban water use (Zaffi and D'Ostuni, 2020).

As mentioned, the BIZEA model optimises the resources employed by urban agriculture, particularly water (harvested rainwater or water recovered after use within buildings (Ahmadi et alii, 2020) from a perspective of responsible production and consumption (SDG 12). The synergy between SDGs 6 and 12 can further enhance SDG 11, with positive effects on urban greenery (safe, inclusive, and accessible green spaces), climate change adaptation, reduced burden on grey infrastructure (Deksissa et alii, 2021), and mitigation of urban heat islands (Iungman et alii, 2023; Žuvela-Aloise et alii, 2016; Muñoz-Liesa et alii, 2020; Susca, Zanghirella and Del Fatto, 2023), highlighting the multifunctionality of these elements and the interdependence of objectives.

While SDG 2 is often challenged by large-scale production systems that rely heavily on pesticides – leading to negative impacts on other SDGs, the BIZEA approach can foster positive interactions. Innovative envelope elements in horticultural production devices, such as greenhouses employing lanthanides, can increase shortwave solar radiation and regulate air temperature, accelerating plant growth and productivity, as demonstrated at the Singapore Institute of Technology (Ang et alii, 2024) and in the BIZE_UrFarm research (Goh et alii, 2025).

These benefits extend to additional SDGs. For instance, a greenhouse integrated into a residential building's loggia (serving both agricultural and bioclimatic functions) can produce significant temperature differences between the interior and exterior, with deltas varying by climate zone. In a continental climate, winter temperatures can vary by up to 10 °C (Reinberg, 2006), enabling the cultivation of certain vegetables during winter while reducing heating energy demand by 20-80% (Reinberg, 2006; Herzog, Battisti and Tucci, 2012). This heat exchange addresses SDG 7 (access to energy) and SDG 13 (climate change adaptation).

Facade or rooftop horticultural production transforms the role of the building itself, enhancing rather than interrupting urban green infrastructure (Susca, Gaffin and Dell'Osso, 2011). The presence of vegetation, which introduces new flora and supports microfauna, contributes to SDG 15 (Lin, Philpott and Jha, 2015). Circularly designed multifunctional greenery thus creates a symbiotic relationship among the building, its occupants, and plants, addressing the 2030 Agenda with a systemic approach that ensures attention to vulnerabilities does not create conflicts among SDGs.

From an environmental, social, and economic sustainability perspective, this methodological approach meets all three dimensions. It not only enhances food security and encourages self-production but also reduces waste, embodying a holistic model of urban, circular, and integrated agriculture.

Risk of negative interactions | The systemic approach presented, and particularly the symbiotic in-

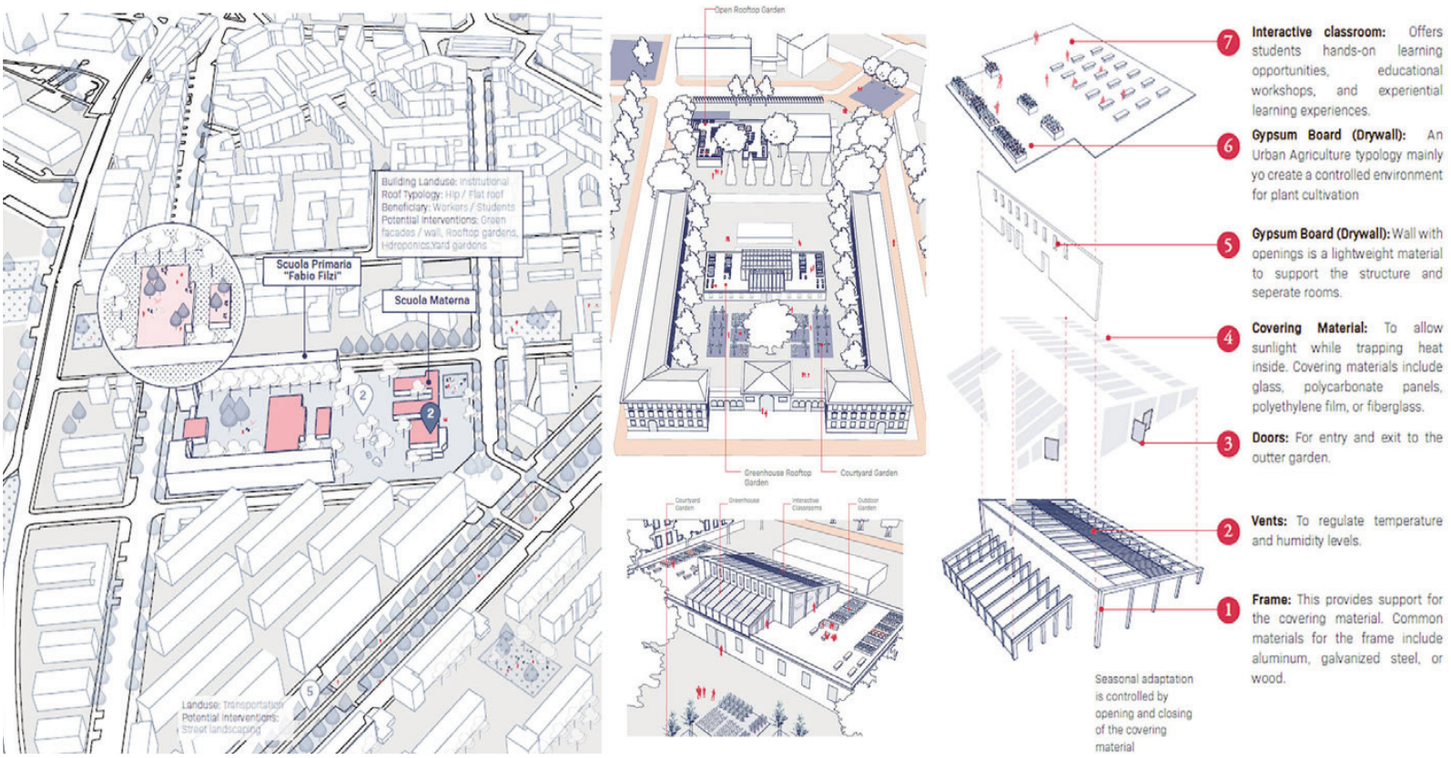


Fig. 13 | Architectural integration scenario of a greenhouse on the rooftop of a school building (credit: S. Kelesouglu and I. H. Sreihin, 2024).

tegration of urban agriculture within buildings, mitigates many potential risks of negative interactions with the SDGs. Agricultural practices requiring high water consumption, for instance, may conflict with target 6.4 of SDG 6, which aims to improve water-use efficiency. Similarly, the use of unsustainable fertilisers or substrates can undermine progress toward target 12.2 of SDG 12, concerning sustainable consumption and management of natural resources. Energy-intensive production systems, such as heated greenhouses or hydroponic cultivation with high electricity demands, may increase greenhouse gas emissions, potentially hindering progress toward target 13.2 of SDG 13, which promotes integrating climate mitigation measures into urban policies. Additional criticalities could arise with SDG 9, due to competition for space required by infrastructure, and SDG 11, in the context of new residential building developments. Poorly planned interventions in urban green spaces may also reduce local biodiversity, potentially conflicting with target 15.5 of SDG 15, which aims to protect terrestrial ecosystems. Finally, risks persist regarding SDG 16 due to insufficient institutional support or promotion of virtuous systems, which limit reactive, inclusive, and representative decision-making at all levels.

To prevent these issues from translating into structural compromises, mitigation strategies must be encompassed from the outset, rather than at advanced project stages. At the institutional level, governance frameworks should include fiscal incentives, shared guidelines, and streamlined authorisation procedures anchored in rigorous environmental objectives. Participatory processes involving communities and stakeholders ensure transparency and legitimacy, supporting inclusive decision-making in line with the meaning of SDG 16. In this way, symbiotic urban agriculture becomes not only compatible with other SDGs but also a catalyst for synergies: it reduces resource demand, creates skilled employment, strengthens ecosystem services, and enhances urban resilience, demonstrating that an integrated approach can transform potential conflicts into opportunities for sustainable development.

Concluding reflections | The BIZEA model, grounded in circularity and aimed at achieving climate neutrality, envisions an integrated management of water, energy, and plant biomass to minimise or eliminate reliance on external resources. The model primarily targets SDGs 2, 6, 11, and 12 to facilitate their achievement. Initial results of this study offer insights that appear to confirm the effectiveness of the adopted methodological approach, particularly:
– the analysis conducted at two complementary urban scales – neighbourhood (1,000 × 1,000 meters) and block (200 × 200 meters) – provides a comprehensive overview of available resources and contextual characteristics, while also enabling the mapping of energy and material flows in terms of availability, consumption, and waste;
– the formalisation of design solutions in BIZEA sheets allows for the creation of comparable and verifiable scenarios, which are easily understandable to potential planners and end users;
– the developed methodology, presented as guidelines for a wide range of stakeholders, is transferable, as it can be accommodated to diverse contexts with differing needs and priorities, provided that local data are available;
– the use of public datasets and open-source tools (GIS workflows and parametric tables) ensures that data can be updated and expanded over time, even though risks persist due to assumptions, approximations, and secondary data with heterogeneous resolutions and update frequencies;
– natural processes, characterised by seasonal meteorological and crop variability, may be misrepresented if the analysis or data output refers to a limited period corresponding to a specific season.

However, for the methodological approach to be widely adopted and effectively applied, institutional support is essential – for instance, to facilitate access to, quality control of, and updates to open-access data – and the engagement of local communities is critical to improving water management and sanitation services. The synergy among lifestyle, occupant behaviour, and on-site food production devices can trigger awareness mechanisms that lead to virtuous and sustainable behaviours. Community involvement is thus key to advancing SDG achievement, particularly in urban systems, where elements are inherently interconnected. These networks of interactions can generate synergies or conflicts depending on the degree of sustainability pursued.

Acknowledgements

The article presents partial developments of the research project 'BIZE_UrFarm – Building Integrated Zero Emission Urban Farming', jointly funded by the Italian Ministry of Foreign Affairs and International Cooperation (MAECI), Project No. SG23GR02, and the Singapore Agency for Science, Technology and Research (A*STAR) under the First Executive Programme of Scientific and Technological Cooperation (Italy-Singapore), Project No. R23I0IR035.

References

Ahmadi, E., McLellan, B., Ogata, S., Mohammadi-Ivatloo, B. and Tezuka, T. (2020), "An Integrated Planning Framework for Sustainable Water and Energy Supply", in *Sustainability*, vol. 12, issue 10, article 4295, pp. 1-37. [Online] Available at: doi.org/10.3390/SU12104295 [Accessed 17 October 2025].

Alcalde Sanz, L. and Man, B. (2014), *Water reuse in Europe – Relevant guidelines, needs for and barriers to innovation – A Synoptic overview*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2788/29234 [Accessed 17 October 2025].

Ang, B. T. W., Fong, Y. M., Soh, C. B., Chien, S. C., An, H. and Soon Tay, R. H. (2024), "Passive Infrared-to-Visible-Light Upconversion Using NaYF4:Yb,Er Nanoparticle Films for Greenhouse Façades", in *ACS Applied Nano Materials*, vol. 7, issue 16, pp. 18851-18860. [Online] Available at: pubs.acs.org/doi/10.1021/acsanm.4c02476 [Accessed 17 October 2025].

Armar-Klemesu M. (2000), "Urban agriculture and food security, nutrition and health", in Bakker, N., Dubbeling, M., Guendel, S., Sabel Koschella, U. and De Zeeuw, H. (eds), *Growing cities, growing food, urban agriculture on the policy agenda*, Feldafing, pp. 99-118. [Online] Available at: cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20003032308 [Accessed 17 October 2025].

Basso, S., Bisiani, T., Martorana, P. and Venudo, A. (2023), "Vertical Farm – Dalle forme dell'agricoltura nuove architetture e città | Vertical Farm – New architectures and cities from the forms of agriculture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 141-152. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13122023 [Accessed 17 October 2025].

Beisheim, M. and Weinlich, S. (2023), *Germany and Namibia as Co-leads for the United Nations – Chances and challenges on the road to the 2024 UN Summit of the Future*, SWP | Stiftung Wissenschaft und Politik, Berlin. [Online] Available at: doi.org/10.18449/2023C03 [Accessed 17 October 2025].

Bennich, T., Persson, Å., Beaussart, R., Allen, C. and Malekpour, S. (2023), "Recurring patterns of SDG interlinkages and how they can advance the 2030 Agenda", in *One Earth | A Cell Press Journal*, vol. 6, issue 11, pp. 1465-1476. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2023.10.008 [Accessed 17 October 2025].

Carotti, L., Pistillo, A., Zauli, I., Meneghello, D., Martin, M., Pennisi, G., Gianquinto, G. and Orsini, F. (2023), "Improving water use efficiency in vertical farming – Effects of growing systems, far-red radiation and planting density on lettuce cultivation", in *Agricultural Water Management*, vol. 285, article 108365, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108365 [Accessed 17 October 2025].

Chrysoulakis, N., De Castro, E. A. and Moors, E. J. (eds) (2014), *Understanding Urban Metabolism – A Tool for Urban Planning*, Routledge, Oxfordshire. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781315765846108365 [Accessed 17 October 2025].

Clementi, M., Dessì, V., Podestà, G. M., Chien, S.-C., Ang, T. W. B. and Lucchi, E. (2024), "GIS-Based Digital Twin Model for Solar Radiation Mapping to Support Sustainable Urban Agriculture Design", in *Sustainability*, vol. 6, issue 15, article 6590, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su16156590 [Accessed 17 October 2025]

Clementi, M., Pereira Guimarães, M. and Dessì, V. (2024), "Mapping the climate in the urban fabric – The first step for farming the city", in *Territorio*, vol. 108-109, pp. 107-117. [Online] Available at: torrossa.com/it/resources/an/6059624?digital=true [Accessed 17 October 2025].

D'Ostuni, M., Stanghellini, C., Boedijn, A., Zaffi, L. and Orsini, F. (2023), "Evaluating the impacts of nutrients recovery from urine wastewater in Building-Integrated Agriculture – A test case study in Amsterdam", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 91, article 104449, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.SCS.2023.104449 [Accessed 17 October 2025].

D'Ostuni, M., Zaffi, L., Appolloni, E. and Orsini, F. (2022), "Understanding the complexities of Building-Integrated Agriculture – Can food shape the future built environment?", in *Futures*, vol. 144, article 103061, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.FUTURES.2022.103061 [Accessed 17 October 2025].

Deksissa, T., Trobman, H., Zendehdel, K. and Azam, H. (2021), "Integrating Urban Agriculture and Stormwater Management in a Circular Economy to Enhance Ecosystem Services: Connecting the Dots", in *Sustainability*, vol. 13, issue 15, article 8293, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su13158293 [Accessed 17 October 2025].

Dessì, V. and Clementi, M. (2023), "Mapping Urban Water Balance to support the integrated design of water cycles

in the peri-urban areas", in *Journal of Physics | Conference Series*, vol. 2600, article 172005, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1742-6596/2600/17/172005 [Accessed 17 October 2025].

Fader, M., Cranmer, C., Lawford, R. and Engel-Cox, J. (2018), "Toward an understanding of synergies and trade-offs between water, energy, and food SDG targets", in *Frontiers in Environmental Science*, vol. 6, article 112, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.3389/FENVS.2018.00112 [Accessed 17 October 2025].

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2021), *The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point – Synthesis report 2021*. [Online] Available at: doi.org/10.4060/cb7654en [Accessed 17 October 2025].

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2019), *FAO framework for the Urban Food Agenda – Leveraging sub-national and local government action to ensure sustainable food systems and improved nutrition*. [Online] Available at: doi.org/10.4060/ca3151en [Accessed 17 October 2025].

Goh, M. L. W., Teo, M. R. J., Wei, J. L., Ang, B. T. W., Soh, C. B., Clementi, M. and Dessi, V. (2025), "Urban microclimate modeling for side-facade farming and agrivoltaic deployment in town estates", in *Journal of Ecoscience and Plant Revolution*, vol. 4, issue 1, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.37357/1068/JEPR/4.1.01 [Accessed 17 October 2025].

Herzog, T., Battisti, A. and Tucci, F. (2012), "Sperimentazioni di housing sociale tra efficienza energetico-ambientale e basso costo | Experimentation on Social housing between energy environmental efficiency and low cost", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 4, pp. 343-354. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-11535 [Accessed 17 October 2025].

Holmes, D. E., Dang, Y. and Smith, J. A. (2019), "Nitrogen cycling during wastewater treatment", in *Advances in Applied Microbiology*, vol. 106, pp. 113-192. [Online] Available at: doi.org/10.1016/bs.aambs.2018.10.003 [Accessed 17 October 2025].

Horvath, S.-M., Muhr, M. M., Kirchner, M., Toth, W., Germann, V., Hundscheid, L., Vacik, H., Scherz, M., Kreiner, H., Fehr, F., Borgwardt, F., Gühnemann, A., Becsi, B., Schneeberger, A. and Gratzer, G. (2022), "Handling a complex agenda – A review and assessment of methods to analyse SDG entity interactions", in *Environmental Science and Policy*, vol. 131, pp. 160-176. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2022.01.021 [Accessed 17 October 2025].

Hung, P. and Peng, K. (2017), "Green-energy, water-autonomous greenhouse system – An alternative-technology approach towards sustainable smart-green vertical greening in smart cities", in *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, vol. 5, issue 1, pp. 55-70. [Online] Available at: doi.org/10.14246/irspsd.5.1_55 [Accessed 17 October 2025].

Iungman, T., Cirach, M., Marando, F., Pereira-Barboza, E., Khomenko, S., Masselot, P., Quijal-Zamorano, M., Mueller, N., Gasparrini, A., Urquiza, J., Heris, M., Thondoo, M. and Nieuwenhuijsen, M. (2023), "Cooling cities through urban green infrastructure – A health impact assessment of European cities", in *The Lancet*, vol. 401, issue 10376, pp. 577-589. [Online] Available at: doi.org/10.1016/S0140-6736(22)02585-5 [Accessed 17 October 2025].

Kay, M. (ed.) (2022), *Improving agricultural water use efficiency and productivity in the Middle East – Pressures, status, impacts and responses*, Turkish Water Institute and SUEN, Istanbul. [Online] Available at: bluepeaceme.org/storage/publications/September2023/Fu7pgHvKUtvBlL8v2zmF.pdf [Accessed 17 October 2025].

Lin, B. B., Philpott, S. M. and Jha, S. (2015) "The future of urban agriculture and biodiversity-ecosystem services – Challenges and next steps", in *Basic and Applied Ecology*, vol. 16, issue 3, pp. 189-201. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.baae.2015.01.005 [Accessed 17 October 2025].

Magwaza, S. T., Magwaza, L. S., Odindo, A. O., Mashilo, J., Mditshwa, A. and Buckley, C. (2020), "Evaluating the feasibility of human excreta-derived material for the production of hydroponically grown tomato plants – Part I – Photosynthetic efficiency, leaf gas exchange and tissue mineral content", in *Agricultural Water Management*, vol. 234, article 106114, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106114 [Accessed 17 October2025].

Muñoz-Liesa, J., Royapoor, M., López-Capel, E., Cuerva, E., Rufí-Salís, M., Gassó-Domingo, S. and Josa, A. (2020), "Quantifying energy symbiosis of building-integrated agriculture in a Mediterranean rooftop greenhouse", in *Renewable Energy*, vol. 156, pp. 696-709. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.098 [Accessed 17 October 2025].

Nicholls, E., Ely, A., Birkin, L., Basu, P. and Goulson, D. (2020), "The contribution of small-scale food production in urban areas to the sustainable development goals – A review and case study", in *Sustainability Science*, vol. 15, pp. 1585-1599. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11625-020-00792-z [Accessed 17 October 2025].

Payen, F. T., Evans, D. L., Falagán, N., Hardman, C. A., Kourmpetli, S., Liu, L., Marshall, R., Mead, B. R, and Davies, J. A. C. (2022), "How much food can we grow in urban areas? Food production and crop yields of urban agriculture – A meta-analysis", in *Earth's Future*, vol. 10, issue 8, article e2022EF002748, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.1029/2022EF002748 [Accessed 17 October 2025].

Pradhan, P. (2023), "A threefold approach to rescue the 2030 Agenda from failing", in *National Science Review*, vol. 10, issue 7, article nwad015, pp. 1-3. [Online] Available at: doi.org/10.1093/NSR/NWAD015 [Accessed 17 October 2025].

Rajapakse, J., Otoo, M. and Danso, G. (2023), "Progress in delivering SDG6 – Safe water and sanitation", in *Cambridge Prisms | Water*, vol. 1, article 6, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1017/WAT.2023.5 [Accessed 17 October 2025].

Raman, R., Lathabai, H. H. and Nedungadi, P. (2024), "Sustainable development goal 12 and its synergies with other SDGs – Identification of key research contributions and policy insights", in *Discover Sustainability*, vol. 5, article 150, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.1007/S43621-024-00289-0 [Accessed 17 October 2025].

Reinberg, G. W. (2006), *Architecture by Georg W. Reinberg*, Alinea International, Firenze.

Requejo-Castro, D., Giné-Garriga, R. and Pérez-Foguet, A. (2020), "Data-driven Bayesian network modelling to explore the relationships between SDG 6 and the 2030 Agenda", in *Science of The Total Environment*, vol. 710, article 136014, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.136014 [Accessed 17 October 2025].

Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U. B., Sawicka, M., Werner, A., Thomaier, S., Henckel, D., Walk, H. and Dierich, A. (2014), "Urban agriculture of the future – An overview of sustainability aspects of food production in and on buildings", in *Agriculture and Human Values | Journal of Agriculture, Food, and Human Values Society*, vol. 31, pp. 33-51. [Online] Available at: doi.org/10.1007/S10460-013-9448-4 [Accessed 17 October 2025].

Susca, T., Gaffin, S. R. and Dell'Osso, G. R. (2011), "Positive effects of vegetation – Urban heat island and green roofs", in *Environmental Pollution*, vol. 159, issues 8-9, pp. 2119-2126. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.envpol.2011.03.007 [Accessed 17 October 2025].

Susca, T., Zanghirella, F. and Del Fatto, V. (2023), "Building integrated vegetation effect on micro-climate conditions for urban heat island adaptation – Lesson learned from Turin and Rome case studies", in *Energy and Buildings*, vol. 295, article 113233, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113233 [Accessed 17 October 2025].

Tervahauta, T. H. (2014), *Phosphate and organic fertiliser recovery from black water*, Doctoral Thesis, Wageningen University, Netherlands. [Online] Available at: doi.org/10.18174/313616 [Accessed 17 October 2025].

Thomaier, S., Specht, K., Henckel, D., Dierich, A., Siebert, R., Freisinger, U. B. and Sawicka, M. (2015), "Farming in and on urban buildings – Present practice and specific novelties of Zero-Acreage Farming (ZFarming)", in *Renewable Agriculture and Food Systems*, vol. 30, issue 1, pp. 43-54. [Online] Available at: doi.org/10.1017/S1742170514000143 [Accessed 17 October 2025].

Tucci, F., Altamura, P. and Pani, M. M. (2023), "Modulare le dinamiche urbane in chiave climatica – Spazi intermedi e neutralità climatica | Modulating urban dynamics from a climate perspective – In-between spaces and climate neutrality", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 204-215. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14172023 [Accessed 17 October 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development – A/RES/70/1*. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf [Accessed 17 October 2025].

Vacanti, A. and Leonardi, C. (2024), "Tecnologia, energia e tempi – Percorsi sperimentali per il design di tecnologie appropriate | Technology, Energy, and Time – Experimental paths for the design of appropriate technology", *in Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 316-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15262024 [Accessed 17 October 2025].

Valente, R., Bosco, R., Giacobbe, S. and Losco, S. (2022), "Il progetto di infrastrutture verdi per le acque piovane – Note di metodo da un caso studio | Green stormwater infrastructures research through design – Method notes from a case study", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 192-201. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11172022 [Accessed 17 October 2025].

Valverde, J.-M. and Avilés-Palacios, C. (2021), "Circular Economy as a Catalyst for Progress towards the Sustainable Development Goals – A Positive Relationship between Two Self-Sufficient Variables", in *Sustainability*, vol. 13, issue 22, article 12652, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.3390/SU132212652 [Accessed 17 October 2025].

Van Puijenbroek, P. J. T. M., Beusen, A. H. W., Bouwman, A. F., Ayeri, T., Strokal, M. and Hofstra, N. (2023), "Quantifying future sanitation scenarios and progress towards SDG targets in the shared socioeconomic pathways", in *Journal of Environmental Management*, vol. 346, article 118921, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.118921 [Accessed 17 October 2025].

Zaffi, L. and D'Ostuni, M. (2020), "Città metaboliche del futuro – Fra Agricoltura e Architettura | Metabolic cities of the future – Between Agriculture and Architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 82-93. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2 464-9309/882020 [Accessed 17 October 2025].

Žuvela-Aloise, M., Koch, R., Buchholz, S. and Früh, B. (2016), "Modelling the potential of green and blue infrastructure to reduce urban heat load in the city of Vienna", in *Climatic Change*, vol. 135, pp. 425-438. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10584-016-1596-2 [Accessed 17 October 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 238-249
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18132025

Article Info

Received 12 September 2025
Revised 13 October 2025
Accepted 18 October 2025
Published 30 December 2025

HABITAT COLLETTIVI PER LA RIGENERAZIONE RURALE
Una cooperativa edilizia ad Almenara (Spagna)

COLLECTIVE HABITATS FOR RURAL REGENERATION
A housing cooperative in Almenara (Spain)

Josep Eixerés Ros

Abstract

L'articolo presenta un approccio architettonico sistemico e sostenibile attraverso la progettazione di una cooperativa edilizia ad Almenara (Spagna), un'area semirurale nella Spagna orientale, esso affronta tre sfide interconnesse: l'esodo rurale, l'emergenza climatica e la crisi abitativa creata da logiche speculative di mercato. Ancorata agli SDGs 6, 7 e 8, la proposta integra la progettazione partecipata, la produzione di energia locale e l'urbanistica sensibile all'acqua all'interno di un modello abitativo collettivo. Il progetto prevede una comunità di energia rinnovabile che fornisce energia pulita e al contempo promuove la coesione e l'autonomia locale; introduce metodi di costruzione a basso impatto, sistemi passivi e strategie di manutenzione cooperativa, migliorando la resilienza e riducendo i costi a lungo termine. L'iniziativa dà priorità all'inclusività, alla diversità multigenerazionale e alla governance condivisa come motori dello sviluppo sostenibile in territori in via di contrazione. Affrontando l'edilizia abitativa non come una merce ma come un bene comune, questo modello promuove una giusta transizione ecologica, dimostrando come la pratica architettonica possa facilitare sinergie sistemiche tra obiettivi sociali, ambientali ed economici, per contribuire a un futuro rurale rigenerativo e al più ampio raggiungimento degli SDG dell'Agenda 2030.

This paper presents a systemic and sustainable architectural approach through the design of a housing cooperative in Almenara, a semi-rural area in eastern Spain. The project addresses three interconnected challenges: the rural exodus, the climate emergency, and the housing crisis driven by speculative market logic. Anchored in SDGs 6, 7, and 8, the proposal integrates participatory design, local energy production, and water-sensitive urbanism within a collective living model. The project envisions a renewable energy community that supplies clean energy while fostering local cohesion and autonomy. It introduces low-impact construction methods, passive systems, and cooperative maintenance strategies, enhancing resilience and reducing long-term costs. The initiative prioritises inclusivity, multigenerational diversity, and shared governance as drivers of sustainable development in shrinking territories. By addressing housing not as a commodity but as a common good, this model promotes a just ecological transition. It demonstrates how architectural practice can facilitate systemic synergies between social, environmental, and economic goals, contributing to regenerative rural futures and the broader achievement of the 2030 Agenda.

Keywords

cooperativa edilizia, rigenerazione rurale, sostenibilità, progettazione partecipata, comunità energetica

housing cooperative, rural regeneration, sustainability, participatory design, energy community



Josep Eixerés Ros, Architect and PhD Candidate, is a Researcher at the School of Architecture, Universitat Politècnica de València (Spain). His research explores the intersections between architecture, cultural heritage and contemporary design, focusing on innovative approaches to spatial narratives and sustainable architectural practices. E-mail: josep.eixeresros@gmail.com

L'edilizia collettiva ha guadagnato sempre più attenzione come alternativa sostenibile e socialmente inclusiva ai modelli abitativi tradizionali, in particolare nei contesti rurali che vivono lo spopolamento e la frammentazione sociale. Il caso della cooperativa abitativa di Almenara (Spagna) esemplifica come l'abitare in cooperativa possa contribuire alla rigenerazione rurale promuovendo legami comunitari, risorse condivise e governance partecipativa (Ayala-García, Velandia Rayo and Nieman Jansen, 2025; Capellán-Pérez, Campos-Celador and Terés-Zubiaga, 2018).

Un tale approccio cooperativo è in linea con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), in particolare con l'SDG 11 (Città e comunità sostenibili), l'SDG 6 (Acqua pulita e servizi igienici) e l'SDG 7 (Energia accessibile e pulita), in quanto integra dimensioni sociali, ambientali ed economiche (Caramizaru and Uihlein, 2020). Questo approccio si allinea anche con le prospettive emergenti sui Distretti a Energia Positiva, che enfatizzano l'integrazione della pianificazione energetica e della progettazione territoriale come motori dello sviluppo territoriale sostenibile (Ferrante, Romagnoli and Villani, 2023).

Il fenomeno dell'edilizia collettiva in Spagna deve essere inquadrato all'interno di un più ampio dibattito internazionale sui modelli abitativi alternativi che enfatizzano l'accessibilità economica, la progettazione ecologica e la coesione sociale (Bellini and Martorana, 2025; Boeri et alii, 2024); esso sfida i paradigmi abitativi dominanti che spesso escludono le popolazioni vulnerabili e aggravano l'espansione urbana. In questo contesto le cooperative non solo forniscono un mezzo per ottenere alloggi a prezzi accessibili, ma promuovono anche l'emancipazione e la resilienza attraverso un processo decisionale condiviso e spazi comuni (Walker and Devine-Wright, 2008).

La cooperativa di Almenara è situata in un contesto rurale (Fig. 1) caratterizzato da declino demografico e sfide economiche, il che rende il suo potenziale rigenerativo particolarmente significativo. Il progetto della cooperativa incorpora principi bioclimatici[1] e strategie architettoniche partecipative[2] per migliorare la sostenibilità ambientale e favorire le interazioni sociali tra i membri. Il caso studio dimostra la replicabilità di tali modelli in contesti rurali simili, contribuendo al dibattito politico e scientifico sulla rivitalizzazione rurale e sullo sviluppo comunitario sostenibile (Gallego-Castillo, Heleno and Victoria, 2021).

Inoltre il modello cooperativo promuove strutture di governance innovative che consentono ai residenti di gestire collettivamente spazi e risorse condivise, rafforzando così il capitale sociale e la resilienza alle pressioni socio-economiche (Walker and Devine-Wright, 2008). Questo approccio partecipativo favorisce anche opportunità educative e scambio di conoscenze all'interno della comunità, estendendo l'impatto della cooperativa edilizia verso obiettivi più ampi di sviluppo rurale.

Alla luce delle superiori premesse il contributo propone un modello integrato di abitazione cooperativa legata alle comunità energetiche rinnovabili come strumento strategico per la rigenerazione rurale, delineando un quadro metodologico e progettuale che collega analisi territoriale, processi di co-progettazione e sviluppo architettonico.

L'argomentazione si snoda attraverso una revisione dello stato dell'arte e del contesto normativo, seguita dalla presentazione dell'approccio metodologico e dal caso studio di Almenara, che illustra le dimensioni operative e spaziali della proposta. Il contributo poi riporta barriere, impatti e trasferibilità del modello proposto, prima di concludere con riflessioni sugli sviluppi futuri e sulla potenziale applicazione in altri contesti. Affrontando la relazione tra abitazione, energia e territorio, l'articolo cerca di contribuire al dibattito in corso sulla trasformazione rurale sostenibile e di fornire un quadro replicabile per ulteriori ricerche e pratiche.

Stato dell'arte | Negli ultimi decenni l'abitazione, diritto universale, è diventata una merce all'interno di un sistema speculativo che esclude ampie fasce della popolazione; questo cambiamento non è solo economico ma anche simbolico, come si evince dalle narrazioni culturali che mettono in discussione la relazione tra spazio, valore e significato (Houellebecq, 2010). In risposta a questa trasformazione sono emersi modelli abitativi alternativi, tra i quali spicca l'edilizia cooperativa in usufrutto come risposta architettonica, economica e sociale al bisogno di spazi abitativi dignitosi (Turner, 1976; Ostrom, 1990). A differenza dei modelli di proprietà privata o in affitto, l'edilizia cooperativa si basa sulla gestione collettiva, sulla proprietà condivisa e sull'autogoverno della comunità, consentendo di sfuggire alle logiche di mercato e di rafforzare i legami sociali (Montaner and Muxí, 2011).

Esperienze come La Borda a Barcellona, FUCVAM in Uruguay o il modello Andel in Danimarca hanno dimostrato la fattibilità di questi sistemi in contesti urbani, ma la loro implementazione in ambienti rurali rimane scarsa. Tuttavia questa lacuna rappresenta un'opportunità strategica per ripensare l'habitat in una logica territoriale che risponda al fenomeno noto come 'Empty Spain' (Del Molino, 2016): lungi dall'essere esclusivamente una conseguenza demografica, lo spopolamento rurale è legato a dinamiche storiche di abbandono istituzionale, concentrazione delle risorse e svalutazione simbolica del territorio rurale (Subirats, 2011).

Il dibattito contemporaneo sulla rigenerazione territoriale e sul diritto all'abitare in termini rurali richiede una profonda revisione delle relazioni tra architettura, ecologia e società. Come osservano Delibes (1978) e David Harvey (2012), la periferia non può essere intesa solo come spazio residuale, deve assumere il ruolo di spazio strategico per articolare forme di vita sostenibili, autosufficienti e cooperative. In questo quadro il ruolo dell'architettura va oltre la progettazione degli edifici, coinvolgendo la mediazione tra agenti sociali, paesaggi produttivi e risorse ecosistemiche.

Parallelamente recenti ricerche hanno esplorato soluzioni abitative modulari e a basso impatto abitativo in grado di integrare efficienza energetica e logiche di prefabbricazione, offrendo modelli scalabili per lo sviluppo sostenibile (Romano and Di Monte, 2023), mentre altre ricerche hanno sottolineato la necessità di collegare le strategie di transizione energetica con i valori immateriali del Patrimonio e del paesaggio, rafforzando la dimensione territoriale della sostenibilità (Del Curto, Garzulino and Turrina, 2024).

Uno degli elementi centrali di questa transizione è l'energia: l'emergenza climatica ha dato impulso allo sviluppo di comunità di energia rinnovabile, riconosciute dalla legislazione europea – in particolare dalla Direttiva 2018/2001 (European Union, 2018) – e dalle norme spagnole (Ministerio para la Transicíon Ecológica, 2019) come strumenti chiave per democratizzare l'accesso all'energia, decentralizzare la produzione e raggiungere la giustizia ambientale. Infatti questa forma di comunità, gestita in modo partecipativo, consente l'autoconsumo collettivo, la ridistribuzione delle eccedenze e il rafforzamento delle economie locali: il suo legame con i modelli abitativi cooperativi ne amplifica l'impatto, integrando la dimensione energetica nella struttura stessa dell'abitazione (Crippa et alii, 2024).

La letteratura specializzata concorda sul fatto che l'integrazione di edilizia cooperativa, rigenerazione rurale e comunità energetiche costituisce un campo emergente con un elevato potenziale, ma con una limitata applicazione nel mondo reale. Pubblicazioni recenti indicano questa sinergia come base per nuove politiche di progettazione ecologica e di giustizia territoriale (Rizzi, 2025; Bellini and Martorana, 2025; Ayala-García, Velandia Rayo and Nieman Jansen, 2025), tuttavia è necessario implementarne l'applicazione per consolidare questi approcci nella pratica architettonica. Il presente articolo si allinea a questa linea di ricerca proponendo un modello integrato di habitat cooperativo in un contesto semirurale che integra abitazione, energia e comunità da una prospettiva sistemica e replicabile (Fig. 2).

Obiettivi, metodologia e fasi della ricerca | Il contributo presenta gli esiti di uno studio durato un anno e condotto nell'ambito del progetto finale del Master presso la Universitat Politècnica de València, che combina ricerca teorica, analisi territoriale e sviluppo progettuale; non ci sono stati ricevuti finanziamenti esterni e il lavoro è stato completamente sviluppato all'interno del Master.

Una metodologia di progettazione basata sul contesto ha guidato il processo concettuale, intrecciando tre dimensioni fondamentali: un'analisi approfondita del territorio, la definizione collettiva dei bisogni e lo sviluppo architettonico a più scale. La fase iniziale ha comportato un'indagine sul territorio di Almenara (Castellón, Spagna), incentrata sulla struttura urbana, sulla morfologia del paesaggio, sulle tendenze demografiche e sulle risorse idriche ed energetiche locali. Questo studio si è basato su dati provenienti da fonti pubbliche, tra cui l'INE[3] (statistiche demografiche e abitative), PATRICOVA[4] (mappatura del rischio alluvionale e della vulnerabilità territoriale), il GVA Urban Planning Viewer[5] (uso del suolo e zonizzazione) e l'IDEE[6] (topografia, idrografia e base geospaziale), integrati da visite in loco e documentazione fotografica diretta (Figg. 3-5).

Contemporaneamente è stato implementato un approccio di ricerca partecipativa: attraverso sessioni di co-progettazione[7] simulate, interviste[8] esplorative con professionisti del settore e raffronti con casi studio realizzati (come La Borda e La Balma a Barcellona ed Entrepatios-Las Carolinas a Madrid), il gruppo di lavoro ha sviluppato un programma funzionale adattato al contesto rurale; il primo risultato è la concettualizzazione di un modello abitativo cooperativo fondato su principi di equità, sostenibilità e autogestione che, in linea con quanto auspicato da Manzini (2015), crea le condizioni per stimolare la creatività collettiva sia nella progettazione degli spazi che nella loro gestione.

Successivamente la proposta architettonica è stata sviluppata a varie scale, da quella territoriale a quella urbana, da quella architettonica a quella costruttiva, caratterizzandosi sempre per basso impatto ambientale, uso di materiali locali, strategie

di controllo climatico passivo e progettazione partecipata di spazi condivisi. Inoltre il progetto è stato strutturato per consentire la creazione di una comunità di energia rinnovabile e per facilitarne governance e gestione (Fig. 6).

Ciascuna fase del processo ha previsto momenti di verifica che hanno garantito l'allineamento con i quadri normativi, gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile e le esperienze internazionali rilevanti, mettendo a punto un approccio metodologico flessibile e replicabile per iniziative di progettazione comunitaria radicate nelle realtà territoriali e impegnate sui temi ambientali.

Architettura locale: diversità abitativa e costruzione di comunità | L'area di intervento si trova in una zona rurale periferica rispetto al nucleo urbano di Almenara, in un ambiente caratterizzato da paesaggi agricoli, infrastrutture ferroviarie ed ecosistemi acquatici di alto valore (Fig. 7). La condizione di periferia definisce la strategia del progetto: piuttosto che imporre una forma architettonica chiusa, il progetto opta per un modello in dialogo con il contesto, sfruttando le pendenze naturali del terreno e collegandole attraverso un impianto a gradoni.

Ognuno di questi livelli ospita un gruppo di unità abitative e culmina con uno spazio comune più ampio, concepito per rispondere a specifiche esigenze della cooperativa: può essere una sala da pranzo comune, un'area produttiva, una sala polivalente o uno spazio di coltivazione e incontro all'aperto (Figg. 8, 9). La disposizione a gradoni non solo consente un buon adattamento topografico e un'efficienza bioclimatica, ma permette anche una lettura orizzontale della vita comunitaria, in cui i legami sociali non sono accentrati in un unico punto, ma sono strutturati attraverso molteplici nodi relazionali.

Il progetto si articola con diverse tipologie edilizie (Fig. 10), con un sistema aperto che risponde alla pluralità delle forme di vita e alle diverse fasi del ciclo vitale: alcune unità possono espandersi o comprimersi nelle dimensioni attraverso l'articolazione di unità adiacenti, generando sottotipi flessibili; questa capacità di trasformazione permette al complesso di adattarsi nel tempo senza perdere coerenza spaziale o efficienza costruttiva. I materiali utilizzati rispondono al requisito della sostenibilità e del basso impatto ambientale: si impiegano sistemi costruttivi a secco, strutture in legno e isolanti naturali (Fig. 11) e vengono privilegiate soluzioni passive, come l'orientamento a sud, la ventilazione trasversale, i tetti ventilati e sistemi per il recupero e il riuso dell'acqua. Queste scelte tecniche sono integrate in una logica cooperativa più ampia, che comprende la produzione e la gestione comunitaria dell'energia, che verrà illustrata nel prossimo paragrafo. Inoltre l'integrazione dei principi per la smart readiness rafforza la capacità del progetto di adattarsi ai mutevoli scenari energetici e alle esigenze degli utenti, supportando infrastrutture flessibili e abilitate digitalmente (Azzalin, 2024).

Nel complesso la proposta architettonica assume la forma di abitazione radicata nel territorio e orientata al lungo termine, in un'ottica di sostenibilità ambientale, diversità tipologica e corresponsabilità comunitaria. Il suo sviluppo per stralci permette di adattare la crescita del complesso alle risorse organizzative ed economiche del gruppo cooperativo, mantenendo la coerenza del progetto e facilitando la replicabilità in altri contesti rurali.

Comunità energetica e governance cooperativa | Il progetto prevede la creazione di una comunità di energia rinnovabile, intesa non come un'aggiunta tecnologica, ma come parte strutturale del modello abitativo collettivo, da svilupparsi accanto alla cooperativa di abitazione, condividendo quindi sia le infrastrutture sia i principi di gestione democratica e di distribuzione equa. Tecnicamente il sistema si basa su un impianto fotovoltaico centralizzato con autoconsumo collettivo, collegato alle unità abitative e agli spazi comuni attraverso uno schema semplificato (Fig. 12), il cui dimensionamento è calcolato su una stima del consumo annuo del complesso residenziale e sulle capacità di generazione in base alla radiazione solare disponibile nel sito; sono previste anche batterie condivise per immagazzinare l'energia in eccesso e garantire la resilienza del sistema, soprattutto nei mesi di bassa produzione.

L'infrastruttura non è volutamente 'celata' perché mira a renderne visibile la dimensione energetica e l'integrazione architettonica e paesaggistica, promuovendo un rapporto attivo tra abitanti e cicli di produzione-consumo: in questo modello l'energia cessa di essere un prodotto e diventa un bene comune gestito collettivamente. Il modello di governance prevede la partecipazione diretta dei cooperatori e si fonda sui principi di trasparenza e corresponsabilità. La comunità energetica si configura come un'entità legale legata alla cooperativa edilizia, che consente di prendere decisioni sull'uso, la manutenzione e il reinvestimento dei benefici economici in modo orizzontale; sono previsti comitati interni per l'efficienza, la manutenzione e la comunicazione con l'ambiente.

Questo modello non solo cerca di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e di mitigare l'impatto ambientale, ma anche di attivare un'economia circolare locale in cui i risparmi energetici possono essere destinati a scopi sociali, culturali o di miglioramento dell'habitat. Inoltre è prevista la possibilità di connettersi con altre comunità vicine, scalando la logica cooperativa verso reti energetiche territoriali distribuite. L'integrazione di questa dimensione energetica rafforza il carattere sistemico del progetto e ne amplifica l'impatto sugli SDG 7 (Energia accessibile e pulita) e 8 (Lavoro dignitoso e crescita economica), promuovendo una transizione energetica giusta, specifica del contesto e socialmente inclusiva (Crippa et alii, 2024).

Discussione: barriere, impatti e trasferibilità | L'implementazione di modelli abitativi ed energetici cooperativi in contesti rurali comporta molteplici sfide, sia strutturali che culturali. Nel caso studiato, barriere normative, economiche, istituzionali e sociali ostacolano la diffusione di modelli di insediamento come quello presentato. Da un punto di vista normativo la legislazione urbana spagnola rimane orientata verso modelli di promozione privati o pubblici centralizzati, con scarso adattamento alle figure cooperative di autopromozione; le limitazioni di accesso ai terreni rurali, i requisiti di lottizzazione e gli ostacoli amministrativi rallentano e aumentano i costi di realizzazione, soprattutto nelle piccole città con risorse istituzionali limitate (Bellini and Martorana, 2025).

Dal punto di vista economico una delle sfide principali è il finanziamento iniziale delle infrastrutture comuni e la mancanza di strumenti finanziari adat-

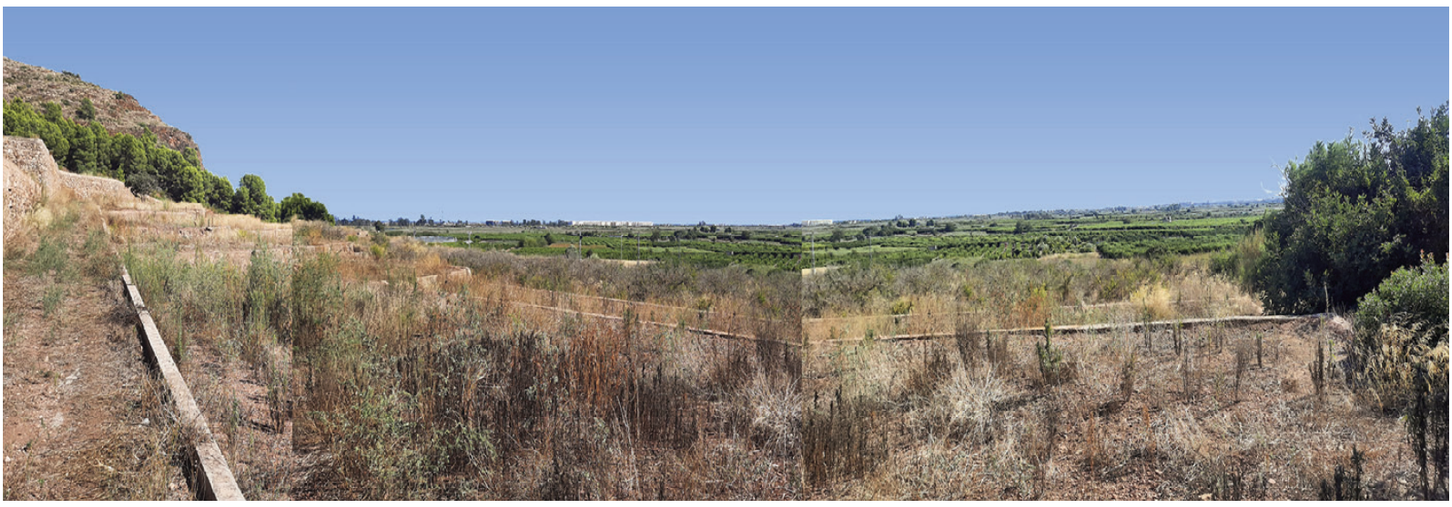


Fig. 1 | View from the site of the housing cooperative in Almenara (Spain), with the surrounding agricultural plain and distant settlements (credit: J. Eixerés Ros, 2021).

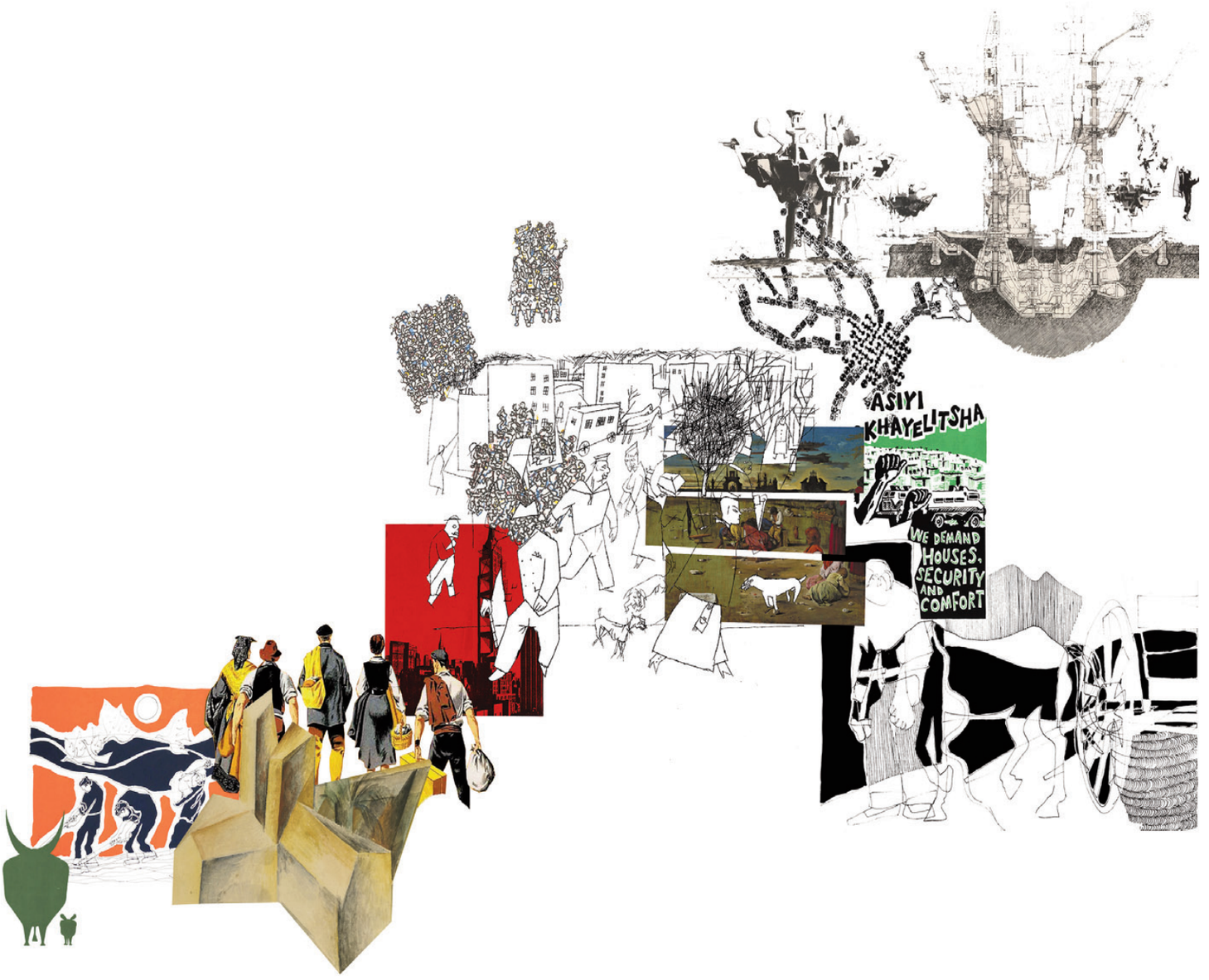


Fig. 2 | Conceptual collage illustrating the socio-cultural references, collective narratives, and spatial imaginaries that informed the cooperative housing proposal in Almenara (credit: J. Eixerés Ros, 2021).

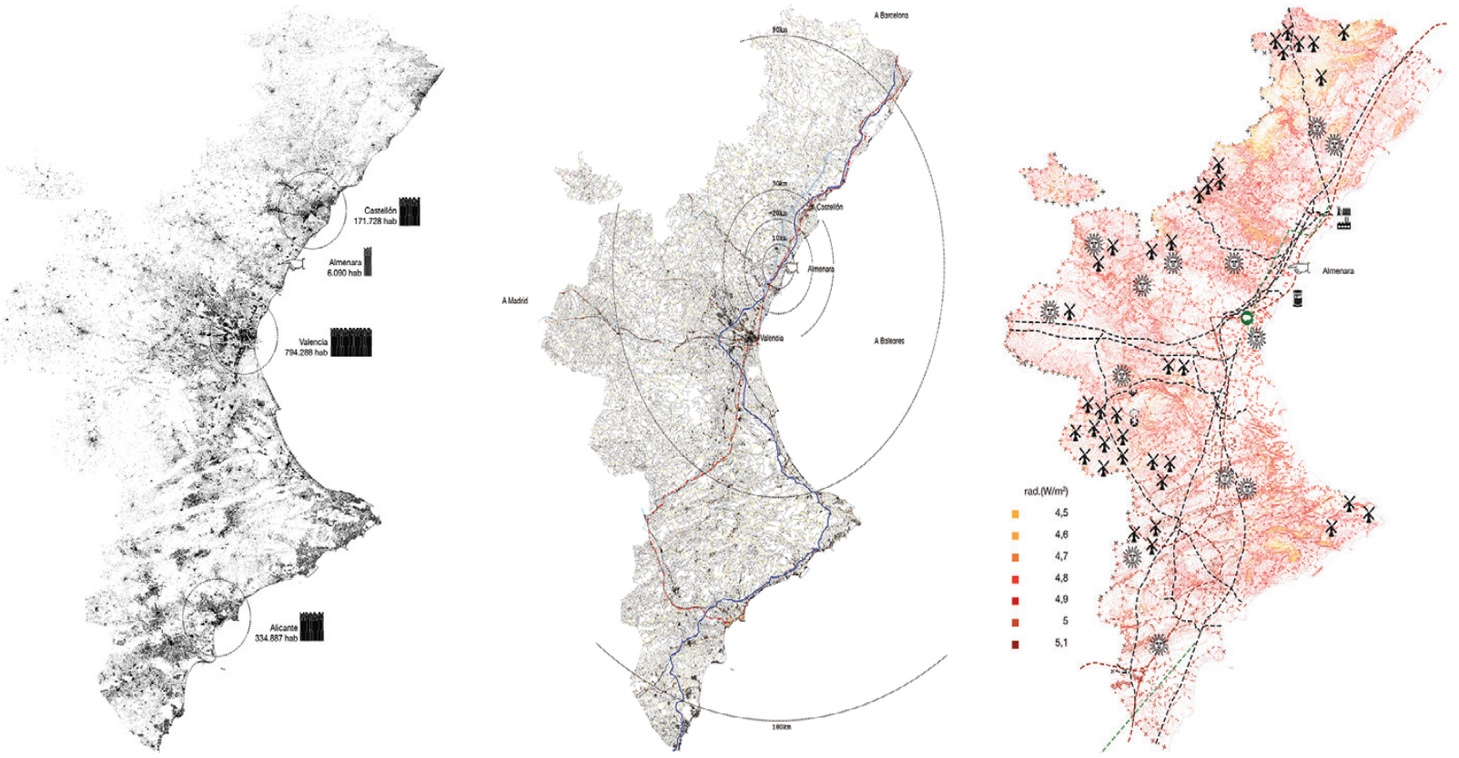
ti ai modelli cooperativi e senza fini di lucro. Sebbene esistano finanziamenti pubblici legati all'efficienza energetica o alla rigenerazione rurale, i bandi spesso non tengono conto dei tempi, delle forme organizzative o delle logiche di governance delle cooperative. Dal punto di vista culturale la fragilità del tessuto sociale rurale e la progressiva perdita delle pratiche comunitarie rappresentano un ulteriore ostacolo significativo: in molte aree della cosiddetta 'Empty Spain', le dinamiche individualistiche e lo scetticismo verso le formule cooperative rendono difficile la formazione di gruppi trainanti con un'adeguata capacità organizzativa.

Tuttavia il modello proposto offre un impatto potenziale significativo che va oltre la scala locale: in primo luogo permette di rivalorizzare il territorio in una logica non estrattiva, promuovendo un rapporto integrato tra habitat, ecosistema e comunità; in secondo luogo genera sinergie tra diritto alla casa, sostenibilità energetica e rigenerazione rurale, attivando trasversalmente gli SDGs 6, 7 e 8 (Bellini and Martorana, 2025; Rizzi, 2025). In questo senso il progetto rientra in strategie più ampie come le Hydrogen Valleys, che mostrano come la transizione energetica possa essere fondata su logiche territoriali e di gestione delle risorse locali (Battisti and Calvano, 2024).

Il suo approccio replicabile e aperto facilita l'adattamento ad altri contesti rurali in ambito mediterraneo e in particolare nell'entroterra spagnolo con minimi adattamenti. La modularità architettonica, la flessibilità tipologica e la governance cooperativa consentono di assorbire le variazioni di scala, clima, cultura locale e capacità organizzativa. In questo senso non si tratta solo di un progetto architettonico, ma di un prototipo di transizione socio-ecologica che pone domande e offre risposte su come vivere collettivamente al di fuori dei centri urbani, con autonomia energetica, responsabilità ecologica ed equità distributiva.

Conclusioni e sviluppi futuri | Il modello di habitat cooperativo per un contesto rurale ha mostrato come sia possibile integrare abitazioni, energia e comunità da una prospettiva eco-sociale e territoriale. Il caso di Almenara dimostra che l'architettura può essere ripensata come strumento per la rigenerazione rurale, la giustizia sociale e la sostenibilità, superando gli approcci frammentari che tradizionalmente hanno separato la tecnica dalla politica, il sociale dall'ambiente.

La proposta non vuole offrire soluzioni universali, ma attivare domande critiche: Come vivere collettivamente senza dipendere dal mercato immobiliare? Come progettare infrastrutture a partire dai beni comuni? Come restituire centralità politica ai territori periferici? Il valore del progetto risiede sia nella sua materializzazione architettonica sia nel quadro concettuale e metodologico che lo sostiene. I risultati dimostrano che la progettazione specifica del contesto, cooperativa e multiscalare può generare impatti positivi sull'ambiente, sul tessuto sociale e sull'economia locale. L'integrazione del progetto con



Figg. 3-5 | Spatial analysis of Almenara within the Valencian Community, including (from left to right): population density and relation to main urban centres; regional infrastructure networks and distances to key cities; and average annual solar radiation combined with the location of major renewable energy infrastructures (credits: J. Eixerés Ros, 2021).

una comunità energetica rafforza questa dimensione trasformativa, ampliando le capacità del gruppo e contribuendo a una giusta transizione energetica.

In questo senso il modello delinea un insieme di elementi strategici in grado di orientare progettisti e pianificatori in altri contesti, combinando infatti la governance cooperativa con l'autosufficienza energetica e le configurazioni spaziali adattive, esso suggerisce un approccio progettuale in grado di operare contemporaneamente a più scale: a livello micro, attraverso moduli abitativi flessibili e strategie passive; a livello meso, attraverso spazi collettivi che supportano usi condivisi e scambio energetico; a livello macro, attraverso l'integrazione territoriale con i sistemi paesaggistici e le infrastrutture rinnovabili.

Per sostenere la sua potenziale trasferibilità, la proposta può essere letta attraverso una serie di indicatori, come l'autoconsumo energetico, l'efficienza nell'uso del suolo, il grado di governance cooperativa e la conservazione dell'economia locale, che si allineano con diversi SDG e in particolare con gli SDG 6, 7, 8 e 11. Questi criteri forniscono un quadro di riferimento per valutare l'impatto ambientale e sociale del modello e per adattarlo ad altri territori con diverse condizioni climatiche, normative e socio-culturali.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, si pone la possibilità di formalizzare l'esperienza come prototipo replicabile in altre aree della Spagna e dell'Europa meridionale, adattando il modello a diversi contesti; inoltre apre la strada a un ulteriore approfondimento dei meccanismi di governance ibridi, del finanziamento solidale e delle politiche pubbliche che favoriscono tali iniziative. In un momento di molteplici crisi – climatiche, economiche, abitative – il progetto punta verso un'architettura che non progetta oggetti, ma relazioni tra le persone, con le risorse e con il territorio: un'architettura al servizio della vita comune.

Collective housing has gained increasing attention as a sustainable and socially inclusive alternative to traditional housing models, particularly in rural areas experiencing depopulation and social fragmentation. The case of the housing cooperative in Almenara (Spain) exemplifies how cooperative living can contribute to rural regeneration by fostering community bonds, shared resources, and participatory governance (Ayala-García, Velandia Rayo and Nieman Jansen, 2025; Capellán-Pérez, Campos-Celador and Terés-Zubiaga, 2018). This cooperative approach aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), SDG 6 (Clean Water and Sanitation), and SDG 7 (Affordable and Clean Energy), as it integrates social, environmental, and economic dimensions (Caramizaru and Uihlein, 2020). This approach also aligns with emerging perspectives on Positive Energy Districts, which emphasise the integration of energy planning and spatial design as drivers of sustainable territorial development (Ferrante, Romagnoli and Villani, 2023).

The phenomenon of collective housing in Spain must be framed within a broader international debate on alternative housing models that emphasise affordability, ecological design, and social cohesion (Bellini and Martorana, 2025; Boeri et alii, 2024). It challenges the dominant housing paradigms that often exclude vulnerable populations and exacerbate urban sprawl. In this context, cooperatives not only provide a means for affordable housing but also promote empowerment and resilience through shared decision-making and communal spaces (Walker and Devine-Wright, 2008).

The Almenara cooperative is situated in a rural setting (Fig. 1) marked by demographic decline and economic challenges, which makes its regenerative potential especially significant. The cooperative's design incorporates bioclimatic principles[1] and participatory architectural strategies[2] to enhance environmental sustainability while fostering social interactions among members. Moreover, it demonstrates the replicability of such models in similar rural contexts, contributing to policy and scientific debates on rural revitalisation and sustainable community development (Gallego-Castillo, Heleno and Victoria, 2021).

Furthermore, the cooperative model promotes innovative governance structures that empower residents to collectively manage shared spaces and resources, thereby reinforcing social capital and resilience against socio-economic pressures (Walker and Devine-Wright, 2008). This participatory approach also fosters educational opportunities and knowledge exchange within the community, amplifying the cooperative's impact beyond housing to broader rural development goals.

This contribution proposes an integrated cooperative housing model linked to renewable energy communities as a strategic tool for rural regeneration. It outlines a methodological and design framework that connects territorial analysis, co-design processes and architectural development.

The argument unfolds through a review of the state of the art and regulatory context, followed by the presentation of the methodological approach and the Almenara case study, which illustrates the operational and spatial dimensions of the proposal. The discussion then focuses on barriers, impacts

and transferability, before concluding with reflections on future developments and potential applications in other contexts. By addressing the intersection of housing, energy and territory, this work seeks to contribute to the ongoing debate on sustainable rural transformation and provide a replicable framework for further research and practice.

State of the art | In recent decades, housing has shifted from being conceived as a universal right to becoming a commodity within a speculative system that excludes large segments of the population. This shift is not only economic but also symbolic, as reflected in cultural narratives that question the relationships among space, value, and meaning (Houellebecq, 2010). In response to this transformation, alternative housing models have emerged, among which cooperative housing under usufruct stands out as an architectural, economic, and social response to the need for dignified living spaces (Turner, 1976; Ostrom, 1990). Unlike private ownership or rental models, cooperative housing is based on collective management, shared ownership, and community self-governance, allowing it to escape market logic and strengthen social bonds (Montaner and Muxí, 2011).

Experiences such as La Borda in Barcelona, FUCVAM in Uruguay, or the Andel model in Denmark have demonstrated the viability of these systems in urban contexts, but their implementation in rural environments remains scarce. However, this gap represents a strategic opportunity to rethink habitat from a territorial logic that responds to the phenomenon known as 'Empty Spain' (Del Molino, 2016). Far from being exclusively a demographic consequence, rural depopulation is linked to historical dynamics of institutional abandonment, resource concentration, and symbolic devaluation of rural territory (Subirats, 2011).

The contemporary debate on territorial regeneration and the right to inhabit in rural terms calls for a profound revision of the relationships between architecture, ecology, and society. As noted by Delibes (1978) and David Harvey (2012), the periphery cannot be understood merely as residual space but as a strategic space to articulate sustainable, self-sufficient, and cooperative forms of life. Within this framework, the role of architecture goes beyond building design, involving mediation between social agents, productive landscapes, and ecosystem resources.

In parallel, recent research has explored modular, low-impact housing solutions capable of integrating energy efficiency and prefabrication logics, offering scalable models for sustainable development (Romano and Di Monte, 2023). Recent research also underlines the need to connect energy transition strategies with heritage and landscape values, reinforcing the territorial dimension of sustainability (Del Curto, Garzulino and Turrina, 2024).

One of the central elements in this transition is energy. The climate emergency has driven the development of renewable energy communities, recognised by European legislation – in particular the Directive EU 2018/2001 (European Union, 2018) – and Spanish laws (Ministerio para la Transicíon Ecológica, 2019) as key tools for democratising energy access, decentralising production, and achieving environmental justice. These communities, managed participatively, enable collective self-consumption, surplus redistribution, and the strengthening of local economies. Their connection to cooperative housing models amplifies their impact, integrating the energy dimension into the very structure of habitation (Crippa et alii, 2024).

Specialised literature agrees that the integration of cooperative housing, rural regeneration, and energy communities constitutes an emerging field with high potential but limited real-world application. Recent publications point to this synergy as a foundation for new policies of ecological design and territorial justice (Rizzi, 2025; Bellini and Martorana, 2025; Ayala-García, Velandia Rayo and Nieman Jansen, 2025). However, more case studies are needed to consolidate these approaches in architectural practice. This article aligns with this line of research by proposing an integrated model of cooperative habitat in a semi-rural context that articulates housing, energy, and community from a systemic and replicable perspective (Fig. 2).

Objectives, methodology, and phases of the research | This work was developed as part of the

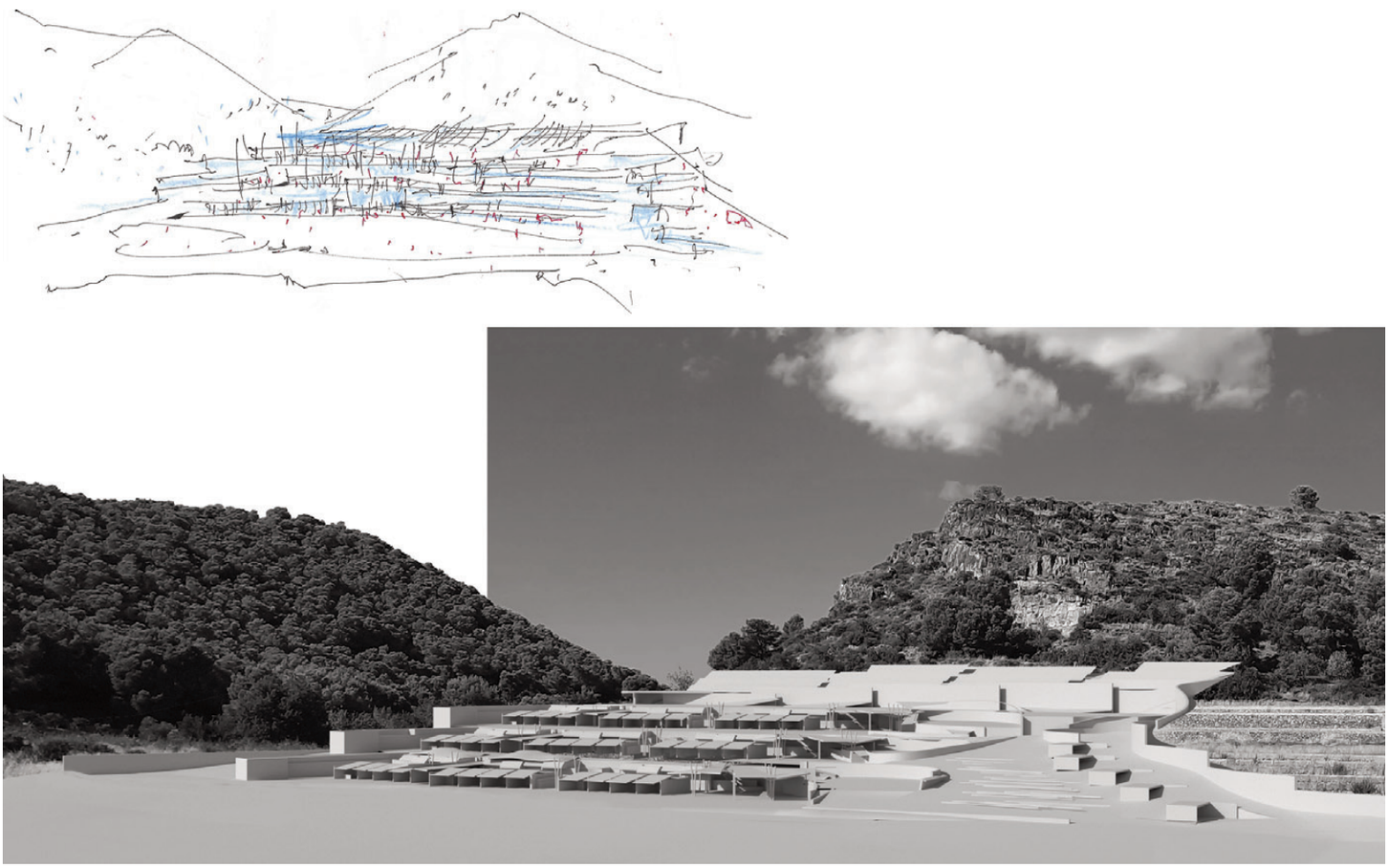


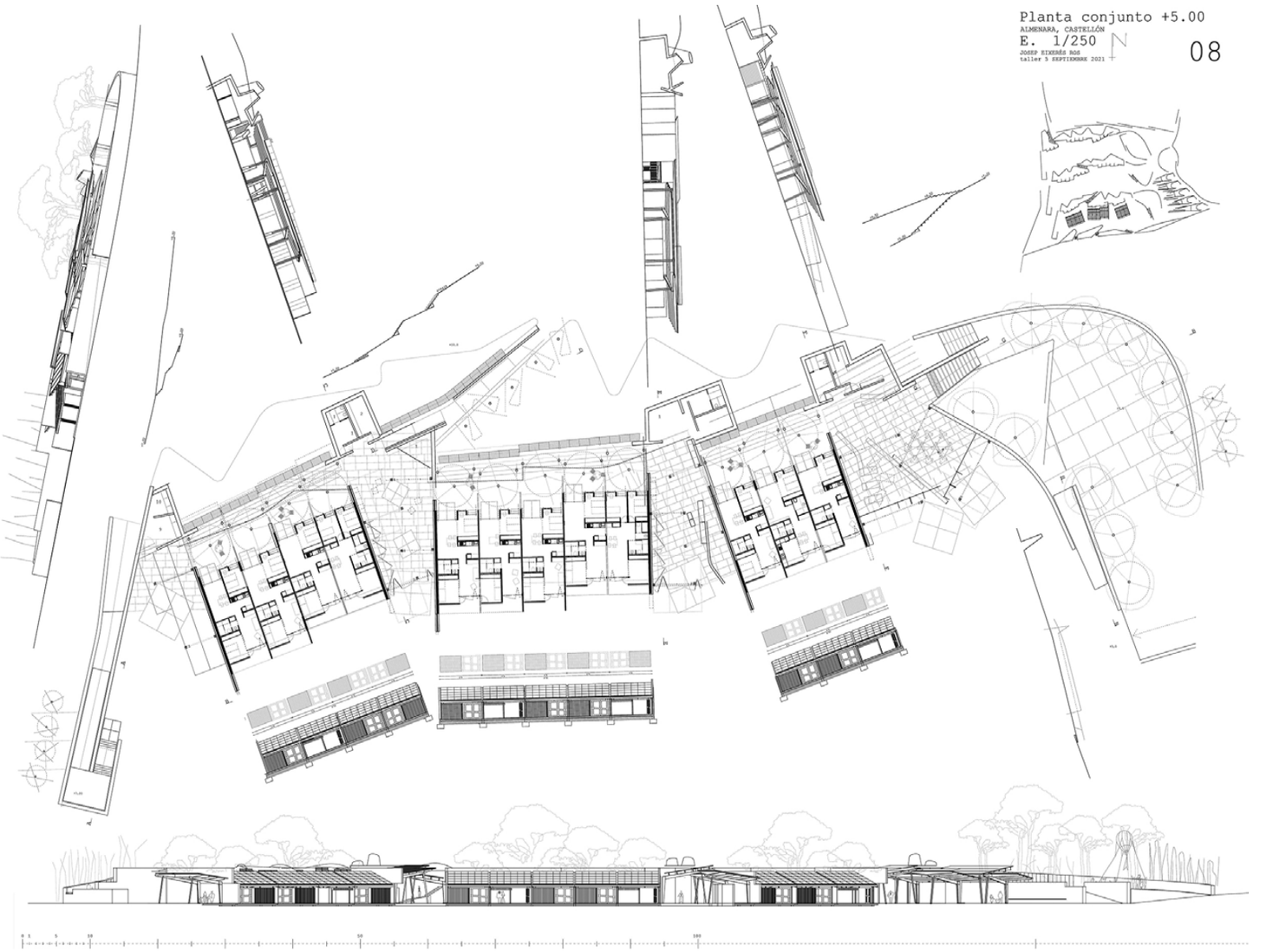
Fig. 6 | Conceptual sketch and photomontage showing the integration of the cooperative housing proposal into the Almenara landscape, emphasising its stepped configuration and relationship with the surrounding topography (credit: J. Eixerés Ros, 2021).

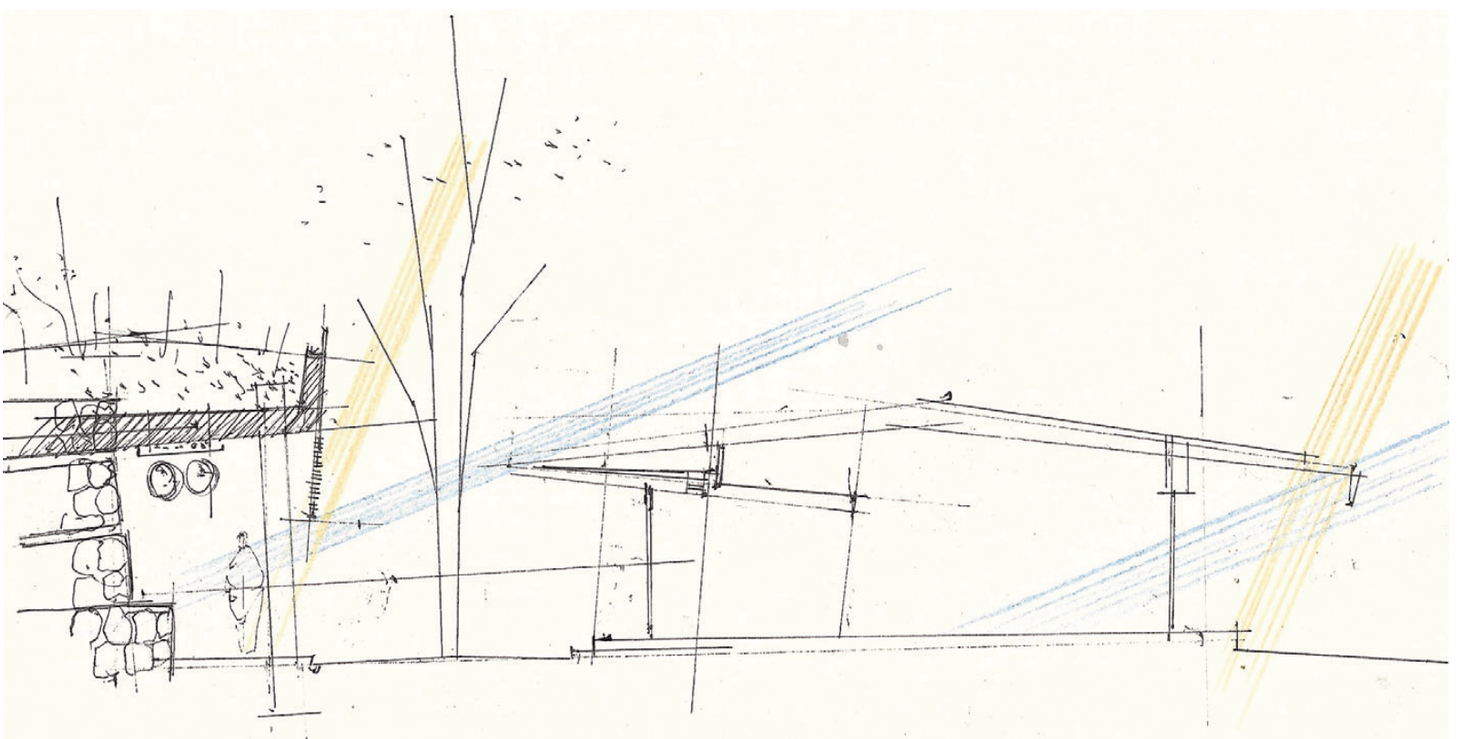


Fig. 7 | Collage overlaid on the territorial map of Almenara, combining historical, cultural, and environmental references, and illustrating key elements that shape the identity and productive landscape of the area (credit: J. Eixerés Ros, 2021).

Next page

Figg. 8, 9 | General floor plan of the project showing the arrangement of residential units and shared spaces in relation to the terrain, accompanied by a conceptual section sketch that explores the integration of the architecture into the landscape. The drawing illustrates spatial organisation, topographic adaptation, and the role of natural light, with sunlight penetration and shading strategies highlighted through colour-coded diagrams (credits: J. Eixerés Ros, 2021).


Planta conjunto +5.00
ALMENARA, CASTELLÓN
E. 1/250
JOSEP EIXERÉS ROS
taller 3 SEPTIEMBRE 2021
08



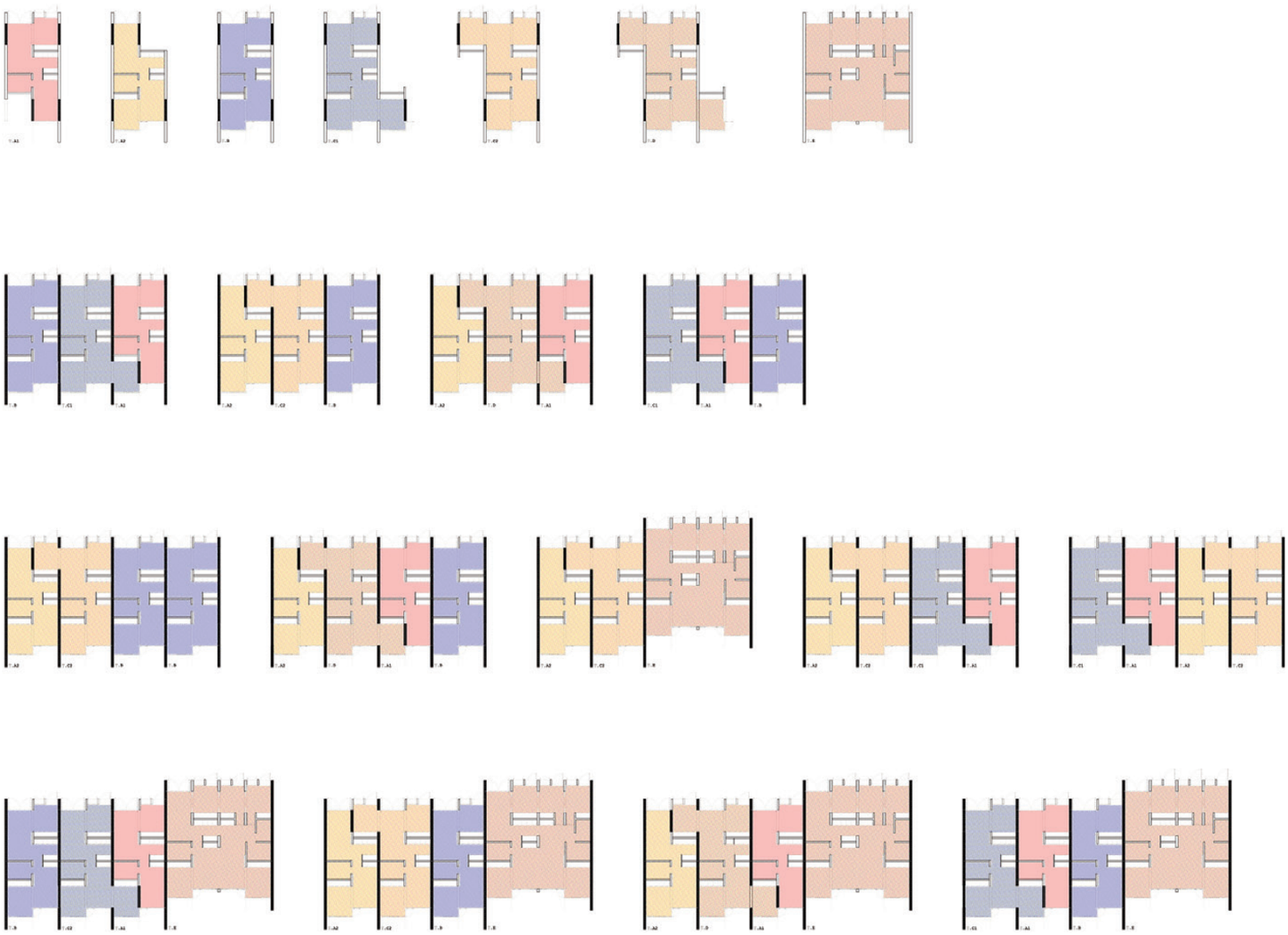


Fig. 10 | Typological variations of the housing units, with colour-coded layouts indicating different room configurations and distribution patterns. The diagrams compare possible arrangements, allowing adaptability according to programmatic needs and user profiles (credit: J. Eixerés Ros, 2021).

Master's Final Project at the Universitat Politècnica de València, spanning one year and combining theoretical research, territorial analysis, and design development. No external funding was received, and the work was fully developed within the university's academic environment.

A context-based design methodology guided the process, intertwining three core dimensions: an in-depth analysis of the territory, the collective definition of needs, and the architectural development across multiple scales. The initial phase involved a comprehensive territorial diagnosis of Almenara (Castellón, Spain), focusing on its urban structure, landscape morphology, demographic trends, and water and energy resources. This study drew on data from public sources, including the INE[3] (demographic and housing statistics), PATRICOVA[4] (flood risk and territorial vulnerability mapping), the GVA Urban Planning Viewer[5] (and use and zoning), and IDEE[6] (topography, hydrography and geospatial base layers), complemented by on-site visits and direct photographic documentation (Figg. 3-5).

Concurrently, a participatory research approach was implemented. Through simulated co-design sessions[7], exploratory interviews[8] with sector professionals, and benchmarking against established real-world experiences (such as La Borda and La Balma in Barcelona, and Entrepatios-Las Carolinas in Madrid), the working group developed a functional programme tailored to the rural context. This process led to the conceptualisation of a cooperative housing model grounded in principles of equity, sustainability, and self-management, and, in line with Manzini (2015), it emphasised enabling conditions for collective creativity in both spatial design and governance. Subsequently, the architectural proposal was developed at various scales (territorial, urban, architectural, and constructive). The design was informed by principles of low environmental impact, prioritising the use of local materials, passive climate-control strategies, and participatory design of shared spaces. Additionally, the project has been designed to support the development of a renewable energy community and aid in its governance and management (Fig. 6).

Throughout the process, ongoing evaluations ensured alignment with regulatory frameworks, Sustainable Development Goals, and relevant international experiences. This methodological framework offers a flexible and replicable tool for community-based design initiatives rooted in territorial realities and committed to environmental responsibility.

Situated architecture: housing diversity and community building | The project is located on a rural edge near the urban core of Almenara, in an environment that combines agricultural landscapes, railway infrastructure, and high-value water ecosystems (Fig. 7). This peripheral and tensioned condition defines the implementation strategy: rather than imposing a closed architectural form, the design opts for a model in dialogue with the site, taking advantage of the natural slopes of the terrain and linking them through a logic of stepped growth.

Each of these levels hosts a group of housing units and culminates with a larger communal space, conceived to meet specific cooperative needs: it may be a common dining room, a productive area, a multipurpose room, or an outdoor cultivation and meeting space (Figg. 8, 9). The stepped layout not only allows good topographical adaptation and bioclimatic efficiency but also enables a horizontal reading of community life, where social ties are not centralised in a single point but woven through multiple relational nodes.

The design is articulated through typological diversity (Fig. 10). No single housing model is proposed; instead, an open system responds to the plurality of living forms and different life-cycle stages.

Some units can grow or shrink in size through articulation with adjacent units, generating flexible subtypes. This transformative capacity allows the complex to adapt over time without losing spatial coherence or constructive efficiency.

Materiality is approached from sustainability and low-impact logic. Wood structures, natural insulation, and dry assembly systems are used (Fig. 11). Passive solutions are prioritised, including south orientation, cross-ventilation, ventilated roofs, and water capture and management strategies. These technical decisions are integrated into a broader cooperative logic that includes the collective production and management of energy, as detailed in the following section. In addition, integrating smart-readiness principles strengthens the project's capacity to adapt to changing energy scenarios and user needs, supporting flexible, digitally enabled infrastructure (Azzalin, 2024). Overall, the architectural proposal presents a form of habitation rooted in the territory and oriented toward the long term, combining environmental sustainability, typological diversity, and community co-responsibility. Its phased development allows the complex's growth to adapt to the organisational and economic resources of the driving group, maintaining project coherence and facilitating replicability in other rural contexts.

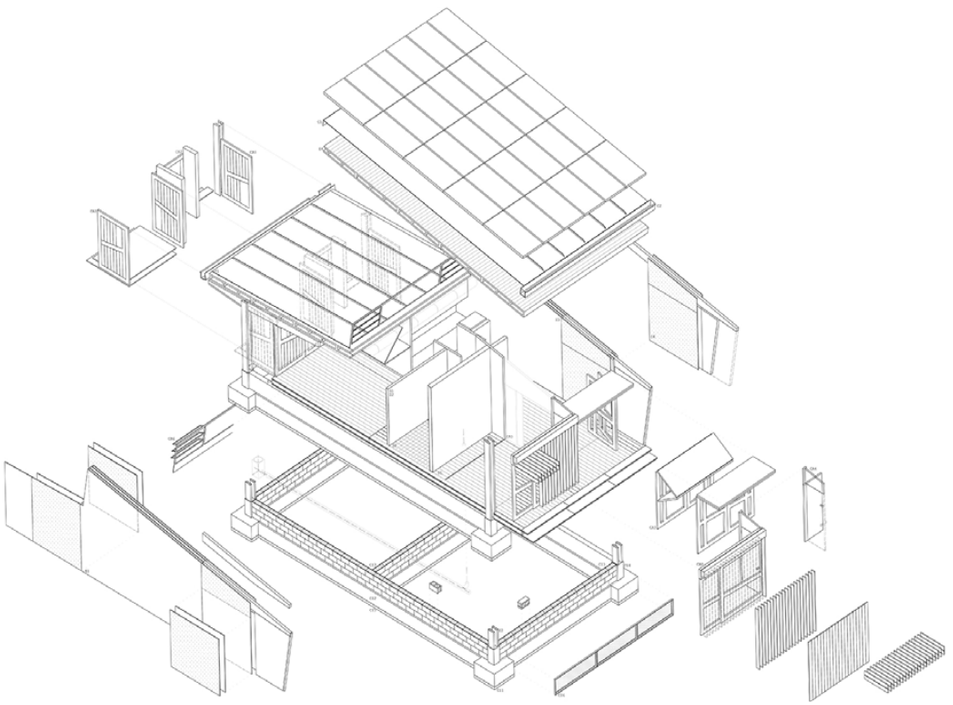


Fig. 11 | Exploded axonometric view of a housing module showing the construction system and assembly sequence. The drawing disassembles the structural and envelope components (foundations, floors, walls, and roof) providing a clear understanding of the modular and prefabricated approach (credit: J. Eixerés Ros, 2021).

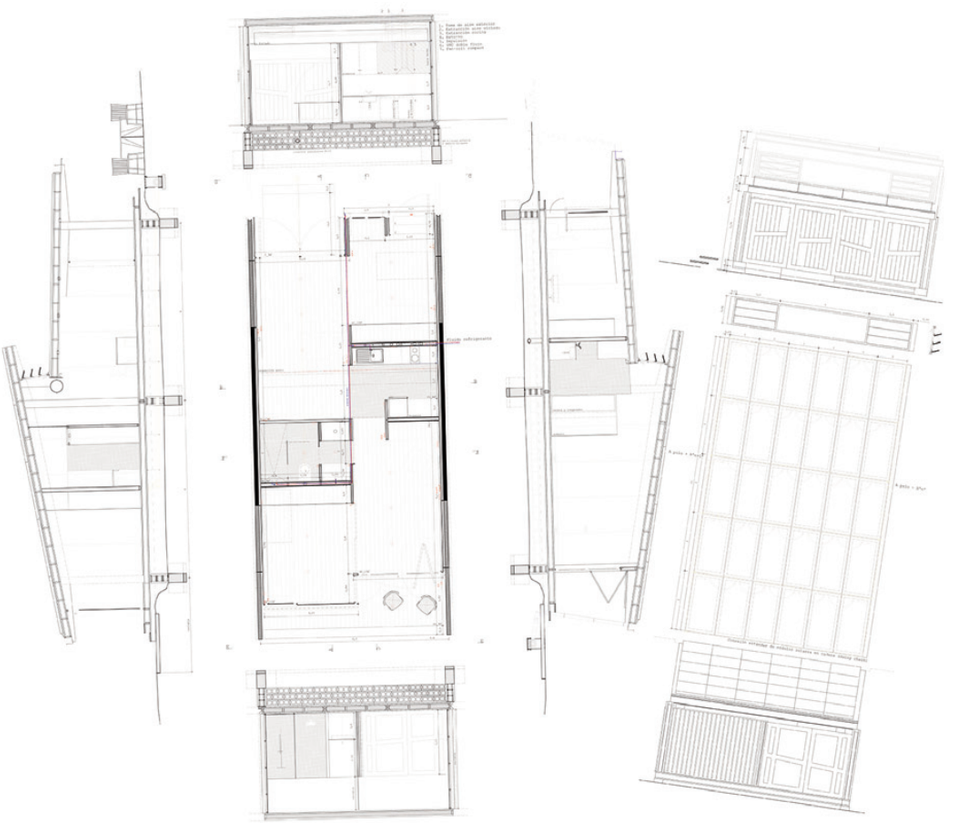


Fig. 12 | Detailed technical drawings of a housing module's installation layout, including electrical, plumbing, and mechanical systems. The plan and sections indicate the routing of services, integration with structural elements, and maintenance accessibility (credit: J. Eixerés Ros, 2021).

Energy community and cooperative governance | The project contemplates the creation of a renewable energy community, understood not as a technological add-on but as a structural part of the collective habitation model. This community is developed alongside the housing cooperative, sharing both infrastructure and principles of democratic management and equitable distribution. Technically, the system is based on a centralised photovoltaic installation with collective self-consumption, linked to housing units and common spaces through a simplified compensation scheme (Fig. 12). The system sizing is based on an estimate of the annual consumption of the housing complex and generation capacities according to the solar radiation available at the site. Shared batteries are also planned to store surplus energy and ensure system resilience, especially during months of low production.

The design of this infrastructure is not 'neutral': it aims to make the energy dimension visible through architectural and landscape integration, promoting an active relationship between inhabitants and production-consumption cycles. In this model, energy ceases to be a commodity and becomes a collective good. Regarding the organisational model, a cooperative governance structure based on direct participation, transparency principles, and co-responsibility is proposed. The energy community is configured as a legal entity linked to the housing cooperative, allowing decisions about use, maintenance, and reinvestment of energy benefits to be made horizontally. Internal committees are planned for efficiency, maintenance, and communication with the environment.

This model seeks not only to reduce dependence on fossil fuels and mitigate environmental impact, but also to activate a local circular economy in which energy savings can be allocated to social, cultural, or habitat-improvement purposes. Additionally, the possibility of connecting with other nearby communities is envisaged, scaling cooperative logic toward distributed energy networks at the territorial level. The integration of this energy dimension reinforces the project's systemic character and amplifies its impact on SDGs 7 (Affordable and Clean Energy) and 8 (Decent Work and Economic Growth), promoting a just, situated, and socially inclusive energy transition (Crippa et alii, 2024).

Discussion: barriers, impacts, and transferability | Implementing cooperative housing and energy models in rural contexts poses multiple challenges, both structural and cultural. In the case studied, legal, economic, institutional, and social barriers hinder the expansion of proposals like the one presented here. From a regulatory perspective, Spanish urban legislation remains oriented toward private or centralised public promotion models, with little adaptation to cooperative self-promotion figures. Limitations on accessing rural land, parcelling requirements, and administrative obstacles slow down and increase the cost of processes, especially in small towns with limited institutional resources (Bellini and Martorana, 2025).

Economically, one of the main challenges is the initial financing of common infrastructure and the lack of financial instruments adapted to non-profit collective models. Public aid programmes linked to energy efficiency or rural regeneration often do not consider the timing, organisational forms, or governance logics of cooperatives. Culturally, the fragility of the rural social fabric and the progressive loss of community practices represent another significant obstacle. In many areas of the so-called 'Empty Spain', individualistic dynamics and scepticism toward collective formulas make it difficult to form sustained, organisational driving groups.

Nevertheless, the model proposed here offers significant potential impacts that go beyond the local scale. First, it allows the revalorisation of the territory through a non-extractive logic, promoting an integrated relationship among habitat, ecosystem, and community. Second, it generates synergies between the right to housing, energy sustainability, and rural regeneration, activating SDGs 6, 7, and 8 transversally (Bellini and Martorana, 2025; Rizzi, 2025). In this sense, the project resonates with broader strategies such as Hydrogen Valleys, which show how energy transition can be grounded in territorial logics and local resource management (Battisti and Calvano, 2024).

Furthermore, its replicable and open approach facilitates adaptation to other rural contexts in the Mediterranean arc or inland Spain with minimal adjustments. Architectural modularity, typological flexibility, and cooperative governance enable the absorption of variations in scale, climate, local culture, and organisational capacity. In this sense, it is not only an architectural project but a prototype of socio-ecological transition that raises questions and offers answers about how to live collectively outside metropolitan centres, with energy autonomy, ecological responsibility, and distributive equity.

Conclusions and future developments | This work proposes a cooperative habitat model in a rural context that integrates housing, energy, and community from an eco-social and territorial perspective. Through the case of Almenara, it is demonstrated that architecture can be rethought as a tool for rural regeneration, social justice, and sustainability, overcoming fragmentary approaches that have traditionally separated technical from political, social from environmental.

The proposal does not seek to offer universal solutions but to activate critical questions: How to live collectively without depending on the market? How to design infrastructure from the commons? How to return political centrality to peripheral territories? The value of the project lies in both its architectural materialisation and the conceptual and methodological framework that supports it. The results show that situated, cooperative, and multiscale design can generate positive impacts on the environment, social fabric, and local economy. The incorporation of an energy community reinforces this transformative dimension, expanding group capacities and contributing to a just energy transition.

In this sense, the model outlines a set of strategic elements that can guide designers and planners in other contexts. By combining cooperative governance with energy self-sufficiency and adaptive spatial configurations, it suggests a design approach capable of operating simultaneously at multiple scales: at the micro level, through flexible housing modules and passive strategies; at the meso level, through collective spaces that support shared uses and energy exchange; and at the macro level, through territorial integration with landscape systems and renewable infrastructures.

To support its potential transferability, the proposal can be read through a series of indicators – such as energy self-consumption, land-use efficiency, the degree of cooperative governance, and local economic retention – that align with several Sustainable Development Goals (notably SDGs 6, 7, 8, and 11). These criteria provide a framework for evaluating the environmental and social impact of the model and for adapting it to other territories with different climatic, regulatory, and socio-cultural conditions.

Regarding future developments, the possibility is raised of formalising the experience as a replicable prototype in other areas of Spain and southern Europe, while adapting the model to different contexts. It also opens the way for further deepening in hybrid governance mechanisms, solidarity financing, and public policies that favour such initiatives. In a moment of multiple crises – climatic, economic, housing – the project points toward architecture that does not design objects, but relationships between people, with resources, and with the territory: architecture in the service of common life.

Notes

1) Bioclimatic principles refer to architectural design strategies that utilise local climate conditions to reduce energy consumption and enhance comfort.

2) Participatory architectural strategies imply the active involvement of residents in the design and decision-making process, promoting a sense of ownership and community cohesion (Bellini and Martorana, 2025).

3) For more information on 'Base de datos INE', see the webpage: ine.es [Accessed 25 September 2025].

4) For more information on 'PATRICOVA – Plan de Acción Territorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunitat Valenciana', see the webpage: visor.gva.es [Accessed 25 September 2025].

5) For more information on 'Visor Urbanístico GVA', see the webpage: visor.gva.es [Accessed 25 September 2025].

6) For more information on 'Geoportal IDEE', see the webpage: idee.es [Accessed 25 September 2025].

7) Two co-design workshops were carried out between March and May 2024 at the Universitat Politècnica de València with a group of 10 participants, including architecture students and local stakeholders. The sessions focused on programmatic needs, governance strategies, and spatial organisation models adapted to rural contexts.

8) Five semi-structured interviews were conducted between May and June 2024 with professionals from housing cooperatives, energy planning, and local governance. The objective was to assess regulatory feasibility, identify potential governance models, and explore transferability to other rural territories.

References

Ayala-García, C., Velandia Rayo, D. A. and Nieman Jansen, C. J. (2025), "Parametrictectura – Un progetto per la prefabbricazione e l'autocostruzione nell'America Latina rurale | Parametrictectura – A rural parametric design to enhance prefabrication and self-construction methods in Latin America", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 296-309. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17202025 [Accessed 25 September 2025].

Azzalin, M. (2024), "Indicatore Smart Readiness per l'edilizia – Asset digitali per la transizione energetica | Smart Readiness for buildings – Digital asset for energy transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 148-159. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15112024 [Accessed 25 September 2025].

Battisti, A. and Calvano, A. (2024), "Hydrogen Valleys – Scenari di transizione energetica e sviluppo locale per città medie | Hydrogen Valleys – Energy transition and local development scenarios for medium-sized cities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 48-57. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1532024 [Accessed 25 September 2025].

Bellini, O. E. and Martorana, F. (2025), "Strategie metaprogettuali per l'accessibilità economica alla residenzialità universitaria | Meta-design strategies for affordability in university housing", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 256-269. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17172025 [Accessed 25 September 2025].

Boeri, A., Longo, D., Boulanger, S. O. M. and Massari, M. (2024), "Contratto di cittadinanza energetica e transizione delle città europee | Energy citizenship contract and european cities transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 170-179. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15132024 [Accessed 25 September 2025].

Capellán-Pérez, I., Campos-Celador, Á. and Terés-Zubiaga, J. (2018), "Renewable Energy Cooperatives as an instrument towards the energy transition in Spain", in *Energy Policy*, vol. 123, pp. 215-229. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.064 [Accessed 25 September 2025].

Caramizaru, A. and Uihlein, A. (2020), *Energy Communities – An overview of energy and social innovation*, EUR 30083 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2760/180576 [Accessed 25 September 2025].

Crippa, D., Di Prete, B., Fagnoni, R. and Leonardi, C. (2024), "Distretti energetici collaborativi – Laboratori urbani per un'energia di prossimità | Collaborative energy districts – Urban workshops for proximity energy", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 296-305. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15242024 [Accessed 25 September 2025].

Del Curto, D., Garzulino, A. and Turrina, A. (2024), "Sostenibilità e transizione energetica – Prospettive per un approccio integrato al patrimonio costruito | Sustainability and energy transition – Perspectives for an integrated approach to the built heritage", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 114-123. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1582024 [Accessed 25 September 2025].

Del Molino, S. (2016), *La España vacía – Viaje por un país que nunca fue*, Turner, Madrid.

Delibes, M. (1978), *El disputado voto del señor Cayo*, Ediciones Destino, Barcelona.

European Union (2018), *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)*, document 32018L2001, PE/48/2018/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32018L2001 [Accessed 25 September 2025].

Ferrante, T., Romagnoli, F. and Villani, T. (2023), "Sviluppo urbano sostenibile – Organizzazione di contenuti informativi per la transizione verso i Distretti a Energia Positiva | Sustainable urban development – Organizing information content for the transition to Positive Energy Districts", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 191-204. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13162023 [Accessed 25 September 2025].

Gallego-Castillo, C., Heleno, M. and Victoria, M. (2021), "Self-consumption for energy communities in Spain – A regional analysis under the new legal framework", in *Energy Policy*, vol. 150, article 112144, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112144 [Accessed 25 September 2025].

Harvey, D. (2012), *Rebel Cities – From the Right to the City to the Urban Revolution*, Verso, New York.

Houellebecq, M. (2010), *El mapa y el territorio*, Anagrama, Barcelona.

Manzini, E. (2015), *Design, When Everybody Designs – An Introduction to Design for Social Innovation*, MIT Press, Cambridge, MA.

Ministerio para la Transicíon Ecológica (2019), *Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica*. [Online] Available at: boe.es/buscar/doc. php?id=BOE-A-2019-5089 [Accessed 25 September 2025].

Montaner, J. M. and Muxí, Z. (2011), *Arquitectura y política – Ensayos para mundos alternativos*, Editorial Gustavo Gili, Barcelona.

Ostrom, E. (1990), *Governing the Commons – The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge University Press, Cambridge.

Rizzi, C. (2025), "Osmosi, ibridazione, simbiosi – Dalla biofilia alla progettazione rigenerativa interspecifica | Osmosis, hybridisation, symbiosis – From biophilia to interspecies regenerative design", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 146-155. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/1792025 [Accessed 25 September 2025].

Romano, R. and Di Monte, E. (2023), "Moduli nearly Zero Energy – Modelli abitativi a basso impatto ambientale per la città del futuro | nearly Zero Energy Modules – Low-impact modular housing models for the city of the future", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 250-263. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14212023 [Accessed 9 October 2025].

Subirats, J. (2011), *Otra sociedad, ¿otra política? – De «no nos representan» a la democracia de lo común*, Icaria, Barcelona.

Turner, J. F. C. (1976), *Housing by People – Towards Autonomy in Building Environments*, Marion Boyars, London.

Walker, G. and Devine-Wright, P. (2008), "Community renewable energy – What should it mean?", in *Energy Policy*, vol. 36, issue 2, pp. 497-500. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enpol.2007.10.019 [Accessed 25 September 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 250-263
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18142025

ARTICLE INFO

Received 15 September 2025
Revised 21 October 2025
Accepted 22 October 2025
Published 30 December 2025

MURO TROMBE E LABIRINTO TERMICO
Strategie bioclimatiche per il clima mediterraneo

TROMBE WALL AND THERMAL LABYRINTH
Bioclimatic strategies for the Mediterranean climate

Fabrizio Tucci, Kristina Mitrik, Lavinia Montagner

ABSTRACT

La ricerca indaga l'integrazione di Trombe Wall System (TWS) e Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) come strategie bioclimatiche per i climi mediterranei. Lo studio unisce analisi teorica, casi studio, indagine di mercato e database di componenti con Analisi Multicriteriale e simulazioni parametriche. I risultati confermano la presenza sul mercato di elementi, componenti e materiali, idonei all'integrazione dei due sistemi ed evidenziano come un TWS con massa termica di 20 cm riduca i fabbisogni di riscaldamento fino al 50%, mentre il TLVS garantisce un raffrescamento di 6-8 °C in quanto le superfici sagomate incrementano del 15% lo scambio termico e l'omogeneità dei flussi. La ricerca ha dimostrato che l'integrazione dei due sistemi produce benefici sinergici in termini di risparmio energetico e comfort indoor, offrendo al contempo linee guida replicabili.

The research investigates the integration of the Trombe Wall System (TWS) and the Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) as bioclimatic strategies for Mediterranean climates. The study combines theoretical analysis, case studies, market research, and a component database with multi-criteria Analysis and parametric simulations. The results confirm the availability on the market of elements, components, and materials suitable for integrating the two systems, and highlight that a TWS with a 20 cm thermal mass can reduce heating demand by up to 50%. At the same time, the TLVS ensures a cooling of 6-8 °C, with shaped surfaces that increase heat exchange and flow uniformity by 15%. The research has demonstrated that integrating the two systems yields synergistic benefits in energy savings and indoor comfort, while also providing replicable guidelines.

KEYWORDS

sistemi bioclimatici, analisi decisionale multicriteriale, soluzioni standardizzate, efficienza energetica, simulazione energetica

bioclimatic systems, multi-criteria decision analysis, standardised solutions, energy efficiency, energy simulation

Fabrizio Tucci, Architect and PhD, is a Full Professor of Environmental Design at the 'Sapienza' University of Rome (Italy), where he is Scientific Director of the PNRR Flagship Project 2 'Energy and Digital Transition' of the Rome Technopole. Former Director of the PDTA Department, since October 2024, he has served as Director of the Environmental Design and Design Quality Area and Coordinator of the Design Quality Committee at the State Property Agency. For 30 years, he has been the Scientific Director of national and international projects and research focused on the quality of the project and environmental design, on the relationship between design and technological innovation, and on environmental and social sustainability in the processes of architectural and urban regeneration. E-mail: fabrizio.tucci@uniroma1.it

Kristina Mitrik, Architect, is a PhD Candidate in Environmental Technological Design at the PDTA Department, 'Sapienza' University of Rome (Italy). Her research focuses on passive systems and sustainable strategies within the framework of the Rome Technopole project, funded by the Italian NRRP. E-mail: kristina.mitrik@uniroma1.it

Lavinia Montagner, Architect, is a PhD Candidate in Environmental Technological Design at the PDTA Department, 'Sapienza' University of Rome (Italy). Her research focuses on bioclimatic envelope systems for tertiary buildings in Mediterranean climates, within the Rome Technopole project. E-mail: lavinia.montagner@uniroma1.it

Il settore edilizio rappresenta uno dei principali responsabili del consumo energetico e delle emissioni climalteranti a livello globale, contribuendo al 40% del consumo finale di energia nell'Unione Europea, di cui il 27% da edifici non-residenziali, e al 36% delle emissioni di gas a effetto serra (IEA, 2023; European Parliament and Council of the European Union, 2024). Questi dati confermano il ruolo strategico del settore edilizio nella transizione energetica da non considerare mai come svincolata dal più ampio obiettivo della transizione ecologica e climatica (Tucci, 2018). L'Unione Europea ha infatti fissato obiettivi vincolanti di riduzione delle emissioni nette del 55% (European Commission, 2021) entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, con il traguardo della neutralità climatica entro il 2050 (European Parliament and Council of the European Union, 2021). Parallelamente l'IPCC individua nel settore edilizio un ambito chiave di mitigazione, dove interventi sull'involucro e sui servizi energetici risultano fondamentali per la decarbonizzazione e per limitare l'aumento della temperatura globale entro 1,5 °C (Cabeza et alii, 2023).

La domanda di raffrescamento negli edifici è in rapida crescita e si prevede possa triplicare entro il 2050, spinta dall'aumento delle temperature e dallo sviluppo socio-economico (IEA, 2018). I sistemi di climatizzazione e ventilazione rappresentano circa il 20% dei consumi elettrici globali del settore edilizio e nel 2022 hanno assorbito circa 2.100 TWh, confermandosi tra gli usi finali più energivori e in rapida diffusione (Ritchie, 2024). Ciò porterà le emissioni derivanti dal raffrescamento a salire a 6,1 miliardi di CO_{2eq} nel 2050, pari a oltre il 10% delle emissioni globali previste per quell'anno (UNEP, 2023).

Al contempo non va sottovalutata la quota dei consumi energetici per il riscaldamento: a livello globale, quasi la metà del fabbisogno energetico complessivo è assorbita da riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria, con una copertura da combustibili fossili[1] che supera il 60%.

In Europa il comparto non residenziale riveste un ruolo rilevante, pari al 22% del totale (Volkova, 2024), includendo edifici con diverse destinazioni d'uso e rappresentando il 30% della superficie edilizia e il 34% della domanda finale di energia per riscaldamento (der Wieden et alii, 2023), con valori medi pari a 161 kWh/m^2 per anno (Di Turi, Ronchetti and Sannino, 2023).

In Italia il patrimonio edilizio è composto da circa 14 milioni di edifici, di cui circa 1,7 milioni adibiti a uso non residenziale, pari a circa il 12% del totale (Caffari et alii, 2024); per il solo settore terziario i dati riportano un consumo medio di circa 197 kWh/m^2 per anno, di cui 130 imputabili al fabbisogno termico e 67 a quello elettrico (Ministero della Transizione Ecologica, 2021).

La necessità di intervenire sul Patrimonio edilizio è confermata dal quadro normativo europeo e nazionale. A livello sovranazionale, la Direttiva (UE) 2024/1275 sulla prestazione energetica nell'edilizia (European Parliament and Council of the European Union, 2024) ha introdotto obiettivi vincolanti: a partire dal 2028 tutti i nuovi edifici pubblici dovranno essere a emissioni zero, mentre dal 2030 il requisito si estenderà a tutte le nuove costruzioni. Accanto alle direttive europee standard internazionali come la UNI EN ISO 13790:2008 e la UNI EN ISO 15265:2005, che definiscono metodologie di calcolo per i consumi energetici legati al riscaldamento e al raffrescamento, la UNI EN 16798-1:2019 definisce i parametri relativi alla ventilazione degli ambienti interni, la qualità dell'aria delle condizioni termo-igrometriche, dell'illuminazione e dell'acustica, mentre la normativa italiana stabilisce parametri climatici, requisiti prestazionali e limiti di trasmittanza per gli edifici (Ministro dello Sviluppo Economico, 2015).

Alla luce di tali premesse il presente contributo intende analizzare le potenzialità di integrazione del Trombe Wall System (TWS) e del Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS), al fine di migliorare l'efficienza energetica degli edifici non residenziali in clima mediterraneo. L'obiettivo è valutare le prestazioni termo-energetiche e ambientali di tali sistemi, evidenziandone il contributo alla riduzione dei consumi e delle emissioni. Il lavoro si articola in una rassegna e sistematizzazione, dettata dalla UNI 8289: 1981, delle principali componenti tecnologiche e materiche, classificate secondo la UNI 8290-1:1981+ A122:1983; nello svolgimento di attività simulativo-energetiche per l'ottimizzazione delle due tecnologie e nella discussione dei risultati ottenuti. Il contributo mira a fornire una metodologia valutativo-comparativa e strumenti simulativi utili alla comunità scientifica e ai progettisti, promuovendo l'integrazione e l'ottimizzazione di sistemi per la transizione energetica del costruito.

Approccio e obiettivi della ricerca | In questo contesto si colloca il progetto della nuova sede del Rome Technopole, connotato quale progetto pilota nell'ambito della più ampia operazione di rigenerazione urbana dell'area di Pietralata oggetto della ricerca su scala nazionale, finanziata dal PNRR 'Energy transition and digital transition in urban regeneration and construction'[2] (Rome Technopole, 2024). Il progetto pilota, frutto di ricerca applicata avanzata, presenta un edificio a energia zero e a emissioni zero che si offre da un lato come esempio sperimentale delle potenzialità rivestite da un'integrazione – fondata scientificamente su simulazioni e modellazioni dei risultati attesi – di tecnologie innovative a bassa impronta carbonica, ecologica ed energetica, dall'altro come modello di buona pratica per il settore terziario.

La valenza della ricerca e della sua applicazione progettuale di tipo sperimentale e dimostrativo risiede nell'integrazione sinergica di sistemi passivi, da sempre utilizzati per il controllo del microclima e per affrontare le condizioni climatiche estreme attraverso la replicazione di meccanismi naturali (Buono, 1998; Tucci, 2009; Ferrucci and Peron, 2018; Grosjean et alii, 2025), in linea con la necessità di ridurre consumi ed emissioni per contrastare i cambiamenti climatici e la dipendenza energetica (Simões, Manaia and Simões, 2021; Mo et alii, 2024).

Tra i sistemi bioclimatici passivi il TWS è capace di accumulare calore solare in facciata e di rilasciarlo gradualmente, risultando efficace durante il periodo invernale nei climi mediterranei, grazie all'elevata disponibilità solare, per comfort e riduzione delle emissioni (Simões, Manaia and Simões, 2021; Tucci, 2021; Briga-Sá et alii, 2021; Matos, Delgado and Guimarães, 2022; Hernandez-Perez et alii, 2025). Il TLVS sfrutta invece la massa del calcestruzzo ipogeo e la temperatura costante del terreno per trattare l'aria di ventilazione, con effetti di raffrescamento estivo, ma anche di riscaldamento invernale (Marmion et alii, 2012; Song, Song and Lim, 2014; Annan and Nehme, 2016; Rim, Sung and Kim, 2018; Tucci, 2020a; Mihalakakou et alii, 2022).

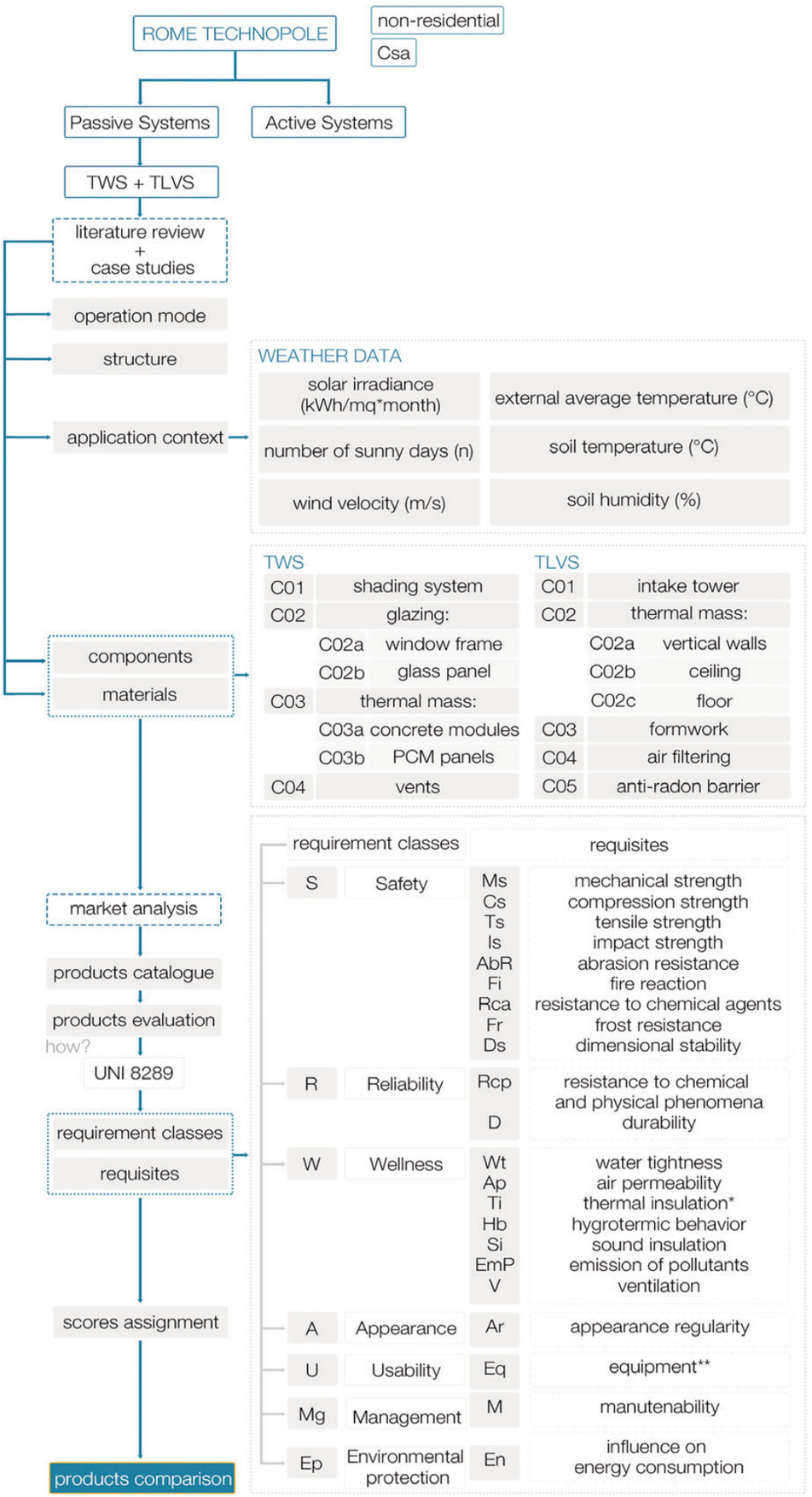
Obiettivo principale è dimostrare la validità e le potenzialità dell'adozione di TWS e TLVS in edifici non residenziali nel clima mediterraneo, fornendo un riferimento e una linea guida sia a livello pratico, volta alla standardizzazione e diffusione su larga scala dei due sistemi, che teorico, dimostrandone l'efficienza e impostando un metodo per il loro processo di ottimizzazione, tramite l'uso delle simulazioni energetiche.

Contributo agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs) | L'ottimizzazione e la validazione di sistemi bioclimatici mira a incentivare la loro diffusione, al fine di aumentare l'indipendenza dalle fonti energetiche tradizionali (SDG 7) e promuovere l'adozione di tecnologie non impattanti (SDG 13). La loro diffusione su larga scala comporterebbe la creazione di settori innovativi all'interno dell'industria (SDG 9) e nuovi posti di lavoro (SDG 2, 8), che necessitano però di politiche di incentivazione adeguate per evitare eventuali compromessi dovuti a costi iniziali, sperimentazioni e investimenti (SDG 1, 10).

Nello specifico l'uso di TWS e TLVS può contribuire al miglioramento delle condizioni termo-igrometriche e della qualità dell'aria interna (SDG 3) e alla resilienza e mitigazione delle isole di calore (SDG 11); inoltre promuove parità di accesso e inclusione professionale nei programmi di ricerca e formazione grazie a corsi e seminari organizzati dall'associazione Rome Technopole (SDG 4, 5), incoraggiando pratiche di produzione e consumo responsabili (SDG 12) e il rispetto degli ecosistemi terrestri e marini grazie alla riduzione delle pressioni ambientali (SDG 6, 14, 15). Infine il progetto si fonda su reti di collaborazione tra Enti di ricerca, Istituzioni e industria (SDG 16, 17), rafforzando partenariati e governance per una transizione ecologica equa e condivisa.

Trombe Wall System: storia, funzionamento e letteratura | Il TWS, brevettato da Morse nel 1881 e applicato a Odeillo da Trombe e Michel per la prima volta nel 1967, sfrutta i princìpi dell'effetto camino solare e del trasferimento di calore, secondo una modalità – basata su processi totalmente naturali – che vede la radiazione incidente prima assorbita dalla parete massiva e accumulata grazie alla capacità termica, dopo trasferita all'interno dell'ambiente confinato per convezione e irraggiamento. In inverno funziona come accumulatore e barriera isolante, mentre in estate limita i guadagni termici e contribuisce al raffrescamento; le configurazioni variano in base al clima e alla latitudine (Hu et alii, 2017; Tucci, 2020b; Wang et alii, 2020; Elsaid et alii, 2023; Gu et alii, 2023; Sornek et alii, 2023; Xiao et alii, 2024).

Diversi studi hanno valutato come le singole componenti influenzino le prestazioni dei TWS in funzione del clima, ad esempio il tipo di vetro (Pourghorban and Asoodeh, 2022) – quello doppio può ridurre i consumi di energia primaria fino al 40% (Sornek et alii, 2023) – lo spessore e il materiale della massa termica, le dimensioni e il posizionamento e la gestione delle bocchette di ventilazione (Briga-Sá et alii, 2021). Oltre una certa soglia aumentare lo spessore della parete non porta benefici energetici ed è poco conveniente (Abbassi, Naili and Dehmani, 2022), mentre l'adozione di sistemi di ombreggiamento riduce la dispersione di calore durante le ore notturne e limita il rischio di surriscaldamento in quelle diurne (Briga Sá et alii, 2017); anche il rapporto tra superficie del TWS e facciata risulta determinante (A'zamovich, 2022). La letteratura esamina inoltre le interazioni tra componenti e le strategie operative



* Thermal insulation is defined by four main indicators: thermal transmittance, thermal conductivity, density, and specific heat capacity
** Equipment is defined by three main indicators: workability, dimensions, and weight

Fig. 1 | Workflow for identifying TWS and TLVS components and product analysis (credit: the Authors, 2025).

Next page

Fig. 2 | Blue Ridge Parkway Destination Centre (2007) in Asheville (North Carolina, USA), designed by Lord Aeck Sargent Architects (source: timelessmoon.getarchive.net, 2008).

Fig. 3 | Oregon Health and Science University Centre for Health and Healing (2006) in Portland (Oregon, USA), designed by GBD Architects (source: hpb magazine.org, 2009).

Fig. 4 | The Recreation and Wellness Centre – RAW (2011) in San Francisco (California, USA), designed by LPA Design Studios (source: lpadesignstudios.com, 2025).

ottimali, ad esempio tra bocchette e materiale della massa termica (Asdaghi and Fayaz, 2023): ridurre la sezione delle bocchette attenua le oscillazioni termiche interne e aumenta la differenza di temperatura con l'esterno (Laribi et alii, 2025). Tra le principali innovazioni del sistema vi è l'impiego di materiali a cambiamento di fase, che consente di ridurre spessore e peso del sistema, migliorarne le prestazioni energetiche e incrementare il comfort indoor (Leang et alii, 2020; Samiev and Halimov, 2022; El-said et alii, 2023; Zhou et alii, 2024; Zhang et alii, 2025). L'applicazione dei TWS in edifici multipiano non residenziali risulta invece ancora poco esplorata (Gu et alii, 2023; Abdelsamea et alii, 2025). Tra le diverse configurazioni, il TWS composito, caratterizzato da vetratura singola o doppia, intercapedine d'aria, massa termica e aperture di ventilazione, risulta quella più studiata e diffusa nei climi mediterranei (Briga-Sá et alii, 2021; Abbassi, Naili and Dehmani, 2022; Hernandez-Perez et alii, 2025).

Thermal Labyrinth Ventilation System: storia, funzionamento, letteratura | Le tecniche di raffrescamento ipogeo costituiscono una delle forme più antiche di climatizzazione passiva. Esempi storici di questo principio si ritrovano nei 'qanat' persiani[3] (Montero-Gutiérrez et alii, 2025) equiparabili a quelli dei moderni labirinti termici, dove l'aria calda veniva incanalata in gallerie sotterranee ventilate da torri del vento ('badghir' in persiano, 'barjeel' in arabo; Hejazi and Hejazi, 2013), per poi essere convogliata verso le abitazioni dopo essersi raffreddata grazie all'umidità del terreno (Lechner, 2008; Ghandi and Leone, 2024). Le abitazioni vernacolari dell'Italia meridionale, come nel Borgo della Corricella a Procida o nel Centro Storico di Forio d'Ischia, mostrano come l'uso del tufo, i vani ipogei e i condotti d'aria scavati nella roccia abbiano garantito fin dall'antichità, e nel corso dei secoli, condizioni di comfort anche nei mesi più caldi (Buono, 1998).

In questi casi il raffrescamento non è solo frutto della massa termica ma anche di una strategia urbana più ampia, in cui il posizionamento degli edifici e la ventilazione canalizzata svolgono un ruolo chiave nel controllo microclimatico (Bori, 2006). Givoni (1994), seppur con un approccio pionieristico, aveva già sottolineato come gli edifici ipogei, per la loro configurazione morfologica e il contatto con il terreno, potessero offrire una risposta efficace al calore estivo, soprattutto se combinati con tecniche come la ventilazione notturna e il raffrescamento evaporativo indiretto.

Dispositivi moderni come i labirinti termici e i tubi interrati sono evoluzioni dirette di queste solu-









zioni antiche, da cui riprendono lo stesso principio di funzionamento, ma con maggiore attenzione alla scelta di materiali ad alta capacità termica e agli elementi necessari per la loro realizzazione. Numerosi studi recenti dimostrano come questi sistemi possano ridurre la temperatura dell'aria anche di 6-8 °C rispetto all'esterno, migliorando significativamente l'efficienza energetica degli edifici (Marmion et alii, 2012; Song, Song and Lim, 2014; Annan and Nehme, 2016; Xiong et alii, 2019).

L'originalità della ricerca risiede nello sviluppo di un metodo integrato di analisi e simulazione, volto alla sistematizzazione e alla valutazione dei componenti impiegati nei sistemi bioclimatici di riferimento. L'algoritmo proposto consente di modellare e confrontare le prestazioni termo-energetiche di TWS e TLVS in condizioni climatiche mediterranee, ancora poco indagate, definendo criteri di adattabilità per edifici non residenziali multipiano. I risultati offrono nuove evidenze a supporto della ricerca applicata e della progettazione di soluzioni passive a basso impatto ambientale.

Metodologia e fasi della ricerca | Lo studio sviluppa una raccolta di componenti per la realizzazione dei sistemi di TWS e di TLVS, insieme a un metodo di valutazione per confrontare le opzioni disponibili sul mercato e un flusso di lavoro per la modellazione parametrica e le simulazioni energetiche, finalizzato a individuare le configurazioni ottimali dei due sistemi in un impiego integrato. La metodologia sviluppata si articola in sei fasi strutturate come di seguito riportato.

La fase 1) 'Analisi teorica e contestuale' ha previsto revisione della letteratura scientifica, sperimentazioni e casi studio, specificando il tipo di clima secondo la classificazione Köppen-Geiger[4], che coinvolgono i due sistemi, per comprenderne origini, sviluppi, caratteristiche costruttive e prestazionali. Sono state individuate le principali componenti tecnologiche, che sono poi state oggetto delle successive fasi di analisi comparativa, e i parametri climatici rilevanti, con attenzione al clima mediterraneo. Dallo studio emerge che il TWS è vantaggioso tra i 55° ed i 40° di latitudine, sebbene le prestazioni dipendano da radiazione solare e nuvolosità (Kostikov, Grinkrug and Yiqiang, 2020; Lichołai et alii, 2021; Lohmann and Santos, 2020; Hernandez-Perez et alii, 2025), mentre per il TLVS risultano centrali temperatura e umidità del sottosuolo. Altri fattori, come temperatura massima esterna e velocità del vento, influiscono su entrambi, con particolare importanza per il TLVS in caso di ventilazione naturale o ibrida.

La fase 2) 'Indagine di mercato' si è basata sulla ricerca dei prodotti delle principali componenti tecnologiche e materiche, con l'obiettivo di valutarne disponibilità, prestazioni, scalabilità e possibilità di commercializzazione. In particolare per il TWS sono stati considerati sistemi di ombreggiamento, infissi e tipologie di vetro, pannelli in PCM, blocchi in calcestruzzo per la massa termica e bocchette di ventilazione. Mentre per il TLVS sono stati catalogati i prodotti relativi a torri di aspirazione, massa termica, matrice-forma, filtraggio dell'aria e barriera antiradon.

Nella fase 3) 'Costruzione di database tematici' i dati raccolti sono stati organizzati in due file Excel, uno per ciascun sistema, applicando un primo filtro sulla distanza dei siti di produzione per ridurre l'impatto del trasporto. In conformità alla norma UNI 8289:1981 sono state selezionate alcune classi di esigenze di interesse in funzione delle specifiche necessità dello studio: sicurezza (S), affidabilità (R), benessere (W), aspetto (A), fruibilità (U), gestione (Mg) e salvaguardia dell'ambiente (Ep) e, ciascuna delle quali comprende i diversi requisiti, determinati a loro volta dalla UNI 8290-1:1981+ A122:1983 (Fig. 1).

Nella fase 4) 'Analisi multicriteriale' classi e requisiti sono stati tradotti in criteri e parametri di valutazione con punteggio da 0 a 5 in funzione dell'efficacia sul comportamento del prodotto e del sistema. Per ciascun prodotto sono state elaborate schede di valutazione qualitative per il confronto tra alternative, individuando anche le componenti più idonee all'integrazione dei sistemi nel progetto pilota del Rome Technopole.

La fase 5) 'Simulazioni energetiche' ha previsto l'analisi di alcuni fattori individuati nelle fasi precedenti, da analizzare mediante un modello parametrico sviluppato in Grasshopper e simulato sia con Ladybug Tools[5] (Honeybee e Butterfly) che con i motori EnergyPlus, OpenStudio (OS) e OpenFOAM. Per il TWS sono stati considerati lo spessore della camera d'aria tra vetro e muro massivo, lo spessore della massa termica, la posizione e modalità di funzionamento dei sistemi ombreggianti e la dimensione e la configurazione delle bocchette di ventilazione. Per il TLVS sono stati invece analizzati lo spessore e la forma della massa termica, la distanza tra le pareti e la velocità del flusso d'aria d'entrata.

Nella fase 6) 'Determinazione delle configurazioni ottimali' i risultati hanno consentito di definire le soluzioni più efficaci per l'applicazione dei due sistemi al progetto pilota del Rome Technopole.

TWS e TLVS: casi studio e buone pratiche internazionali | Sei buone pratiche internazionali sono state selezionate da una raccolta più ampia e in questo contributo vengono riportati i casi realizzati in climi analoghi a quello di riferimento, per comprendere

le possibili modalità di adozione e integrazione del sistema. Si tratta di progetti non residenziali multipiano o caratterizzati da ampi spazi e disponibilità di integrazione in facciata o possibilità di spazi ipogei, con caratteristiche analoghe a quelle dell'edificio Rome Technopole, nel quale verranno appunto integrati i sistemi oggetto di questo studio. Il TWS assume diverse conformazioni, accomunate dalla modularità degli elementi, che fanno dedurre una possibilità verso la standardizzazione del sistema.

Il Blue Ridge Parkway Destination Center (Asheville, NC, 2008; Cfa[6]) adotta un sistema di tredici pareti solari massive esposte a sud con una particolare conformazione 'a dente di sega' che consente di alternare i muri di accumulo all'ingresso della luce, il cui comportamento è stato studiato tramite un modello computazionale di fluidodinamica, riferimento utile per la validazione tramite attività simulative (Fig. 2). L'Oregon Health and Science University Center for Health and Healing (Portland, OR, 2006; Csb[7]) è un edificio multipiano che impiega un sistema su due livelli con doppi vetri e sistemi di ricircolo come parte di una strategia ibrida per il preriscaldamento di acqua e aria, una doppia funzionalità che potrebbe essere esplorata anche nel caso del Rome Technopole (Fig. 3). Infine il Recreation and Wellness Center (Hayward, CA, 2011; Csb) utilizza un sistema ventilato con un'estesa massa termica in cemento che ne caratterizza la facciata esposta a ovest, garantendo temperature costanti e confortevoli in ambienti molto ampi (Fig. 4).

Nei casi studio del TLVS la metodologia adottata combina revisione critica della letteratura e confronto comparativo delle prestazioni termo-energetiche, al fine di valutarne la trasferibilità e versatilità in diversi contesti architettonici e climatici.

Nella Great Hall del Kent College (Canterbury, UK, 2019; Cfb[8]) il TLVS si articola in cinque camere ipogee in calcestruzzo, una soluzione costruttiva semplice e a bassa manutenzione, che assicura ventilazione naturale e stabilità termica in un edificio caratterizzato da comfort in spazi ad alta densità d'uso, sebbene le prestazioni possano risentire dell'umidità del suolo o di escursioni termiche ridotte (Fig. 5).

Nell'Ewha Womans University Campus Complex (Seoul, Corea del Sud, 2008; Dwa[9]) il sistema assume la forma di un labirinto verticale scavato nel terreno e capace di ridurre fino a 7 °C la temperatura estiva e di preriscaldare l'aria in inverno di 10 °C. La scala urbana e l'integrazione paesaggistica lo rendono un riferimento emblematico per progetti complessi, assimilabile per concezione al Rome Technopole nell'area di Pietralata (Fig. 6). La sua forza risiede nella capacità di regolare il microclima e di mantenere elevati livelli di comfort con consumi ridotti, mentre le criticità principali riguardano la complessità realizzativa e i costi di manutenzione legati alla grande scala dell'intervento.

Nel Big Data Institute (Oxford, UK, 2017; Cfb) si propone una declinazione tecnologicamente evoluta del sistema, integrando il labirinto di 600 metri quadri con cogenerazione e fotovoltaico. Le simulazioni di fluidodinamica computazionale (CFD) hanno permesso di ottimizzare i flussi e il bilancio termico, dimostrando da un lato che l'unione di strategie passive e attive richiede un elevato livello di controllo e gestione, dall'altro che è possibile trasferire il TLVS anche a edifici di ricerca e direzionali, in contesti caratterizzati da forte innovazione tecnologica (Fig. 7).

Nel complesso questi esempi mostrano come il sistema TLVS possa declinarsi tanto come dispositivo naturale e architettonico (nel caso di edifici con forte componente paesaggistica tramite interramento e integrazione con il contesto) quanto come componente tecnologicamente avanzata (se integrato con altre strategie passive, sistemi impiantistici di alta efficienza, simulazioni CFD ottimizzate).

Componenti e prodotti: un campionario per la realizzazione di TWS e TLVS | La prima fase della metodologia ha permesso di individuare le principali componenti tecnologiche e materiche di TWS e TLVS, accomunate dal tipo di massa termica, qui analizzata in chiave comparativa, seguendo le successive fasi 2, 3 e 4.

Per i blocchi prefabbricati in calcestruzzo sono stati raccolti dati dimensionali e fisici, come spessore, altezza, lunghezza, peso unitario, conducibilità termica con un range di circa 1,6-2,0 W/(m^{2}K), trasmittanza variabile con lo spessore, densità di circa 2.400 kg/m^3 e calore specifico di circa 850 J/K·kg, oltre a prestazioni funzionali e di durabilità, come resistenza a compressione, a fuoco, a gelo e ad agenti chimici, stabilità dimensionale, durata, tenuta all'acqua e permeabilità all'aria. Sono stati considerati anche parametri legati al comfort e alla qualità ambientale, quali isolamento termico e acustico, comportamento igrometrico, emissioni nocive, capacità di contribuire alla ventilazione e al benessere indoor. La valutazione si è estesa ad aspetti estetici e gestionali (regolarità di aspetto, attrezzabilità e manutenibilità) fino all'impatto sui consumi energetici complessivi.

I dati raccolti da schede tecniche e normative sono stati organizzati in una griglia comparativa che restituisce un quadro coerente delle prestazioni; a ciascun parametro è attribuito un punteggio da 0 (dato assente) a 5 (dato ottimale), la cui somma fornisce una valutazione qualitativa fondata su dati quantitativi, sia per le singole classi di esigenze, sia in termini globali.

Parametrizzazione e ottimizzazione: configurazioni ideali per l'applicazione dei due sistemi | Per approfondire il ruolo della massa termica sono state condotte simulazioni energetiche parametriche, come definito precedentemente nelle fasi 5 e 6 della metodologia, variando progressivamente spessore e configurazione, al fine di valutarne l'impatto sulle prestazioni del TWS e del TLVS.

Per il primo tramite il plugin di programmazione Grasshopper sono stati sviluppati due modelli geometrici parametrici: una stanza baseline (4 x 5 x 3 metri) e un'identica dotata di TWS (Fig. 8). Entram-







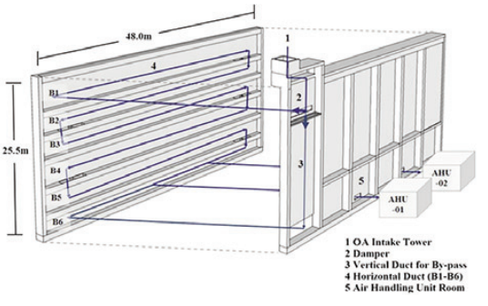






Fig. 5 | Great Hall, Kent College (Canterbury, UK, 2019), designed by Hazle McCormack Young LLP (source: rcinews.it, 2022).

Fig. 6 | Ewha Womans University Campus Complex (Seoul, South Korea, 2008), designed by Dominique Perrault Architecture studio (source: archidiap.com, 2015).

Fig. 7 | Big Data Institute (Oxford, UK, 2017), designed by Make Architects (source: makearchitects.com, 2025).

be presentano sulla parete sud una finestra di 1 x 2 metri, con doppio vetro chiaro, infissi in alluminio a taglio termico e schermatura esterna a rullo. Nel secondo modello è stato aggiunto il TWS, anch'esso di 1 x 2 metri, composto da doppio vetro basso emissivo (4-16-4 mm) riempito con argon, un assorbitore costituito da una lastra metallica con elevata conducibilità termica, intercapedine d'aria di 15 cm e massa in calcestruzzo variabile da 5 a 45 cm. Sono presenti quattro bocchette di ventilazione, due nella parte inferiore e due in quella superiore (35 x 10 cm), regolate in base alla stagionalità e all'alternanza tra ore diurne e notturne, e un doppio sistema di ombreggiamento (sia interno che esterno) regolato in base alla stagione.

L'uso di un modello di tipo parametrico è stato fondamentale per variare dimensioni e caratteristiche delle diverse componenti; le proprietà necessarie per le simulazioni energetiche sono state assegnate tramite la componente Honeybee (HB) del pacchetto Ladybug tools; i materiali, sia opachi che trasparenti, sono stati assegnati tramite 'HB construction material' ai diversi livelli. I due ambienti della 'stanza' e del TWS sono stati resi comunicanti tramite l'uso della 'HB solve adjacency'. In particolare alla 'stanza' è stato assegnato il programma 'small office', mentre il TWS viene trattato come plenum, ovvero come ambiente privo di carichi termici ed elettrici, ma con la sola funzione di scambiare il calore accumulato dall'esterno con l'ambiente interno della 'stanza'. Le due 'stanze' sono state poi convogliate nel modello HB a cui, una volta convertito in modello OpenStudio (OSM), sono stati assegnati i parametri per le simulazioni.

L'obiettivo è stato indagare l'influenza dello spessore della massa termica sulle prestazioni del TWS, confrontando i consumi specifici (kWh/m^2) per riscaldamento, raffrescamento e fabbisogno totale su base mensile e annuale; i risultati sono stati raccolti in un foglio Excel al fine di ottenere una rappresentazione del loro quadro sinottico. Le proprietà geometriche sono state gestite in Grasshopper, quelle termofisiche in HoneyBee; le condizioni climatiche sono state definite in Ladybug tramite file 'epw' della Stazione di Roma Urbe; il modello è stato collegato a EnergyPlus e OpenStudio, da cui sono stati estratti i dati mensili necessari all'analisi (Fig. 9).

Per la modellazione CFD del sistema TLVS è stata sviluppata una geometria di riferimento mediante il software Rhinoceros (Rhino), con dimensioni complessive pari a 10 x 15 x 3 metri, successivamente implementata nel plugin Butterfly, integrato in Grasshopper e basato sul motore di calcolo OpenFOAM. Il processo di simulazione è stato strutturato in quattro fasi fondamentali: la definizione della geometria e delle condizioni al contorno (Geometry and Boundary Conditions), la generazione della mesh (Mesh Generation), l'impostazione e l'esecuzione del solutore (Solver Setup and Run) e, infine, l'elaborazione e l'analisi dei risultati (Post-Processing; Fig. 10).

Tale procedura è stata applicata a quattro diverse varianti geometriche del sistema, concepite per valutare l'influenza della conformazione delle superfici interne sui risultati fluidodinamici: la prima caratterizzata da pareti lisce, la seconda da pareti verticali configurate 'a zig-zag', la terza dall'estensione della stessa geometria anche al pavimento e la quarta da una configurazione completamente irregolare in cui l'andamento 'a zig-zag' interessa pareti, pavimento e soffitto. La scelta di simulare diverse configurazioni si ispira ai contributi di Rim, in cui superfici goffrate sul pavimento determinarono variazioni termiche elevate (Rim, Sung and Kim, 2018).

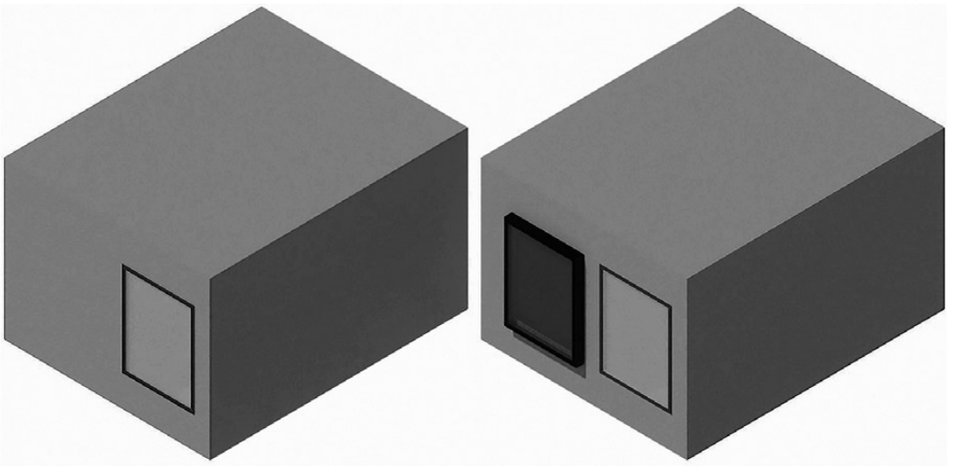


Fig. 8 | Parametric model baseline room and room with TWS (credit: the Authors, 2025).

In particolare nella fase uno sono state impostate condizioni uniformi al contorno, con le pareti mantenute a una temperatura costante di 14 °C, valore scelto in quanto rappresentativo della temperatura media del terreno a una certa profondità, e l'aria in ingresso caratterizzata da una velocità di 0,3 m/s e da una temperatura di 20 °C, in linea con scenari tipici di ventilazione naturale. Questa configurazione iniziale ha permesso di definire un quadro di riferimento coerente per valutare il comportamento termofluidodinamico del sistema, assicurando la comparabilità tra le diverse varianti geometriche analizzate. Successivamente, durante la fase due, è stata costruita la griglia computazionale, elemento essenziale per la corretta discretizzazione del dominio di calcolo. La mesh è stata inizialmente generata con il comando blockMesh, che ha consentito di definire una struttura di base regolare e ben organizzata, per poi essere opportunamente raffinata nelle zone critiche mediante snappyHexMesh, così da garantire una rappresentazione accurata dei gradienti di velocità e temperatura nelle regioni prossime alle superfici solide.

Nella fase tre l'impiego del solutore buoyantSimpleFoam ha permesso di stimare le variazioni di velocità dell'aria (m/s) e di temperatura (ΔT) attraverso l'utilizzo di 'probes' collocati alle sezioni di ingresso e di uscita. L'impostazione dei parametri numerici – come i criteri di convergenza, il numero massimo di iterazioni e le tolleranze residue – ha garantito la stabilità del calcolo e la ripetibilità dei risultati.

Infine nella fase quattro sono stati analizzati in dettaglio i campi di velocità e di temperatura, estratti anch'essi mediante sonde virtuali, ovvero un punto o un insieme di punti nello spazio del dominio di calcolo, posizionati in corrispondenza delle sezioni iniziale e finale del labirinto, calcolando i valori medi della velocità dell'aria (m/s) e determinando i differenziali di temperatura (ΔT).

L'analisi dei dati ha messo in evidenza le variazioni spaziali dei parametri fluidodinamici, fornendo indicazioni utili per confrontare l'efficienza delle diverse configurazioni geometriche studiate e per valutare l'effettiva capacità del sistema TLVS di contribuire al raffrescamento passivo e alla stabilizzazione del microclima interno.

Risultati | I risultati delle simulazioni mettono in evidenza la rilevanza dello spessore della massa termica sui fabbisogni energetici complessivi. L'adozione del TWS comporta una riduzione marcata dei consumi per il riscaldamento, pari a circa il 50% rispetto allo scenario di riferimento. Le prestazioni migliori si registrano con uno spessore di 20 cm, mentre oltre i 25 cm si osserva un'inversione di tendenza con un incremento dei fabbisogni. Per il raffrescamento si registra un leggero aumento dei consumi rispetto al baseline, trascurabile rispetto al beneficio complessivo ottenuto. Considerando il bilancio energetico annuale, i valori oscillano tra 40 e 35 kWh/m^2, con una variazione massima del 20% rispetto alla condizione iniziale (Fig. 11). Nel complesso lo spessore di 20 cm emerge come configurazione ottimale nel contesto climatico e nelle condizioni di esercizio considerate.

L'analisi CFD delle quattro configurazioni del TLVS ha messo in evidenza l'influenza determinante della geometria sulla distribuzione dei campi fluidodinamici e termici. Con pareti lisce (Test 1; Fig. 12) il flusso mantiene un andamento uniforme con velocità contenute (0,05-2,5 m/s) e un raffrescamento limitato, con $\Delta T \approx -1/-2$ °C. L'introduzione delle pareti 'a zig-zag' (Test 2; Fig. 13) incrementa le turbolenze e favorisce gradienti termici più marcati, con velocità locali fino a 5 m/s e una riduzione di circa -3/-4 °C.

L'estensione della geometria goffrata anche al pavimento (Test 3; Fig. 14) amplifica la miscelazione, portando ampie zone a 2,5-5 m/s e un ΔT medio compreso tra -4 e -8 °C. Infine, la configurazione completa con pareti, pavimento e soffitto 'a zig-zag' (Test 4; Fig. 15) risulta la più performante, con ventilazione interna stabile intorno a 4-5 m/s e una riduzione termica fino a -6/-8 °C. Nel complesso l'aumento della complessità geometrica comporta un miglior rimescolamento dell'aria e una significativa diminuzione della temperatura di uscita (Fig. 16).

Conclusioni | La ricerca ha confermato l'efficacia dell'impiego integrato in architettura tra Trombe Wall System (TWS) e Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) come strategie bioclimatiche complementari per il clima mediterraneo. Nella prima fase, oltre a validare l'utilità e il potenziale dell'applicazione dei due sistemi, sono state definite le principali componenti tecnologiche e materiche per la loro

realizzazione nel contesto climatico di riferimento: questa selezione è stata fondamentale per procedere all'impostazione e alla ricerca portata avanti con l'analisi di mercato (fase 2) e all'analisi dei prodotti secondo la struttura dettata dalla UNI 8289: 1981 (fase 3). Gli articoli scelti sono stati poi valutati e classificati tramite l'assegnazione di punteggi parziali e totali (fase 4) utilizzando un'analisi multicriteriale pesata. Le simulazioni parametriche (fase 5) hanno evidenziato l'influenza di specifici fattori sulla prestazione dei due sistemi: lo spessore e la geometria della massa termica rispettivamente per il TWS e il TLVS.

Per il primo, uno spessore compreso tra 15 e 20 cm rappresenta la configurazione ottimale, in grado di ridurre il fabbisogno di riscaldamento fino al 50% mantenendo al contempo carichi di raffrescamento contenuti. Oltre tale soglia le prestazioni tendono a ridursi, rendendo superfluo l'uso di materiale aggiuntivo. Per il secondo, l'analisi CFD ha mostrato come la geometria incide fortemente sulla distribuzione del flusso d'aria e sui gradienti termici. Le pareti lisce garantiscono solo un raffrescamento limitato (ΔT ≈ -1/-2 °C), mentre le configurazioni 'a zigzag' migliorano progressivamente la ventilazione e lo scambio termico. Il modello più complesso, con pareti, pavimento e soffitto corrugati, ha raggiunto velocità stabili intorno a 4-5 m/s e riduzioni termiche tra -6 e -8 °C, dimostrando il potenziale della rugosità superficiale nell'amplificare i fenomeni convettivi e le relative capacità di trasferimento termico.

Nel complesso i risultati evidenziano come i due sistemi, se integrati, possano offrire benefici sinergici: il TWS assicura efficienza invernale, mentre il TLVS garantisce raffrescamento estivo e regolazione dei flussi d'aria; insieme contribuiscono al risparmio energetico e al comfort ambientale fornendo una metodologia replicabile per la progettazione che miri a edifici resilienti e a basso impatto. Tali evidenze costituiscono una base solida per l'applicazione futura di soluzioni bioclimatiche passive integrate in progetti di architettura volta a conseguire un'elevata capacità di resilienza e di mitigazione climatica, come nel caso del progetto pilota per la nuova sede del Rome Technopole, delineando linee operative che uniscano conoscenze storiche e strumenti di simulazione avanzati.

La diffusione dell'approccio è ostacolata da diverse barriere documentate in letteratura. Tra le barriere culturali, la scarsa consapevolezza dei benefici e la limitata informazione tecnica frenano l'adozione di soluzioni bioclimatiche (Furszyfer Del Rio, Sovacool and Griffiths, 2021; Obuseh et alii, 2025). Le barriere economiche e sociali derivano da costi iniziali elevati, carenza di incentivi e disuguaglianze di accesso che ne confinano l'applicazione a contesti sperimentali (Vassiliades et alii, 2023). Infine la mancanza di una legislazione rigorosa, di finanziamenti e investimenti per l'incentivazione di soluzioni low-carbon, nonché le lacune a livello politico e normativo, limitano ulteriormente l'adozione sistematica di tecnologie bioclimatiche (United Nations Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction, 2025; Balali and Yunusa-Kaltungo, 2025).

Possibili sviluppi del presente studio potrebbero includere la verifica dei risultati ottenuti tramite l'applicazione simultanea dei due sistemi ad un unico modello simulativo dell'intero edificio Rome Technopole, in modo da ottenere dati specifici per il progetto. Bisogna inoltre sottolineare come l'analisi di mercato sia stata svolta sul solo territorio nazionale, quindi su una scala limitata rispetto al clima di riferimento, mentre le simulazioni energetiche hanno preso in considerazione solo alcuni parametri rispetto a quelli effettivamente indagabili per ottimizzare la configurazione dei due sistemi. I dati ottenuti potrebbero essere integrati svolgendo ulteriori attività simulative per analizzare l'impatto delle altre variabili individuate nella fase 5 della metodologia.

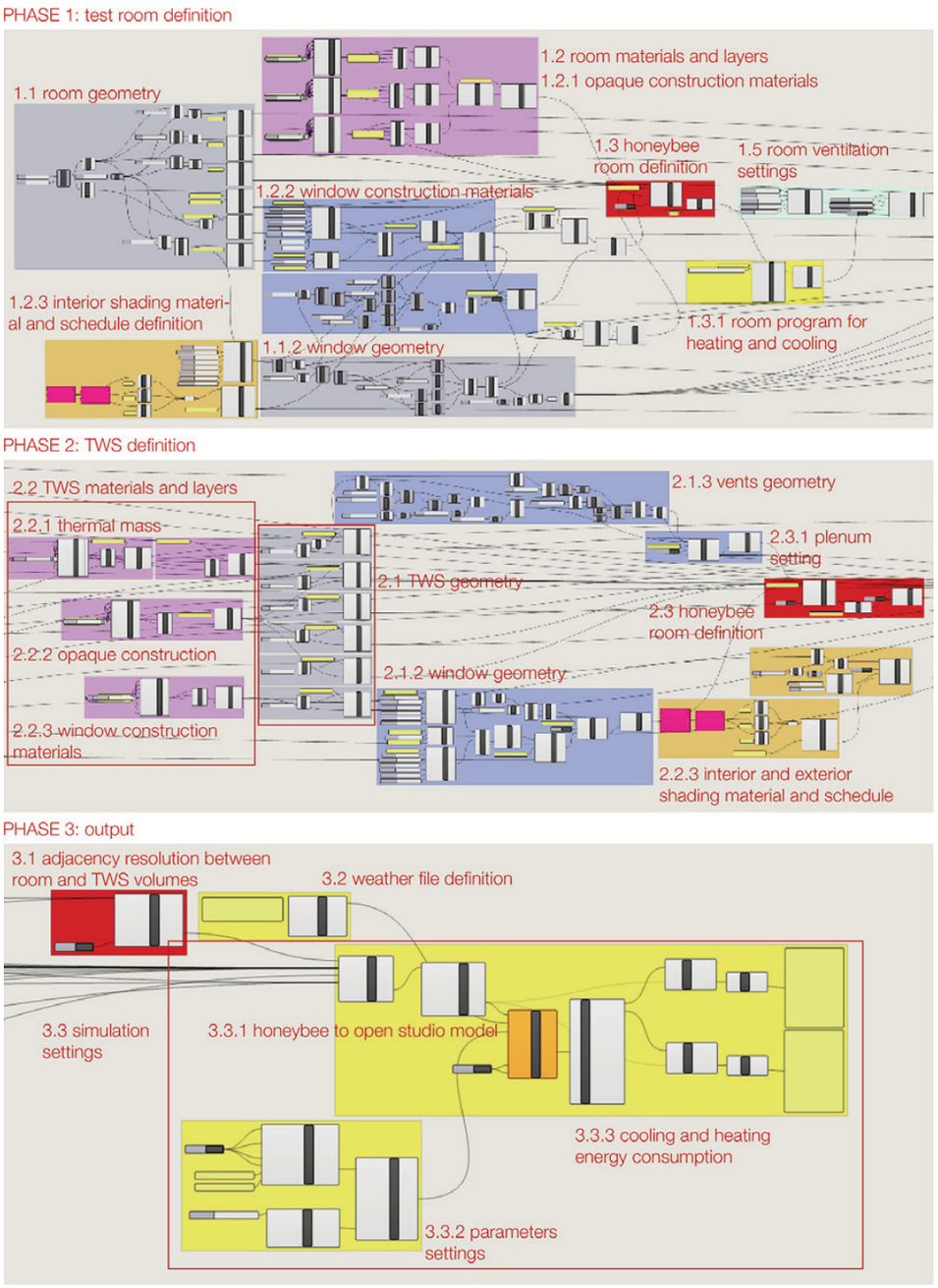


Fig. 9 | Grasshopper script used for room simulation: baseline model and TWS-integrated configuration (credit: the Authors, 2025).

The building sector represents one of the main contributors to global energy consumption and climate-altering emissions, accounting for 40% of final energy consumption in the European Union, 27% of which derives from non-residential buildings, and 36% of greenhouse gas emissions (IEA, 2023; European Parliament and Council of the European Union, 2024). These figures confirm the strategic role of the construction sector in the energy transition, which must never be regarded as separate from the broader objective of ecological and climate transition (Tucci, 2018). The European Union has, in fact, established binding targets to reduce net emissions by 55% by 2030 compared to 1990 levels (European Commission, 2021), aiming for climate neutrality by 2050 (European Parliament and Council of the European Union, 2021). At the same time, the IPCC identifies the building sector as a key field for mitigation, where interventions on the building envelope and energy systems are fundamental for decarbonisation and for limiting the rise in global temperature to within 1.5 °C (Cabeza et alii, 2023).

The demand for cooling in buildings is rapidly increasing and is expected to triple by 2050, driven by rising temperatures and socio-economic development (IEA, 2018). Air conditioning and ventilation systems account for about 20% of global electricity consumption in the building sector, absorbing approximately 2,100 TWh in 2022, confirming their position among the most energy-intensive and fast-growing end uses (Ritchie, 2024). This trend will raise cooling-related emissions to 6.1 billion t CO_{2eq} by 2050, corresponding to over 10% of total projected global emissions that year (UNEP, 2023).

At the same time, the share of energy consumption for heating must not be underestimated. Globally, almost half of total energy demand is absorbed by heating and domestic hot water production, with over 60% still supplied by fossil fuels.[1]

In Europe, the non-residential sector plays a significant role, accounting for 22% of total energy consumption (Volkova, 2024), including buildings with different uses and representing 30% of building floor area and 34% of final energy demand for heating (der Wieden et alii, 2023), with average values around 161 kWh/m² per year (Di Turi, Ronchetti and Sannino, 2023).

In Italy, the building stock comprises approximately 14 million buildings, of which about 1.7 million are non-residential, roughly 12% of the total (Caffari et alii, 2024). Within the tertiary sector alone, the data show an average annual consumption of around 197 kWh/m², with 130 kWh/m² attributed to thermal demand and 67 kWh/m² to electrical demand (Ministero della Transizione Ecologica, 2021).

Both European and national regulatory frameworks confirm the need for intervention on the existing building stock. At the supranational level, Directive (EU) 2024/1275 on the energy performance of buildings (European Parliament and Council of the European Union, 2024) introduced binding targets: starting in 2028, all new public buildings must be zero-emission, while from 2030, this requirement will extend to all new constructions. Alongside the European directives, international standards such as UNI EN ISO 13790:2008 and UNI EN ISO 15265: 2005 define methodologies for calculating energy consumption related to heating and cooling; UNI EN 16798-1:2019 specifies parameters concerning indoor air ventilation, air quality, thermo-hygrometric comfort, lighting, and acoustics; whereas Italian national legislation establishes climatic parameters, performance requirements, and transmittance limits for buildings (Ministro dello Sviluppo Economico, 2015).

In light of these premises, this paper aims to analyse the potential for integrating the Trombe Wall System (TWS) and the Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) to improve the energy efficiency of non-residential buildings in Mediterranean climates. The objective is to evaluate the thermal, energy, and environmental performance of these systems, highlighting their contribution to reducing consumption and emissions. The work is structured around: a review and systematisation, following UNI 8289:1981, of the main technological and material components, classified according to UNI 8290-1:1981+A122: 1983; simulation-based energy analyses to optimise both technologies; and a discussion of the results. This paper aims to provide a comparative evaluation methodology and simulation tools applicable to the scientific community and design professionals, fostering the integration and optimisation of systems for the energy transition of the built environment.

Research approach and objectives | Within this context lies the project for the new headquarters of the Rome Technopole, conceived as a pilot project within the broader urban regeneration operation of the Pietralata area, which is the subject of national-scale research funded by the PNRR 'Energy Transition and Digital Transition in Urban Regeneration and Construction'[2] (Rome Technopole, 2024). This pilot project, the result of advanced applied research, presents a zero-energy, zero-emission building that serves, on one hand, as an experimental example of the potential offered by the scientifically grounded integration, based on simulations and modelling of expected results, of innovative technologies with low carbon, ecological, and energy footprints, and on the other hand, as a best-practice model for the tertiary sector.

The significance of the research and its experimental and demonstrative design application lies in the synergistic integration of passive systems, which have always been used to control the microclimate and to address extreme climatic conditions through the replication of natural mechanisms (Buono, 1998; Tucci, 2009; Ferrucci and Peron, 2018; Grosjean et alii, 2025). This is consistent with the need to reduce consumption and emissions in order to counter climate change and decrease energy dependence (Simões, Manaia and Simões, 2021; Mo et alii, 2024).

Among passive bioclimatic systems, the Trombe Wall System (TWS) is capable of absorbing solar heat on the façade and gradually releasing it, proving highly effective during the winter period in Mediterranean climates thanks to the abundant solar availability, improving comfort and reducing emissions

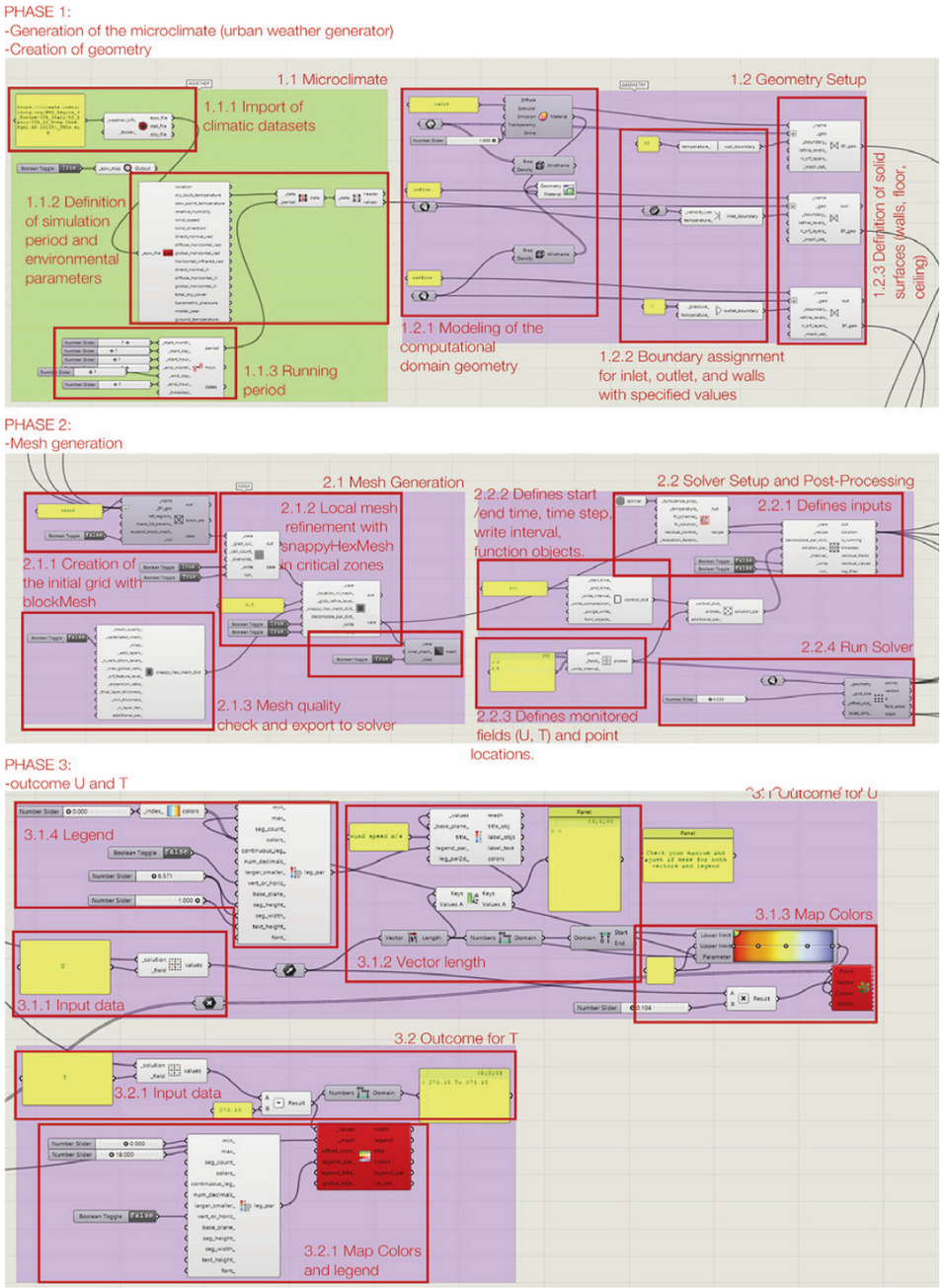


Fig. 10 | Grasshopper script for the TLVS simulation (credit: the Authors, 2025).

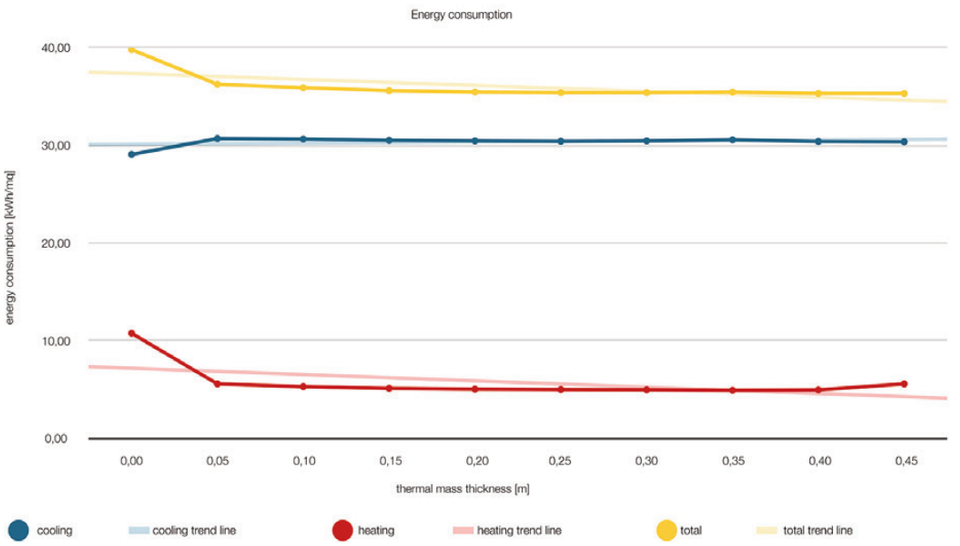


Fig. 11 | Annual energy consumption for heating, cooling and total: comparison between baseline model and TWS model with different thermal mass thicknesses (credit: the Authors, 2025).

(Simões, Manaia and Simões, 2021; Tucci, 2021; Briga-Sá et alii, 2021; Matos, Delgado and Guimarães, 2022; Hernandez-Perez et alii, 2025). Conversely, the Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) exploits the mass of underground concrete and the constant temperature of the soil to condition ventilation air, producing cooling effects in summer and heating in winter (Marmion et alii, 2012; Song, Song and Lim, 2014; Annan and Nehme, 2016; Rim, Sung and Kim, 2018; Tucci, 2020a; Mihalakakou et alii, 2022). The main objective is to demonstrate the validity and potential of adopting TWS and TLVS in non-residential buildings in Mediterranean climates, providing both a practical reference and guideline, oriented toward standardisation and large-scale dissemination of the two systems, and a theoretical framework, demonstrating their efficiency and establishing a method for their optimisation process through the use of energy simulations.

Contribution to the Sustainable Development Goals (SDGs) | The optimisation and validation of bioclimatic systems aim to encourage their widespread adoption, increase independence from traditional energy sources (SDG 7), and promote the use of low-impact technologies (SDG 13). Their large-scale diffusion would create innovative industrial sectors (SDG 9) and new employment opportunities (SDGs 2 and 8). However, these would require adequate incentive policies to mitigate potential drawbacks associated with initial costs, experimental phases, and investment needs (SDGs 1 and 10).

Specifically, the use of TWS and TLVS can improve thermo-hygrometric conditions and indoor air quality (SDG 3), as well as enhance resilience and mitigate urban heat islands (SDG 11). Moreover, it promotes equal access and professional inclusion in research and training programs through courses and seminars organised by the Rome Technopole Association (SDGs 4 and 5), fostering responsible production and consumption practices (SDG 12) and respect for terrestrial and marine ecosystems through the reduction of environmental pressures (SDGs 6, 14, and 15). Finally, the project is founded on networks of collaboration among research institutions, public bodies, and industry (SDGs 16 and 17), strengthening partnerships and governance for a fair and shared ecological transition.

Trombe Wall System: history, operation, and literature | The Trombe Wall System (TWS), patented by Morse in 1881 and first applied at Odeillo by Trombe and Michel in 1967, exploits the principles of the solar chimney effect and heat transfer through a process, based entirely on natural mechanisms, in which the incident solar radiation is first absorbed by the massive wall and stored thanks to its thermal capacity, and subsequently transferred indoors by means of convection and radiation. In winter, it functions as both a thermal storage system and an insulating barrier, while in summer, it limits thermal gains and contributes to cooling. The system configurations vary depending on climate and latitude (Hu et alii, 2017; Tucci, 2020b; Wang et alii, 2020; Elsaid et alii, 2023; Gu et alii, 2023; Sornek et alii, 2023; Xiao et alii, 2024).

Several studies have examined how individual components affect TWS performance under different climatic conditions. For instance, the type of glazing (Pourghorban and Asoodeh, 2022), with double glazing capable of reducing primary energy consumption by up to 40% (Sornek et alii, 2023), as well as the thickness and material of the thermal mass, the size and positioning of ventilation openings, and their management (Briga-Sá et alii, 2021). Beyond a certain threshold, increasing wall thickness yields no significant energy benefits. It is economically inefficient (Abbassi, Naili and Dehmani, 2022), while the adoption of shading systems helps reduce heat loss at night and limit overheating during the day (Briga-Sá et alii, 2017). Likewise, the ratio between TWS surface area and façade area is a decisive factor (A'zamovich, 2022).

The literature also investigates the interactions between components and optimal operational strategies, such as the relationship between vent openings and the thermal mass material (Asdaghi and Fayaz, 2023): reducing the cross-section of the openings mitigates indoor temperature fluctuations and increases the temperature differential with the outside (Laribi et alii, 2025). Among the main innovations in the system is the use of phase change materials, which make it possible to reduce the thickness and weight of the system, improve its energy performance, and enhance indoor comfort (Leang et alii, 2020; Samiev and Halimov, 2022; Elsaid et alii, 2023; Zhou et alii, 2024; Zhang et alii, 2025). The application of TWSs in multi-storey non-residential buildings, however, remains little explored (Gu et alii, 2023; Abdelsamea et alii, 2025). Among the various configurations, the composite TWS, characterised by single or double glazing, an air cavity, a thermal mass, and ventilation openings, is the most studied and widely adopted in Mediterranean climates (Briga-Sá et alii, 2021; Abbassi, Naili and Dehmani, 2022; Hernandez-Perez et alii, 2025).

Thermal Labyrinth Ventilation System: history, operation, and literature | Hypogeal cooling techniques represent one of the oldest forms of passive air-conditioning. Historical examples of this principle can be found in the Persian 'qanats'[3] (Montero-Gutiérrez et alii, 2025), comparable to those of modern thermal labyrinths, where hot air was channeled through underground tunnels ventilated by wind towers ('badghir' in Persian, 'barjeel' in Arabic; Hejazi and Hejazi, 2013), and subsequently directed toward dwellings after being cooled by contact with the moisture in the soil (Lechner, 2008; Ghandi and Leone, 2024). The vernacular dwellings of southern Italy, such as those in the Borgo della Corricella in Procida or the Historic Centre of Forio d'Ischia, demonstrate how the use of tuff stone, underground chambers, and air ducts carved into rock have, since ancient times and over the centuries, ensured comfortable indoor conditions even during the hottest months (Buono, 1998).

In these cases, cooling is not only the result of thermal mass but also of a broader urban strategy, in which the orientation of buildings and channelled ventilation play a key role in microclimate control (Bori, 2006). Givoni (1994), albeit with a pioneering approach, had already emphasised how underground buildings, by virtue of their morphological configuration and contact with the ground, could offer an effective response to summer heat, especially when combined with techniques such as night ventilation and indirect evaporative cooling.

Modern devices such as thermal labyrinths and earth-air heat exchangers are direct evolutions of these ancient solutions, adopting the same operational principles but with greater attention to material selection and construction requirements. Numerous recent studies demonstrate that these systems can reduce indoor air temperature by 6-8 °C relative to the outside, significantly improving building energy ef-

ficiency (Marmion et alii, 2012; Song, Song and Lim, 2014; Annan and Nehme, 2016; Xiong et alii, 2019).

The originality of this research lies in the development of an integrated method of analysis and simulation to systematise and evaluate the components of the reference bioclimatic systems. The proposed algorithm enables modelling and comparing the thermo-energy performance of TWS and TLVS under Mediterranean climatic conditions, which remain underexplored, while defining adaptability criteria for multi-storey non-residential buildings. The results provide new evidence in support of applied research and the design of passive, low-environmental-impact solutions.

Methodology and research phases | The study develops a catalogue of components for the implementation of TWS and TLVS systems, together with an evaluation method to compare the options available on the market, and a workflow for parametric modelling and energy simulations, aimed at identifying the optimal configurations of the two systems in an integrated application. The developed methodology is articulated into six structured phases, as described below.

Phase 1 – Theoretical and Contextual Analysis. This phase involved a review of scientific literature, experiments, and case studies to specify the climate type according to the Köppen-Geiger classification[4], which includes two systems, to understand their origins, evolution, construction, and performance characteristics. The main technological components were identified, which later became the subject of subsequent comparative analyses, together with the relevant climatic parameters, focusing on the Mediterranean climate. The study shows that TWS is most advantageous between 55° and 40° latitude, although performance depends on solar radiation and cloud cover (Kostikov, Grinkrug and Yiqiang, 2020; Lichołai et alii, 2021; Lohmann and Santos, 2020; Hernandez-Perez et alii, 2025), whereas for TLVS, soil temperature and humidity are key factors. Other variables, such as maximum external temperature and wind speed, influence both systems, with particular relevance for TLVS in natural or hybrid ventilation systems.

Phase 2 – Market Research. This phase focused on identifying products that align with the main technological and material components, and assessing their availability, performance, scalability, and market potential. For the TWS, the study considered shading systems, window frames and types of glazing, PCM panels, concrete blocks for the thermal mass, and ventilation openings. For the TLVS, the cataloguing included air intake towers, thermal mass elements, form matrices, air filtration systems, and radon barriers.

Phase 3 – Construction of Thematic Databases. The collected data were organised into two Excel databases, one for each system, and an initial filter was applied based on production-site distance to minimise transport-related impacts. In accordance with UNI 8289:1981, several classes of requirements relevant to the study were selected: Safety (S), Reliability (R), Well-being (W), Appearance (A), Usability (U), Management (Mg), and Environmental Protection (Ep). Each class includes a set of requirements defined by UNI 8290-1:1981+ A122:1983 (Fig. 1).

Phase 4 – Multi-Criteria Analysis. The classes and requirements were translated into evaluation criteria and parameters, rated on a 0-5 scale based on

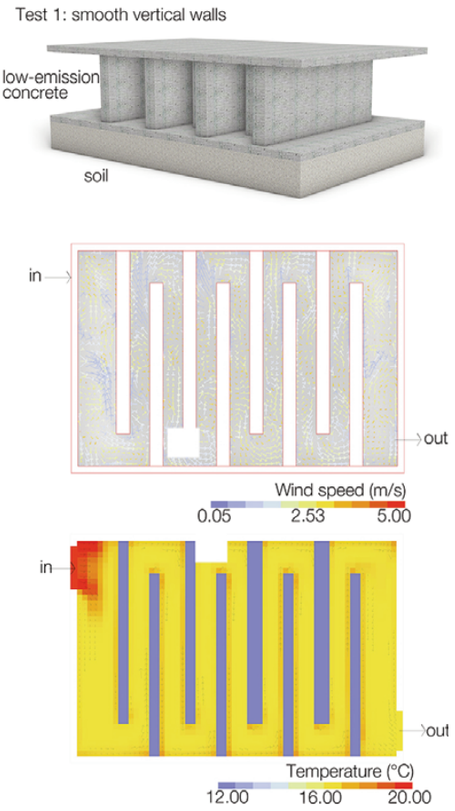


Fig. 12 | Case 1: configuration with smooth vertical low-emission concrete walls; distribution of wind speed (m/s) and temperature (°C) along the ventilation path (credit: the Authors, 2025).

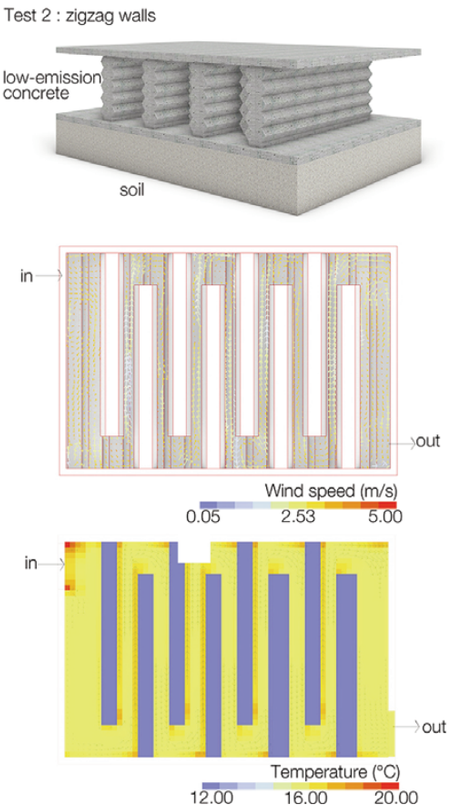


Fig. 13 | Case 2: configuration with zigzag vertical low-emission concrete walls; distribution of wind speed (m/s) and temperature (°C) along the ventilation path (credit: the Authors, 2025).

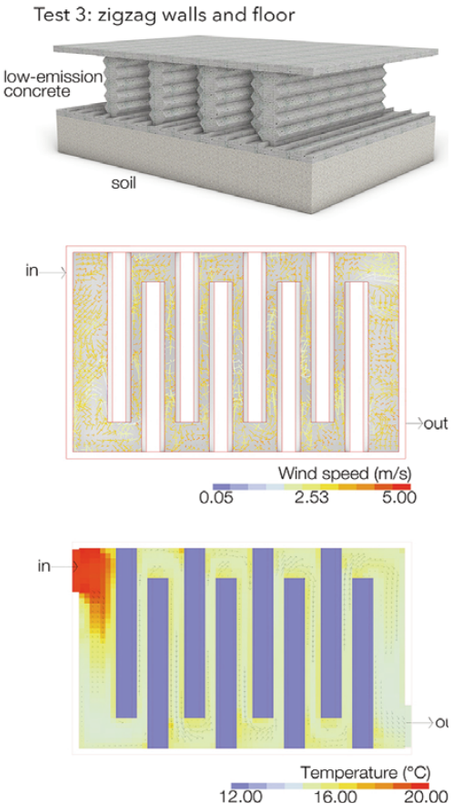


Fig. 14 | Case 3: configuration with zigzag walls and floor in low-emission concrete; distribution of wind speed (m/s) and temperature (°C) along the ventilation path (credit: the Authors, 2025).

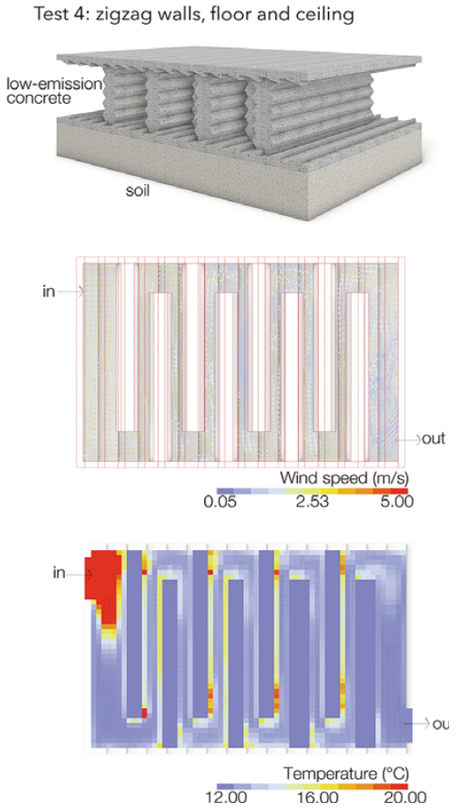


Fig. 15 | Case 4: configuration with zigzag walls, floor and ceiling in low-emission concrete; distribution of wind speed (m/s) and temperature (°C) along the ventilation path (credit: the Authors, 2025).

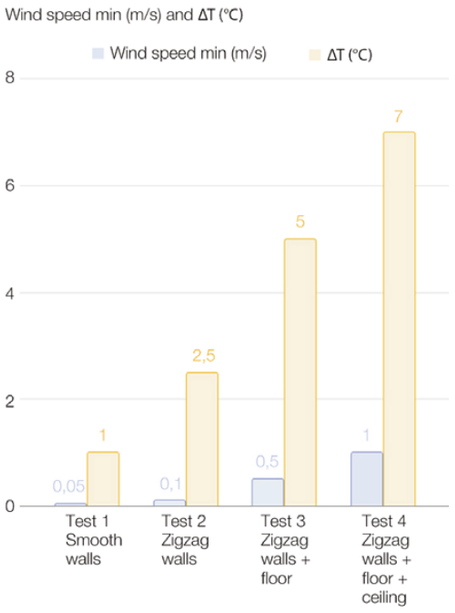


Fig. 16 | Influence of TLVS geometry on wind speed, m/s, and temperature reduction, ΔT (credit: the Authors, 2025).

their effectiveness for product and system performance. For each product, qualitative assessment sheets were prepared to compare the alternatives and identify the components most suitable for integrating the systems into the Rome Technopole pilot project.

Phase 5 – Energy Simulations. This phase analysed specific factors identified in the previous stages, using a parametric model developed in Grasshopper and simulated with Ladybug Tools[5] (Honeybee and Butterfly) together with the EnergyPlus, OpenStudio (OS), and OpenFOAM engines. For the TWS, the parameters considered were the thickness of the air cavity between the glazing and the massive wall, the thickness of the thermal mass, the position and operation of shading devices, and the size and configuration of ventilation openings. For the TLVS, the analyses focused on the thickness and shape of the thermal mass, the distance between the walls, and the velocity of the incoming air flow.

Phase 6 – Determination of Optimal Configurations. The results enabled the identification of the most effective solutions for applying both systems to the Rome Technopole pilot project.

TWS and TLVS: case studies and international best practices | Six international best practices were selected from a broader collection, and this paper reports those realised in climates comparable to the reference context, in order to understand possible methods of adoption and integration of the systems. These are non-residential multi-storey projects or buildings characterised by large interior spaces and the potential for façade or underground integration, with characteristics similar to those of the Rome Technopole building, where the systems analysed in this study will be integrated. The TWS can be configured in different ways, all of which share its components' modularity, suggesting the potential for system standardisation.

The Blue Ridge Parkway Destination Centre (Asheville, NC, 2008; Cfa[6]) features a system of 13 massive solar walls facing south, with a distinctive sawtooth configuration that alternates between storage walls and light inlets. Its performance was analysed through a Computational Fluid Dynamics (CFD) model, providing a valuable reference for simulation-based validation (Fig. 2). The Oregon Health and Science University Centre for Health and Healing (Portland, OR, 2006; Csb[7]) is a multi-storey building employing a two-level system with double glazing and recirculation systems as part of a hybrid strategy for preheating water and air, a dual functionality that could also be explored in the Rome Technopole context (Fig. 3). Lastly, the Recreation and Wellness Center (Hayward, CA, 2011; Csb) uses a ventilated system with an extensive concrete thermal mass characterising its west-facing façade, ensuring stable and comfortable temperatures within large interior spaces (Fig. 4).

In the TLVS case studies, the adopted methodology combines a critical literature review with a comparative analysis of thermo-energy performance to assess transferability and versatility across different architectural and climatic contexts.

At the Great Hall of Kent College (Canterbury, UK, 2019; Cfb[8]), the TLVS comprises five underground concrete chambers, a simple, low-maintenance construction solution that ensures natural ventilation and thermal stability, supporting high-occupancy comfort. However, its performance can be affected by soil humidity and low thermal amplitude (Fig. 5).

In the Ewha Womans University Campus Complex (Seoul, South Korea, 2008; Dwa[9]), the system takes the form of a vertical labyrinth excavated into the ground, capable of reducing summer air temperature by up to 7 °C and preheating winter air by 10 °C. Its urban scale and landscape integration make it an emblematic reference for complex projects, comparable in concept to the Rome Technopole in the Pietralata area (Fig. 6). Its strength lies in the ability to regulate the microclimate and maintain high comfort levels with low energy consumption, while its main challenges concern construction complexity and maintenance costs associated with its large scale. At the Big Data Institute (Oxford, UK, 2017; Cfb), a technologically advanced version of the system is implemented, integrating a 600 m² labyrinth with cogeneration and photovoltaic systems. Computational fluid dynamics (CFD) simulations optimised airflow and thermal balance, demonstrating, on the one hand, that combining passive and active strategies requires a high level of control and management, and, on the other, that TLVS can also be applied to research and office buildings in technologically innovative contexts (Fig. 7).

Overall, these examples show how the TLVS can be developed as a natural and architectural device in buildings with a strong landscape component, through underground and contextual integration, and as a technologically advanced component when combined with other passive strategies, high-efficiency systems, and optimised CFD simulations.

Components and products: a catalogue for the implementation of TWS and TLVS | The first phase of the methodology enabled the identification of the main technological and material components of the TWS and TLVS, united by the type of thermal mass, which was analysed comparatively following in phases 2, 3, and 4 of the research.

For prefabricated concrete blocks, dimensional and physical data were collected, such as thickness, height, length, unit weight, and thermal conductivity, ranging approximately from 1.6 to 2.0 W/(m²K), as well as transmittance values varying with thickness, a density of about 2,400 kg/m³, and a specific heat capacity of approximately 850 J/K·kg. Additional data concerned functional and durability performance, including compressive strength, fire resistance, frost and chemical resistance, dimensional stability, service life, water tightness, and air permeability. Parameters related to comfort and environmental quality were also considered, including thermal and acoustic insulation, hygrometric behaviour, harmful emissions, and the ability to support ventilation and indoor well-being. The assessment extended to aesthetic and management aspects, including surface regularity, equipment adaptability, and maintainability, as well as to the impact on overall energy consumption.

The data collected from technical data sheets and standards were organised into a comparative matrix, providing a coherent overview of performance. Each parameter was assigned a score from 0 (data absent) to 5 (optimal value), and the scores were summed to yield a qualitative evaluation based on quantitative data, both for individual requirements classes and overall.

Parameterisation and optimisation: ideal configurations for the application of the two systems | To further investigate the role of thermal mass, parametric energy simulations were carried out, as defined in phases 5 and 6 of the methodology, by progressively varying thickness and configuration in order to evaluate their impact on the performance of TWS and TLVS.

For the former, using the Grasshopper programming plugin, two parametric geometric models were developed: a baseline room (4 × 5 × 3 metres) and an identical room equipped with a TWS (Fig. 8). Both models feature a south-facing wall with a 1 × 2-metre window, double clear glazing, aluminium thermal-break frames, and an external roller shading system. In the second model, the TWS, also 1 × 2 metres, was added, consisting of low-emissivity double glazing (4-16-4 mm) filled with argon gas, an absorber made of a metal plate with high thermal conductivity, an air cavity of 15 cm, and a concrete mass varying from 5 to 45 cm. The wall includes four ventilation openings, two at the bottom and two at the top (35 × 10 cm), regulated by season and the day-night cycle, along with a dual shading system (both internal and external) adjusted by season.

The use of a parametric model was essential for varying the dimensions and properties of the components. The parameters required for energy simulation were assigned using the Honeybee (HB) component of the Ladybug Tools package. Opaque and transparent materials were associated via the 'HB construction material' component and applied to the corresponding layers. The two zones, the 'room' and the 'TWS', were made to communicate through 'HB solve adjacency'. Specifically, the 'room' was assigned the 'small office' program. At the same time, the TWS was treated as a plenum, i.e., an environment without thermal or electrical loads, serving only to exchange heat accumulated from the exterior with the interior of the 'room'. Both 'rooms' were then linked to the HB model, which, after conversion to OpenStudio Model (OSM) format, was assigned the simulation parameters.

The objective was to investigate the influence of thermal mass thickness on TWS performance by

comparing specific energy consumption (kWh/m²) for heating, cooling, and total energy demand on a monthly and annual basis. The results were compiled into an Excel sheet to produce a synoptic representation. Geometric properties were managed in Grasshopper, thermo-physical properties in Honeybee, and climatic conditions in Ladybug using an EPW file from the Rome Urbe Station. The model was linked to EnergyPlus and OpenStudio, from which the monthly data required for the analysis were extracted (Fig. 9). For the CFD modelling of the TLVS, a reference geometry was developed in Rhinoceros (Rhino) software, with overall dimensions of 10 × 15 × 3 metres, and later implemented in the Butterfly plugin, integrated with Grasshopper and based on the OpenFOAM computational engine. The simulation process was structured into four fundamental phases: Definition of Geometry and Boundary Conditions, Mesh Generation, Solver Setup and Run and Post-Processing (Fig. 10).

This procedure was applied to four different geometric variants of the system, designed to evaluate the influence of internal surface configuration on the fluid dynamic results: the first with smooth walls, the second with vertical zigzag walls, the third extending the same zigzag geometry to the floor, and the fourth with a completely irregular configuration where the zigzag pattern affects walls, floor, and ceiling. The decision to simulate multiple configurations was inspired by Rim's research, which found that embossed floor surfaces produced significant thermal variations (Rim, Sung and Kim, 2018).

In phase one, uniform boundary conditions were established: the walls were maintained at a constant temperature of 14 °C, a value chosen as representative of the average soil temperature at a certain depth, while the incoming air was characterised by a velocity of 0.3 m/s and a temperature of 20 °C, consistent with typical natural ventilation scenarios. This initial setup provided a coherent reference framework for evaluating the thermofluid dynamic behaviour of the system, ensuring comparability among the analysed geometric variants.

Subsequently, during phase two, the computational grid was constructed, an essential element for the correct discretisation of the computational domain. The mesh was first generated using the blockMesh command to define a regular, organised base structure, and then refined in critical zones using snappyHexMesh to ensure accurate representation of velocity and temperature gradients near solid surfaces.

In phase three, the use of the buoyantSimpleFoam solver made it possible to estimate variations in air velocity (m/s) and temperature differentials (ΔT) through the use of 'probes' positioned at the inlet and outlet sections. The numerical parameters, such as convergence criteria, maximum number of iterations, and residual tolerances, were calibrated to ensure computational stability and reproducibility of results.

Finally, in phase four, the velocity and temperature fields were analysed in detail, extracted through virtual probes (single points or sets of points within the computational domain) placed at the initial and final sections of the labyrinth, to calculate the average air velocity (m/s) and determine temperature differentials (ΔT). The data analysis highlighted spatial variations in fluid-dynamic parameters, providing valuable insights into the efficiency of the studied geometric configurations and the TLVS's actual capability to contribute to passive cooling and stabilise the indoor microclimate.

Results | The simulations highlight the significant influence of thermal mass thickness on overall energy requirements. The adoption of TWS leads to a marked reduction in heating consumption, approximately 50% compared to the baseline scenario. The best performance is observed with a 20 cm thick thermal mass, while beyond 25 cm, an inverse trend appears, with a gradual increase in energy demand. For cooling, there is a slight increase in consumption compared to the baseline, which is negligible relative to the overall benefit achieved. Considering the annual energy balance, the values range from 40 to 35 kWh/m², with a maximum variation of 20% relative to the initial condition (Fig. 11). Overall, a 20 cm thickness emerges as the optimal configuration within the climatic and operating conditions considered.

The CFD analysis of the four TLVS configurations revealed the decisive influence of geometry on the distribution of fluid dynamic and thermal fields. With smooth walls (Test 1; Fig. 12), the airflow remains uniform, with moderate velocities (0.05-2.5 m/s) and limited cooling, corresponding to ΔT ≈ -1/-2 °C. The introduction of zigzag-shaped walls (Test 2; Fig. 13) increases turbulence and promotes stronger thermal gradients, with local air velocities up to 5 m/s and a temperature reduction of about -3/-4 °C.

Extending the embossed geometry to the floor (Test 3; Fig. 14) further enhances air mixing, producing broad regions with velocities between 2.5 and 5 m/s and an average ΔT between -4 and -8 °C. Finally, the complete configuration with zigzag walls, floor, and ceiling (Test 4; Fig. 15) proved the most effective, achieving stable internal ventilation of 4-5 m/s and a temperature reduction of up to -6/-8 °C. Overall, the increase in geometric complexity results in improved air mixing and a significant decrease in outlet air temperature (Fig. 16).

Conclusions | The research confirmed the effectiveness of the integrated architectural application of the Trombe Wall System (TWS) and the Thermal Labyrinth Ventilation System (TLVS) as complementary bioclimatic strategies for the Mediterranean climate. In the first phase, beyond validating the usefulness and potential of applying the two systems, the study defined the main technological and material components for their implementation within the reference climatic context. This selection proved essential for the subsequent setup and market analysis (Phase 2) and for the product evaluation conducted in accordance with the UNI 8289:1981 framework (Phase 3). The selected products were then evaluated and classified by assigning partial and total scores (Phase 4) using a weighted multi-criteria analysis. The parametric simulations (Phase 5) highlighted the influence of specific thermal-mass factors on the performance of both systems: thickness for the TWS and geometry for the TLVS.

For the TWS, a thickness of 15-20 cm is optimal, reducing heating demand by up to 50% while maintaining low cooling loads. Beyond this threshold, performance tends to decrease, making the use of additional material unnecessary. For the TLVS, CFD analysis showed that geometry strongly influences airflow distribution and thermal gradients. Smooth walls provide only limited cooling (ΔT ≈ -1/-2 °C), while zigzag configurations progressively improve ventilation and heat exchange. The most complex model, with corrugated walls, floor, and ceiling, achieved stable air velocities of 4-5 m/s and temperature reductions of -6 to -8 °C, demonstrating the potential of surface roughness to enhance convective phenomena and heat transfer.

Overall, the results demonstrate that the two systems, when integrated, offer synergistic benefits: the TWS ensures winter efficiency, while the TLVS provides summer cooling and airflow regulation. Together, they contribute to energy savings and environmental comfort, offering a replicable design methodology aimed at resilient, low-impact buildings. These findings establish a solid foundation for the future application of integrated passive bioclimatic solutions in architectural projects targeting high resilience and climate-mitigation capacity, as in the Rome Technopole pilot project, and outline operational guidelines that combine historical knowledge with advanced simulation tools.

The dissemination of this approach, however, faces several barriers documented in the literature. Among cultural barriers, the lack of awareness of benefits and the limited availability of technical information hinder the adoption of bioclimatic solutions (Furszyfer Del Rio, Sovacool and Griffiths, 2021; Obuseh et alii, 2025). Economic and social barriers arise from high initial costs, lack of incentives, and unequal access, which confine their use mainly to experimental contexts (Vassiliades et alii, 2023). Finally, the absence of rigorous legislation, limited funding and investment for promoting low-carbon solutions, and policy and regulatory gaps further constrain the systematic adoption of bioclimatic technologies (United Nations Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction, 2025; Balali and Yunusa-Kaltungo, 2025).

Future developments of this study could include validating the results by simultaneously applying the two systems to a single simulation model of the entire Rome Technopole building to obtain project-specific data. It should also be noted that the market analysis was conducted only on a national scale, and thus within a limited geographic scope relative to the reference climate. Similarly, the energy simulations considered only a subset of parameters, whereas the whole range could be analysed for system optimisation. The results obtained could therefore be integrated with further simulation activities to examine the impact of additional variables identified in Phase 5 of the methodology.

Acknowledgements

The research is part of the PNRR Rome Technopole National Project, Flagship Project 2 'Energy transition and digital transition in urban regeneration and construction', for which Prof. F. Tucci ('Sapienza' University of Rome) is Scientific Supervisor, with particular reference to Thematic Line 1, dedicated to the effects of technological, bioclimatic and energy innovation factors in environmental design on architectural redevelopment and urban regeneration processes.

Notes

1) For further information, see the webpage: iea.org/energy-system/buildings/heating [Accessed 12 September 2025].

2) The research is part of the National PNRR Flagship Project 2 – 'Energy transition and digital transition in urban regeneration and construction'; Scientific Supervisor Prof. Fabrizio Tucci ('Sapienza' University of Rome).

3) Originating and developed in ancient Persia, the qanat is a system of water transport mainly through underground channels, designed explicitly for arid climates; the word itself meant initially 'channel'.

4) Wladimir Köppen was a well-known geographer, botanist, and climatologist. Born in Russia, he spent most of his life in Germany, between 1846 and 1940. The first version of his classification method dates back to 1884, but the final version was developed in 1936 in collaboration with climatologist Rudolf Geiger, with a last revision published in 1961.

5) For additional information, visit the webpage: Ladybug. tools [Accessed 12 September 2025].

6) Cfa – Humid temperate climate with hot summer.

7) Csb – Warm temperate climate with hot, dry summers and mild, rainy winters.

8) Cfb – Temperate oceanic climate or subtropical highland climate.

9) Dwa – Humid continental monsoon-influenced climate with hot summers.

References

A'zamovich, S. K. (2022), "Determination of Rational Values of the Parameters of an Unventilated Trombe Wall Using the Method of Multicriteria Optimization for the Climatic Conditions of Uzbekistan", in *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, vol. 13, issue 3, pp. 123-134. [Online] Available at: doi.org/10.30880/ijscet.2022.13.03.012 [Accessed 12 September 2025].

Abbassi, F., Naili, N. and Dehmani, L. (2022), "Optimum Trombe wall thickness in the Mediterranean Tunisian context – An energetic and economic study", in *Energy Science and Engineering*, vol. 10, issue 8, pp. 2930-2939. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ese3.1179 [Accessed 12 September 2025].

Abdelsamea, A., Hassan, H., Shokry, H., Asawa, T. and Mahmoud, H. (2025), "An Innovative Multi-Story Trombe Wall as a Passive Cooling and Heating Technique in Hot Climate Regions – A Simulation-Optimization Study", in *Buildings*, vol. 15, issue 7, article 1550, pp. 1-36. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15071150 [Accessed 12 September 2025].

Annan, G. R. and Nehme, B. A. (2016), "Energy Efficient Building Design Optimization Using an Underground Thermal Labyrinth", in *Second International ASHRAE Conference – Efficient Building Design – Materials and HVAC Equipment Technologies, Maamari Auditorium, American University of Beirut, Liban, September 22-23, 2016*, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, New York, pp. 162-167. [Online] Available at: store.accuristech.com/standards/energy-efficient-building-design-optimization-using-an-underground-thermal-labyrinth?product_id=1929536&srsltid=AfmBOopezUylZOL2jD_H2cB1fHTkrj6pu7DjmrSSxhIMe4LUuKN5j3az#full [Accessed 12 September 2025].

Asdaghi, H. and Fayaz, R. (2023), "Optimal Specifications of a Trombe Wall in Low-Rise Residential Buildings of Mashhad", in *Applied Solar Energy*, vol. 59, issue 4, pp. 542-556. [Online] Available at: doi.org/10.3103/S0003701X2260117X [Accessed 12 September 2025].

Balali, A. and Yunusa-Kaltungo, A. (2025), "Drivers and barriers to the adoption of passive energy design in buildings", in *Energy and Buildings*, vol. 328, article 115148, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115148 [Accessed 17 October 2025].

Bori, D. (2006), *Il Raffrescamento Passivo degli Edifici – Tecniche, Tecnologie, Esempi – Cenni di Termofisica Applicata*, Sistemi Editoriali, Napoli.

Briga Sá, A., Boaventura-Cunha, J., Lanzinha, J.-C. and Paiva, A. (2017), "An experimental analysis of the Trombe wall temperature fluctuations for high range climate conditions – Influence of ventilation openings and shading devices", in *Energy and Buildings*, vol. 138, pp. 546-558. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.085 [Accessed 12 September 2025].

Briga-Sá, A., Paiva, A., Lanzinha, J.-C., Boaventura-Cunha, J. and Fernandes, L. (2021), "Influence of air vents management on Trombe Wall temperature fluctuations – An experimental analysis under real climate conditions", in *Energies*, vol. 14, issue 16, article 5043, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en14165043 [Accessed 12 September 2025].

Buono, M. (1998), *L'architettura del vento – Soluzioni tecnologiche per il raffrescamento passivo*, CLEAN Edizioni, Napoli.

Cabeza, L. F., Bai, Q., Bertoldi, P., Kihila, J. M., Lucena, A. F. P., Mata, E., Mirasgedis, S., Novikova, A. and Saheb, A. (2023), "Buildings", in IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2022 – Mitigation of Climate Change – Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, pp. 953-1048. [Online] Available at: doi.org/10.1017/9781009157926.011 [Accessed 12 September 2025].

Caffari, F., Calabrese, N., Murano, G. and Signoretti, P. (eds) (2024), *La consistenza del parco immobiliare nazionale*, ENEA, Roma. [Online] Available at: pubblicazioni.enea.it/download.html?task=download.send&id=698:la-consistenza-del-parco-immobiliare-nazionale&catid=3 [Accessed 12 September 2025].

der Wieden, M. B., Braungardt, S., Hoerner, M. and Bischof, J. (2023), *Minimum Energy Performance Standards for Non-Residential Buildings – EU requirements and national implementation*. [Online] Available at: iwu.de/fileadmin/publikationen/news/2023_IWU_EtAl_Hoerner-EtAl_MEPS-for-NRB.pdf [Accessed 12 September 2025].

Di Turi, S., Ronchetti, L. and Sannino, R. (2023), "Towards the objective of Net ZEB – Detailed energy analysis and cost assessment for new office buildings in Italy", in *Energy and Buildings*, vol. 279, article 112707, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112707 [Accessed 12 September 2025].

Elsaid, A. M., Hashem, F. A., Mohamed, H. A. and Ahmed, M. S. (2023), "The energy savings achieved by various Trombe solar wall enhancement techniques for heating and cooling applications – A detailed review", in *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 254, article 112228, pp. 1-50. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112228 [Accessed 12 September 2025].

European Commission (2021), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Fit for 55 – Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality*, document 52021DC0550, COM/2021/550 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0550 [Accessed 16 September 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2024), *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast)*, document 32024L1275, PE/102/2023/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/eng [Accessed 12 September 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2021), *Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law')*, document 32021R1119, PE/27/2021/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32021R1119 [Accessed 12 September 2025].

Ferrucci, M. and Peron, F. (2018), "Ancient Use of Natural Geothermal Resources – Analysis of Natural Cooling of 16th Century Villas in Costozza (Italy) as a Reference for Modern Buildings", in *Sustainability*, vol. 10, issue 12, article 4340, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su10124340 [Accessed 12 September 2025].

Furszyfer Del Rio, D. F., Sovacool, B. K. and Griffiths, S. (2021), "Culture, energy and climate sustainability: the adoption of smart home technologies", in *Energy Research & Social Science*, vol. 2, article 100035, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100035 [Accessed 17 October 2025].

Ghandi, H. and Leone, M. F. (2024), "The Potential of One-Sided Traditional Windcatchers for Outdoor Use as a Sustainable Urban Feature", in *Urban Science*, vol. 8, issue 4, article 229, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/urbansci8040229 [Accessed 12 September 2025].

Givoni, B. (1994), *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*, John Wiley and Sons, Toronto.

Grosjean, A., Touati, K., Alonzo, G., Ravat, H. C., Houot, T., El Mendili, Y., Nougarèdes, B. and Camara, N. (2025), "Experimental Raw Earth Building for Passive Cooling – A Case Study for Agricultural Application in a Mediterranean Climate", in *Buildings*, vol. 15, issue 15, article 2603, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15152603 [Accessed 12 September 2025].

Gu, W., Li, G., Xiermaimaiti, A. and Ma, T. (2023), "A review of recent techniques in performance augmentation and evaluation metrics of Trombe walls", in *Energy and Buildings*, vol. 301, article 113693, pp. 1-34. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113693 [Accessed 12 September 2025].

Hejazi, M. and Hejazi, B. (2013), "Cooling performance of Persian wind towers", in Brebbia, C. A. (ed.), *Eco-Architecture IV – Harmonisation between Architecture and Nature – ERES 2025 – 14th International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures, Edinburgh, United Kingdom, June 11-13, 2025*, WIT Transaction on Ecology and the Environment, vol. 165, WIT Press, Southampton (UK), pp. 197-207. [Online] Available at: doi.org/10.2495/ARC120181 [Accessed 12 September 2025].

Hernandez-Perez, I., Rodriguez-Ake, A., Sauceda-Carvajal, D., Hernandez-Lopez, I., Kumar, B. and Zavala-Guillen, I. (2025), "Experimental Thermal Assessment of a Trombe Wall Under a Semi-Arid Mediterranean Climate of Mexico", in *Energies*, vol. 18, issue 1, article 185, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en18010185 [Accessed 12 September 2025].

Hu, Z., He, W., Ji, J. and Zhang, S. (2017), "A review on the application of Trombe wall system in buildings", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, pp. 976-987. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.003 [Accessed 12 September 2025].

IEA – International Energy Agency (2023), *Italy 2023 – Energy Policy Review*, IEA, Paris. [Online] Available at: iea.blob.core.windows.net/assets/71b328b3-3e5b-4c04-8a22-3ead575b3a9a/Italy_2023_EnergyPolicyReview.pdf [Accessed 12 September 2025].

IEA – International Energy Agency (2018), *The Future of Cooling – Opportunities for energy-efficient air conditioning*, IEA, Paris. [Online] Available at: iea.blob.core.windows.net/assets/0bb45525-277f-4c9c-8d0c-9c0cb5e7d525/The_Future_of_Cooling.pdf [Accessed 12 September 2025].

Kostikov, S., Grinkrug, M. and Yiqiang, J. (2020), "Comparative technical and economic analysis of the Trombe wall use in the heat supply system at different climatic conditions", in *Journal of Physics | Conference Series*, vol. 1614, article 012064, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1742-6596/1614/1/012064 [Accessed 12 September 2025].

Laribi, A., Bégot, S., Surdyk, D., Ait-Oumeziane, Y., Lepiller, V., Désévaux, P., El Zein, N. and De Carvalho, A. R. (2025), "Experimental study of the influence of the vents on the thermal performance of a Trombe wall", in *Energy and Buildings*, vol. 328, article 115176, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.

org/10.1016/j.enbuild.2024.115176 [Accessed 12 September 2025].

Leang, E., Tittelein, P., Zalewski, L. and Lassue, S. (2020), "Impact of a composite Trombe wall incorporating phase change materials on the thermal behavior of an individual house with low energy consumption", in *Energies*, vol. 13, issue 18, article 4872, pp. 1-32. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en13184872 [Accessed 12 September 2025].

Lechner, N. (2008), *Heating, Cooling, Lighting – Sustainable Design Methods for Architects*, John Wiley & Sons, New Jersey.

Lichołai, L., Starakiewicz, A., Krasoń, J. and Miąsik, P. (2021), "The influence of glazing on the functioning of a Trombe wall containing a phase change material", in *Energies*, vol. 14, issue 17, article 5243, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en14175243 [Accessed 12 September 2025].

Lohmann, V. and Santos, P. (2020), "Trombe Wall Thermal Behavior and Energy Efficiency of a Light Steel Frame Compartment – Experimental and Numerical Assessments", in *Energies*, vol. 13, issue 11, article 2744, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en13112744 [Accessed 12 September 2025].

Marmion, P., Pradinuk, R., Woods, A., Guity, A. and Rehmanji, I. (2012), "Large Dynamic Thermal Labyrinth – A Step Towards Net Zero Energy Use in Acute Care Hospitals", in *2012 ACEEE | The 17th Biennial ACEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings – Fueling Our Future with Efficiency*, American Council for an Energy-Efficient Economy, Pacific Grove (CA), vol. 13, pp. 215-226. [Online] Available at: aceee.org/files/proceedings/2012/data/papers/0193-000399.pdf [Accessed 12 September 2025].

Matos, A. M., Delgado, J. M. P. Q. and Guimarães, A. S. (2022), "Energy-Efficiency Passive Strategies for Mediterranean Climate – An Overview", in *Energies*, vol. 15, issue 7, article 2572, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en15072572 [Accessed 12 September 2025].

Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadaki, M., Halkos, G., Paravantis, J., Makridis, S. and Papaefthimiou, S. (2022), "Applications of earth-to-air heat exchangers – A holistic review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 155, article 111921, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2021.111921 [Accessed 12 September 2025].

Ministero della Transizione Ecologica (2021), *Strategia per la Riqualificazione Energetica del Parco Immobiliare Nazionale*. [Online] Available at: circabc.europa.eu/ui/group/8f5f9424-a7ef-4dbf-b914-1af1d12ff5d2/library/aa97dcc4-bb5d-423b-b3c7-40ff6d77133b/details [Accessed 12 September 2025].

Ministro dello Sviluppo Economico (2015), *Decreto interministeriale 26 giugno 2015 – Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici – Requisiti specifici per gli edifici esistenti soggetti a riqualificazione energetica – Appendice B (Allegato 1, Capitolo 4)*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/normativa/DM_requisiti_minimi_appendiceB.pdf [Accessed 12 September 2025].

Mo, W., Zhang, G., Yao, X., Li, Q. and Debacker, B. J. (2024), "Assessment of Passive Solar Heating Systems' Energy-Saving Potential across Varied Climatic Conditions – The Development of the Passive Solar Heating Indicator (PSHI)", in *Buildings*, vol. 14, issue 5, article 1364, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14051364 [Accessed 12 September 2025].

Montero-Gutiérrez, P., Sánchez Ramos, J., Castro Medina, D., Palomo Amores, T., Guerrero Delgado, M. C. and Álvarez Domínguez, S. (2025), "Exploring a new approach to ancient Qanat techniques using earth-air and water-air heat exchangers for efficient natural cooling", in *Energy Conversion and Management*, vol. 341, article 120066, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120066 [Accessed 12 September 2025].

Obuseh, E., Eyenubo, J., Alele, J., Okpare, A. and Oghogho, I. (2025), "A Systematic Review of Barriers to Renewable Energy Integration and Adoption", in *Journal of Asian Energy Studies*, vol. 9, pp. 26-45. [Online] Available at: doi.org/10.24112/jaes.090002 [Accessed 17 October 2025].

Pourghorban, A. and Asoodeh, H. (2022), "The impacts of advanced glazing units on annual performance of the Trombe wall systems in cold climates", in *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 51, article 101983, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.seta.2022.101983 [Accessed 12 September 2025].

Rim, M., Sung, U.-J. and Kim, T. (2018), "Application of Thermal Labyrinth System to Reduce Heating and Cooling Energy Consumption", in *Energies*, vol. 11, issue 10, article 2762, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en11102762 [Accessed 12 September 2025].

Ritchie, H. (2024), "Air conditioning causes around 3% of greenhouse gas emissions – How will this change in the future?", in *Our World in Data*, 29/07/24. [Online] Available at: ourworldindata.org/air-conditioning-causes-around-greenhouse-gas-emissions-will-change-future [Accessed 12 September 2025].

Rome Technopole (2024), *Flagship Project 2 – Transizione energetica e transizione digitale nella rigenerazione urbana e nell'edilizia*. [Online] Available at: rometechnopole.it/progetti-flagship-project-2/ [Accessed 12 September 2025].

Samiev, K. A. and Halimov, A. S. (2022), "Annual Thermal Performance of the Trombe Wall with Phase Change Heat Storage under Climate Conditions of Uzbekistan", in *Applied Solar Energy*, vol. 58, issue 2, pp. 297-305. [Online] Available at: doi.org/10.3103/S0003701X22020189 [Accessed 12 September 2025].

Simões, N., Manaia, M. and Simões, I. (2021), "Energy performance of solar and Trombe walls in Mediterranean climates", in *Energy*, vol. 234, article 121197, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.energy.2021.121197 [Accessed 12 September 2025].

Song, S.-Y., Song, J.-H. and Lim, J.-H. (2014), "Effectiveness of a thermal labyrinth ventilation system using geothermal energy – A case study of an educational facility in South Korea", in *Energy for Sustainable Development*, vol. 23, pp. 150-164. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.esd.2014.07.008 [Accessed 12 September 2025].

Sornek, K., Papis-Frączek, K., Calise, F., Cappiello, F. L. and Vicidomini, M. (2023), "A Review of Experimental and Numerical Analyses of Solar Thermal Walls", in *Energies*, vol. 16, issue 7, article 3102, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en16073102 [Accessed 12 September 2025].

Tucci, F. (2021), *Adaptive Design – Spazi solari e bioclimatici in Architettura | Solar and bioclimatic spaces in Architecture*, Altralinea Editrice, Firenze.

Tucci, F. (2020a), *Atlante dei sistemi tecnologici per l'Architettura bioclimatica – Ventilazione naturale in Architettura | Atlas of Technological Systems for Bioclimatic Architecture – Natural Ventilation in Architecture*, Altralinea Editrice, Firenze.

Tucci, F. (2020b), *Atlante dei sistemi tecnologici per 'Architettura bioclimatica – Riscaldamento passivo in Architettura | Atlas of Technological Systems for Bioclimatic Architecture – Passive Heating in Architecture*, Altralinea Editrice, Firenze.

Tucci, F. (2018), *Costruire e Abitare Green – Approcci, Strategie, Sperimentazioni per una Progettazione Tecnologica Ambientale | Green Building and Dwelling – Approaches, Strategies, Experimentation for an Environmental Technological Design*, Altralinea Editrice, Firenze.

Tucci, F. (2009), *Tecnologia e Natura – Gli insegnamenti del mondo naturale per il progetto di architettura bioclimatica*, Alinea Editrice, Firenze.

UNEP – United Nations Environment Programme (2023), *Global Cooling Watch 2023 – Keeping it Chill – How to meet cooling demands while cutting emissions*. [Online] Available at: wedocs.unep.org/20.500.11822/44243 [Accessed 12 September 2025].

UNI 8290-1:1981 + A122:1983, *Residential building – Building Elements. Classification and Terminology*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-8290-1-1981-a122-1983 [Accessed 12 September 2025].

UNI 8289:1981, *Building – Functional Requirements of Final Users – Classification*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-8289-1981 [Accessed 12 September 2025].

UNI EN 16798-1:2019, *Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1 – Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics – Module M1-6*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-16798-1-2019 [Accessed 12 September 2025].

UNI EN ISO 15265:2005, *Ergonomics of the thermal environment – Risk assessment strategy for the prevention of stress or discomfort in thermal working conditions*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-15265-2005 [Accessed 12 September 2025].

UNI EN ISO 13790:2008, *Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-13790-2008 [Accessed 12 September 2025].

United Nations Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction (2025), *Not just another brick in the wall – The solutions exist – Scaling them will build on progress and cut emissions fast – Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025*. [Online] Available at: wedocs.unep.org/20.500.11822/47214 [Accessed 17 October 2025].

Vassiliades, C., Christos M., Olga-Eleni A., Barone G. and Vardopoulos, I. (2023), "Socio-Economic Barriers to Adopting Energy-Saving Bioclimatic Strategies in a Mediterranean Sustainable Real Estate Setting – A Quantitative Analysis of Resident Perspectives", in *Energies*, vol. 16, issue 24, article 7952, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en16247952 [Accessed 17 October 2025].

Volkova, A. (2024), *Energy efficiency indicators for heat supply sector*. [Online] Available at: odyssee-mure.eu/publications/policy-brief/european-heat-supply.pdf [Accessed 12 September 2025].

Wang, D., Hu, L., Du, H., Liu, Y., Huang, J., Xu, Y. and Liu, J. (2020), "Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe walls", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 124, article 109772, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2020.109772 [Accessed 12 September 2025].

Xiao, Y., Yang, Q., Fei, F., Li, K., Jiang, Y., Zhang, Y., Fukuda, H. and Ma, Q. (2024), "Review of Trombe wall technology – Trends in optimisation", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 200, article 114503, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2024.114503 [Accessed 12 September 2025].

Xiong, J., Yao, R., Grimmond, S., Zhang, Q. and Li, B. (2019), "A hierarchical climatic zoning method for energy efficient building design applied in the region with diverse climate characteristics", in *Energy and Buildings*, vol. 186, pp. 355-367. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.005 [Accessed 12 September 2025].

Zhang, T., Wang, H., Ding, J., Tang, S., Yuan, D. and Rao, Y. (2025), "Transient Simulation of the Thermal Performance of a Novel Phase Change Material Trombe Wall", in *Coatings*, vol. 15, issue 3, articolo 303, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.3390/coatings15030303 [Accessed 12 September 2025].

Zhou, S., Song, M., Shan, K., Zhang, L., You, B. and Razaqpur, A. G. (2024), "Heating and energy performances of a dynamic Trombe wall incorporating phase change materials under different operation modes", in *Journal of Building Engineering*, vol. 95, article 1101201, pp. 1-23. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110201 [Accessed 12 September 2025].

ARCHITECTURE
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 264-275
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18152025

Article Info

Received 12 September 2025
Revised 22 October 2025
Accepted 23 October 2025
Published 30 December 2025

EFFICIENZA ENERGETICA E SMARTNESS DEGLI EDIFICI NELLE POLITICHE AMBIENTALI PUBBLICHE

ENERGY EFFICIENCY AND SMART BUILDINGS IN PUBLIC ENVIRONMENTAL POLICIES

Massimo Lauria, Maria Azzalin, Francesca Giglio, Giovanna Maria La Face

Abstract

Obsoleto e scarsamente performante il Patrimonio edilizio europeo rappresenta una delle criticità che ostacolano il raggiungimento degli obiettivi di neutralità climatica fissati al 2050. In questo contesto il contributo restituisce i primi esiti della ricerca PRIN 2022 'Better Policy' che, partendo dall'analisi dei gap che rallentano l'attuazione delle politiche ambientali da parte delle Pubbliche Amministrazioni, propone linee guida sperimentali: un framework operativo articolato in quattro assi tematici strategici: decarbonizzazione, circolarità delle risorse, metriche LCA e digitalizzazione per la transizione ecologica. In particolare l'articolo presenta la sezione che integra lo Smart Readiness Indicator nei documenti di programmazione previsti dal Nuovo Codice degli Appalti in Italia, fornendo alle PA criteri standardizzati, procedure di verifica e protocolli di monitoraggio per l'intero ciclo vita degli edifici pubblici, trasformando così il Patrimonio edilizio pubblico in laboratorio avanzato per la sperimentazione di politiche ambientali coerenti con gli obiettivi europei di decarbonizzazione al 2050.

Obsolete and poorly performing, the European building stock represents one of the main barriers to achieving climate-neutrality goals by 2050. In this context, the contribution presents the first outcomes of the PRIN 2022 'Better Policy' research project that, starting from an analysis of the gaps that hinder the implementation of environmental policies by Public Administrations, proposes experimental guidelines: an operational framework articulated around four strategic thematic pillars: decarbonisation, resource circularity, LCA metrics, and digitalisation for the ecological transition. Specifically, the article presents the section that integrates the Smart Readiness Indicator into the planning documents required by the new Italian Public Procurement Code, providing Public Administrations with standardised criteria, verification procedures, and monitoring protocols throughout the entire life-cycle of public buildings, thus transforming the public building stock into an advanced laboratory for the testing of environmental policies aligned with European decarbonisation objectives for 2050.

Keywords

efficientamento energetico, smartness, EPBD, certificato di prestazione energetica, codice degli appalti

energy efficiency improvement, smartness, EPBD, energy performance certificate, public procurement code

Massimo Lauria, Architect and PhD, is a Full Professor at the Department of Civil, Energy, Environmental and Materials Engineering, 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy). E-mail: mlauria@unirc.it

Maria Azzalin, Architect and PhD, is a Researcher at the Department of Architecture and Design, 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy). E-mail: maria.azzalin@unirc.it

Francesca Giglio, Architect and PhD, is an Associate Professor, Department of Architecture and Design, 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy). E-mail: francesca.giglio@unirc.it

Giovanna Maria La Face is a Conservation Specialist in Architectural and Environmental Heritage and the PhD 'Mediterranea' University of Reggio Calabria (Italy). E-mail: giovanna.laface@unirc.it

La transizione ecologica e digitale costituisce uno dei principali driver di trasformazione delle politiche pubbliche europee, in particolare nei settori ad alta intensità energetica e impatto ambientale, come quello edilizio. Il Patrimonio costruito europeo – in larga parte obsoleto e scarsamente performante – è infatti responsabile di circa il 50% del consumo energetico complessivo (IEA, 2021). La sua riqualificazione rappresenta quindi una condizione necessaria per il raggiungimento dell'obiettivo 'zero emissioni nette' al 2050. A tal fine l'Unione Europea ha definito un quadro strategico articolato, basato sul principio dell'Energy Efficiency First (European Parliament and Council of the European Union, 2018, 2023a) e fortemente sostenuto da provvedimenti quali il Green Deal (European Commission, 2019a), la Renovation Wave Strategy (European Commission, 2020a), il Digital Decade (European Commission, 2024) insieme al Programma Digital Compass (European Commission, 2021a), e il pacchetto Fit for 55 (European Commission, 2021b).

Volto a guidare gli Stati membri verso un modello di sviluppo sostenibile e resiliente, fondato su inclusività, interoperabilità digitale e circolarità, il suddetto quadro strategico assume la combinazione tra efficienza energetica e smartness (capacità degli edifici di interagire in modo intelligente con gli utenti e con le reti energetiche) quale paradigma operativo per la trasformazione del costruito nell'ottica della duplice transizione ecologica e digitale. Tale strategia, complementare e integrata, intende rafforzare la centralità degli edifici smart nell'ambito delle azioni finalizzate al raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione al 2050; tuttavia la sua attuazione deve confrontarsi anche con la permanenza di barriere metodologiche e strumentali che ne rallentano l'adozione nelle relative politiche locali.

Ancora oggi infatti molti degli strumenti operativi disponibili – Smart Readiness Indicator (SRI), Energy Performance Certificate (EPC), Building Logbook e Renovation Roadmap – pur offrendo potenzialità significative, sono applicati prevalentemente su base volontaria e/o sperimentale, mentre necessiterebbero di un'integrazione sistemica all'interno dei processi di programmazione e attuazione delle politiche pubbliche, in modo da ridurre le distanze che si misurano tra quadri regolamentari e pratiche operative. Le questioni appena richiamate sono state assunte e affrontate all'interno del progetto PRIN 2022 'Better Policy' (Building Environmental Tools To Empower Responsive Policies Outreaching LifeCYcle – Guidelines and protocols to enable Public Administrations-driven processes in the Italian construction sector), che si è posto l'obiettivo generale di indagare e proporre soluzioni per colmare i gap metodologici, normativi e operativi che ancora ostacolano l'attuazione efficace delle politiche verdi e digitali nel settore pubblico. Tra gli obiettivi del progetto vi è l'elaborazione di linee guida operative replicabili e scalabili, a uso delle Pubbliche Amministrazioni (PA), direttamente applicabili nei diversi contesti locali.

La metodologia impiegata combina un confronto multiscalare, da un lato con gli indirizzi normativi europei, dall'altro con le sperimentazioni nazionali. Anche mediante interviste a stakeholder, essa è finalizzata alla costruzione di un framework (linee guida) applicabile lungo l'intero ciclo vita delle opere pubbliche. Comprendendo un sistema di benchmark, uno schema integrato di valutazione e procedure operative di monitoraggio e verifica degli impatti, la metodologia si configura quale strumento in grado di integrare indicatori ambientali e digitali nei processi di programmazione, progettazione, esecuzione e gestione del Patrimonio edilizio pubblico, secondo un approccio orientato al Life Cycle Thinking e coerente sia con il quadro normativo europeo, sopra richiamato, che con quello nazionale delineato in primo luogo dal Nuovo Codice degli Appalti (Presidente della Repubblica, 2023).

Sebbene la metodologia adottata risulti consolidata e congruente con gli obiettivi del progetto, se ne evidenziano alcune limitazioni intrinseche: la natura ancora esplorativa del confronto, il numero limitato di casi studio e il carattere in evoluzione del quadro normativo europeo e nazionale possono influire sulla piena trasferibilità dei risultati. Allo stesso tempo tali aspetti rappresentano un'opportunità di approfondimento, orientando futuri sviluppi della ricerca verso la validazione del framework attraverso applicazioni pilota e il confronto con contesti amministrativi e climatici differenziati.

Attraverso questo approccio la ricerca ha inteso contribuire a rafforzare la capacità delle PA di adottare politiche ambientali efficaci, fornendo strumenti standardizzati e misurabili che, grazie anche all'adozione di procedure di verifica e monitoraggio degli interventi pubblici, assicurino coerenza tra strategie europee e attuazione concreta a livello locale, configurando il Patrimonio edilizio pubblico quale potenziale laboratorio avanzato di sperimentazione. In tale direzione le prospettive di sviluppo riguardano la possibilità di utilizzare lo Smart Readiness Indicator come dispositivo abilitante per la programmazione e la valutazione delle politiche pubbliche, contribuendo alla costruzione di un sistema decisionale sempre più orientato ai processi di transizione verde e digitale.

L'articolo in particolare restituisce i risultati dell'Unità Operativa di Reggio Calabria che ha elaborato una specifica sezione delle suddette linee guida, sviluppando metodologie di trasferimento, nei processi di programmazione, progettazione e gestione degli interventi pubblici da parte delle PA, dello Smart Readiness Indicator, introdotto dalla Direttiva EPBD 2024/1275 (European Parliament and Council of the European Union, 2024; Fig. 1).

Nei fatti l'Unità Operativa, di cui gli autori sono componenti, non si propone di introdurre nuovi indicatori, ma di definire una cornice per l'applicazione sperimentale di quelli esistenti; trasformando strumenti ancora in fase di testing volontario – quale lo Smart Readiness Indicator – in leve decisionali operative per la governance pubblica in materia di trasformazione edilizia, riducendo la distanza tra gli aspetti teorici espressi dall'attuale quadro normativo europeo e nazionale sul tema e la loro attuazione.

Di particolare rilievo è l'interazione proposta tra gli elaborati di programmazione previsti dall'Allegato I.7 del Codice degli Appalti – Quadro esigenziale, Documento delle alternative progettuali, Documento di indirizzo alla progettazione – e la possibilità per il committente pubblico di introdurre azioni e/o indicazioni specifiche in grado di orientare le decisioni nella successiva fase di progettazione, nonché in quelle di esecuzione e gestione, in un'ottica generale di attuazione di politiche ambientali per l'efficienza energetica e la smartness. In tale contesto lo Smart Readiness Indicator si configura quale potenziale indicatore robusto 'ecologico e digitale'.

Si evidenzia un doppio livello di impatti ipotizzabili della ricerca, in ambito scientifico e sulla governance pubblica; quest'ultimo a sua volta riguarda tre differenti livelli: a) normativo per l'evoluzione dei dispositivi regolativi; b) gestionale per l'aumento della capacità delle PA; c) sistemico per il ruolo assunto dagli edifici pubblici quali laboratori di sperimentazione delle strategie attuative verdi e digitali.

Le potenziali applicazioni del framework proposto includono la sua adozione come modello replicabile per la redazione di strumenti attuativi – quali Piani, capitolati e protocolli – che permettano alle PA di misurare e migliorare progressivamente la smartness del Patrimonio edilizio pubblico, promuovendo processi decisionali basati su evidenze misurabili e interoperabili. Tale approccio estende le prospettive già delineate in studi precedenti (Azzalin, 2024; Lauria et alii, 2025), enfatizzando la scalabilità del modello operativo a livello nazionale ed europeo. In tale contesto la definizione di linee guida integrate, supportate da strumenti esistenti e procedure di monitoraggio consolidate, nonché la loro successiva integrazione nei sistemi di valutazione della spesa pubblica, rappresenta un passaggio essenziale per garantire che il Patrimonio edilizio pubblico contribuisca realmente ai processi di transizione ecologica e digitale e, più specificamente, agli obiettivi di decarbonizzazione.

Transizione ecologica e digitale nelle politiche ambientali pubbliche: il connubio efficienza energetica e smartness degli edifici | La Commissione Europea ha strutturato negli anni un quadro normativo ambizioso per sostenere la doppia transizione – ecologica e digitale – del sistema economico e produttivo europeo. Con riferimento alla relazione efficienza energetica e smartness, la Energy Performance Buildings Directive, EPBD, dalla prima versione del 2010 alla quarta del 2024, introduce lo Smart Readiness Indicator, come indicatore normativo di riferimento per misurare la prontezza digitale degli edifici.

L'EPBD collega inoltre lo Smart Readiness Indicator ad altri strumenti operativi come i Renovation Passport e i Building Logbook, configurando un ecosistema integrato di dati e di monitoraggio digitale. In questo ambito l'obiettivo di raggiungere la neutralità climatica al 2050 si è tradotto in strategie integrate, come l'Energy Efficiency First (European Parliament and Council of the European Union, 2018, 2023a), il Green Deal (European Commission, 2019a), il Fit for 55 (European Commission, 2021b) e la stessa Revisione dell'EPBD (European Parliament and Council of the European Union, 2024), che riformula in chiave più stringente i requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici (Fig. 2).

L'Energy Efficiency First pone l'efficienza energetica come prima opzione nelle azioni di pianificazione e investimento degli Stati membri, introducendo un approccio chiave per raggiungere alcuni dei 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG; UN, 2015) tra cui l'SDG 7 (Energia pulita e accessibile), l'SDG 13 (Azione per il clima), l'SDG 11 (Città e Comunità Sostenibili) e, non ultimo in termini di sinergie e trasferimento tecnologico, l'SDG 9 (Imprese, Innovazione e Infrastrutture). Contemporaneamente la strategia proposta dal Green Deal europeo prevede che l'Unione Europea raggiunga l'azzeramento delle emissioni nette di gas a effetto serra entro il 2050, risultato che segnerebbe anche il disaccoppiamento della crescita economica dall'utilizzo delle risorse (European Commission, 2020b; UNEP,

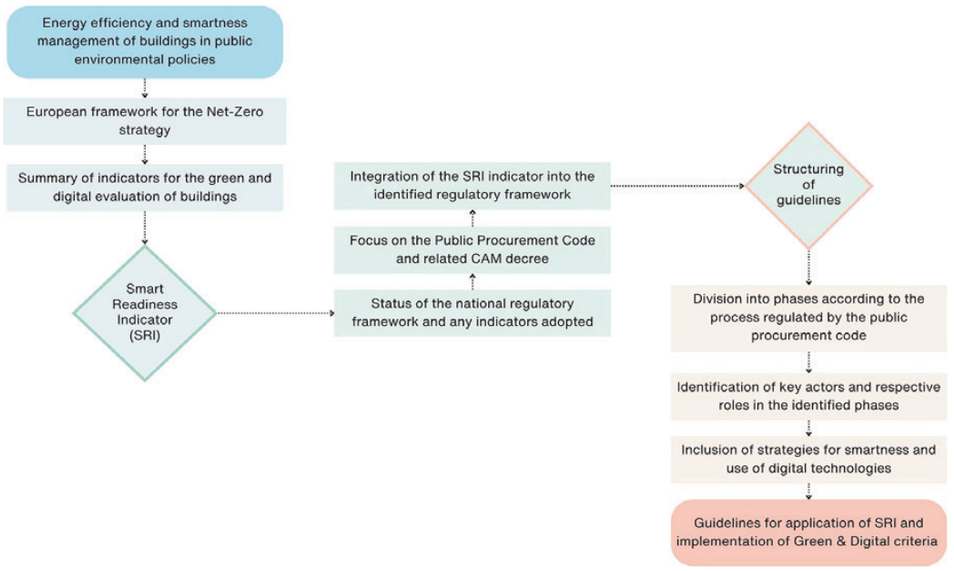


Fig. 1 | Process flowchart on green and digital issues within the PRIN research: methodology and its graphical representation (credit: G. M. La Face, 2025).

Next page

Fig. 2 | Evolution of the Smart Readiness Indicator through a transversal reading of the main European strategies and their directives (source: energy.ec.europa.eu; edited by G. M. La Face, 2025).

2022). Il concreto raggiungimento di tali obiettivi è tuttavia prioritariamente legato alla riqualificazione del Patrimonio edilizio che, 'vecchio' e poco performante, incide per il 50% sul consumo finale complessivo di energia, sia per il riscaldamento che per il raffrescamento.

In questo scenario la Renovation Wave Strategy (European Commission, 2020a) segna un punto di svolta, concorrendo in maniera significativa, attraverso la sua attuazione concreta, alla riduzione delle emissioni di gas serra connessa ai processi di trasformazione sostenibile del Patrimonio costruito abilitati dal digitale. Sulla base di tale strategia nel prossimo decennio è prevista la riqualificazione energetica di 35 milioni di edifici e la loro trasformazione in asset efficienti e intelligenti.

Altrettanto determinante è il pacchetto Fit for 55 (European Commission, 2021b) che, nel promuovere norme comuni per ridurre l'impronta di carbonio, ha guidato la revisione della direttiva EPBD e dell'EPC, ridefinendo gli standard di efficienza energetica per un parco edilizio a emissioni zero entro il 2050 (European Parliament and Council of the European Union, 2024). A tale riguardo, recenti studi dimostrano che le soluzioni digitali possono ridurre le emissioni totali fino al 20% (WEF, 2022) riconoscendo l'integrazione tra sistemi di automazione degli edifici standardizzati secondo UNI EN ISO 52120-1:2022 e lo Smart Readiness Indicator quale strumento essenziale per ottimizzare le prestazioni energetiche, integrare tecnologie intelligenti e migliorare l'adattabilità degli edifici (Walczyk and Ozadowicz, 2025). D'altro canto, le stesse normative europee, e in particolare l'EPBD che impone la progressiva affermazione di edifici a energia quasi zero, stanno stimolando una crescita evidente del mercato degli edifici smart che è passato dai 6,3 miliardi di dollari del 2024 ai 7,5 miliardi previsti nel 2025, con proiezioni che raggiungono i 31 miliardi entro il 2033 (Ghodsian, 2025). L'Unione Europea, dunque, attraverso strumenti come la richiamata EPBD e la Green Taxonomy (European Parliament and Council of the European Union, 2020) e i relativi standard tecnici, sta costruendo un sistema normativo avanzato orientato alla qualità edilizia, alla riduzione dell'impatto ambientale e alla promozione della resilienza digitale, rispondendo tra l'altro alle istanze poste dall'SDG 11 di rendere gli insediamenti umani e urbani inclusivi, sicuri, duraturi e sostenibili (Fig. 3). Emerge così una rinnovata e moderna visione strategica per le politiche ambientali che numerosi Enti Pubblici europei stanno recependo trasferendone gli indirizzi nella definizione di Piani d'Azione sempre più stringenti che abbinano alla duplice istanza, ecologica e digitale, gli aspetti di efficienza energetica.

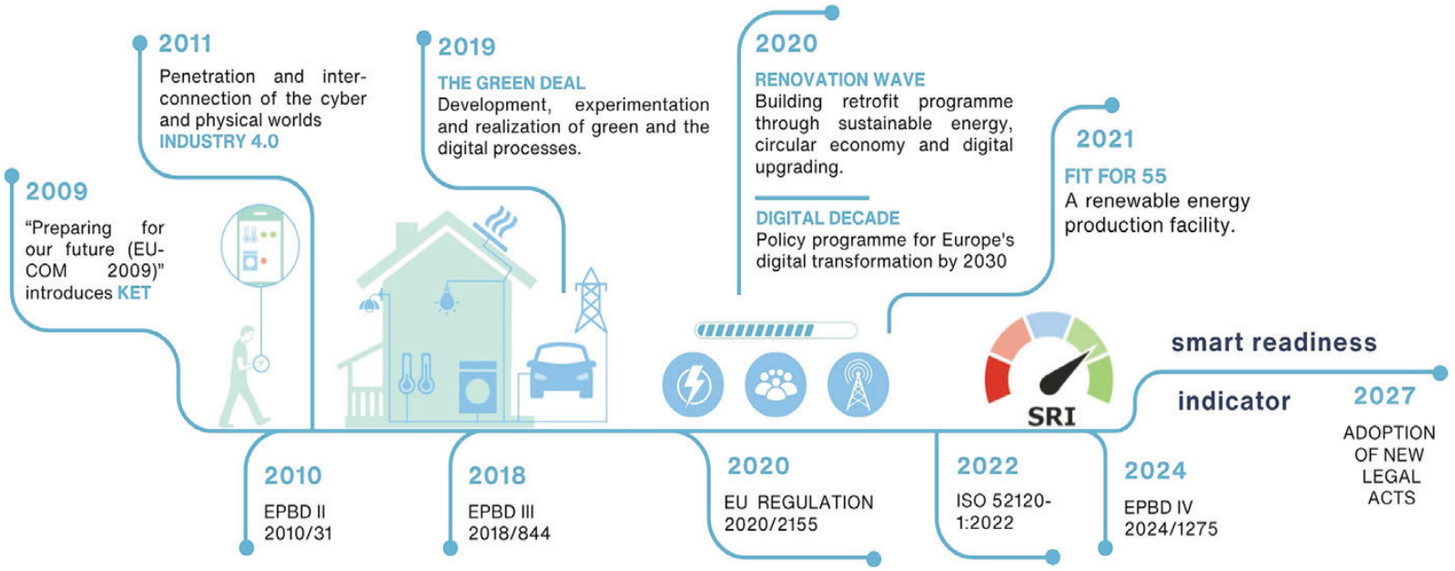
In questo contesto il concetto di smartness – attraverso lo Smart Readiness Indicator che ne rappresenta lo strumento operativo – sta assumendo un ruolo determinante, sia come fattore di valutazione dell'efficienza tecnica, che come abilitatore di innovazione nel settore edilizio. Introdotto dalla Commissione Europea nel 2020 lo Smart Readiness Indicator nasce per valutare la prontezza smart degli edifici e supportarne l'evoluzione verso sistemi edilizi sempre più intelligenti e interconnessi, rispondendo contemporaneamente a esigenze di efficienza energetica, comfort, flessibilità d'uso e interoperabilità digitale (European Commission, 2020c).

A differenza di altri strumenti certificativi, lo Smart Readiness Indicator si configura come un indicatore composito, capace di valorizzare tecnologie attive, sistemi di gestione automatizzata e soluzioni per la connettività. Il suo impiego consente inoltre di promuovere l'adozione integrata di ulteriori strumenti quali l'Energy Performance Certificate, aggiornato con parametri digitali, il Building Logbook e la Renovation Roadmap, strumenti dinamici di gestione informativa che favoriscono una gestione più efficiente e trasparente dei dati, abilitata dalle tecnologie digitali (Capozzoli et alii, 2024). Tuttavia, nonostante questi strumenti siano da tempo formalmente definiti a livello europeo, presentano ancora in molti Stati membri un livello di implementazione volontaria e sperimentale. In Italia tale processo è sostenuto dal rinnovato quadro normativo del Nuovo Codice degli Appalti, apparato normativo che orienta la trasformazione e l'innovazione del settore edilizio.

Recenti studi (Delavar, Borgentorp and Junnila, 2025) hanno confermato la potenzialità dello Smart Readiness Indicator come leva per innovare le politiche pubbliche in materia di interventi sul Patrimonio edilizio esistente. Ulteriori analisi condotte in contesti nordeuropei hanno dimostrato che, a prescindere dalla futura obbligatorietà dell'indicatore, è fondamentale comprendere se le pratiche del mercato delle costruzioni siano in linea e coerenti con l'applicazione diffusa dell'indicatore (Aiutio et alii, 2024). Parallelamente lo Smart Readiness Indicator si sta affermando come strumento tecnico di diagnosi e di supporto decisionale per edifici a basse emissioni di carbonio, in quanto in grado di valutare la prontezza tecnologica e il livello di funzionalità di vari servizi intelligenti, contribuendo a soddisfare le esigenze degli utenti e a garantire la flessibilità energetica e il raggiungimento degli obiettivi di risparmio energetico (Chatzikonstantinidis et alii, 2024). Tale prospettiva sistemica ha l'obiettivo di orientare, nell'ambito delle azioni di programmazione e gestione degli appalti pubblici, sia politiche che strategie di innovazione, sostenibilità e qualità ambientale per il settore delle costruzioni (Del Curto, Garzulino and Turrina, 2024).

Persistono tuttavia ostacoli significativi a tale applicazione, tra cui la difficoltà di accesso ai dati, la mancanza di benchmark, di indicatori standardizzati e di strumenti operativi comuni, a cui si aggiunge la frammentazione delle metodologie di valutazione sia dell'efficienza energetica che della smartness, per la quale sono stati proposti anche metodi di calcolo alternativi, per semplificarne il processo di valutazione (Beras et alii, 2025).

Strumenti operativi e indicatori per valutare l'efficienza energetica e la smartness degli edifici: metriche e benchmark | Il progetto di ricerca nelle sue linee strategiche generali, coinvolge quattro Unità Operative (U.O.) afferenti ad altrettante sedi universitarie e nasce dall'esigenza di supportare le PA nella definizione di proprie politiche ambientali in ottica Life Cycle Thinking, colmando gli attuali gap attraverso la definizione di linee guida operative che introducono indicatori di sostenibilità nei processi decisionali. La ricerca si sviluppa lungo quattro assi tematici strategici, uno per ciascuna U.O., individuati a partire da uno studio critico delle traiettorie di sviluppo del PNR 2021-2027 e del PNRR, nonché dall'analisi delle correlate politiche europee: Decarbonizzazione (U.O. Genova); Circolarità delle risorse (U.O. Bologna); Metriche LCA (U.O. Milano); Digitalizzazione per la transizione green (U.O. Reg-



gio Calabria). Quest'ultimo asse si configura quale dispositivo trasversale e abilitante i processi e le connessioni tra strategie europee e politiche di attuazione locale, evidenziando la stretta relazione con l'SDG 9.

L'approccio delle diverse U.O. condivide tanto gli obiettivi quanto la metodologia: a) implementare con criteri basati sull'LCA le politiche orientate al miglioramento della sostenibilità, considerando tutte le categorie di impatto ambientale e tutte le fasi del ciclo vita; b) sviluppare strumenti semplificati, ma affidabili, basati su metodologie robuste; c) proporre Criteri Ambientali Minimi e benchmark / target di riferimento (da implementare nei CAM-GPP, protocolli, ecc.); d) formare i tecnici delle PA, tramite l'inserimento graduale nelle politiche ambientali degli indicatori LCA; e) mappare barriere e ostacoli (culturali, economici, normativi, ecc.), individuare potenzialità e testare la fattibilità delle proposte della ricerca; f) definire procedure di verifica che siano attuabili per i tecnici delle PA.

La metodologia generale si articola altresì in tre azioni principali: 1) analisi normativa multiscalare (studio critico della legislazione europea e nazionale finalizzata a mappare obiettivi, strumenti e vincoli); 2) indagine empirica nel contesto di riferimento sviluppata attraverso una serie di interviste a stakeholder pubblici appartenenti a diversi livelli istituzionali (Regione Lombardia e Comune di Milano; Regione Liguria; Regione Emilia-Romagna e Città di Bologna; Regione Calabria e Città Metropolitana di Reggio Calabria) che hanno permesso di verificare le criticità ricorrenti e la capacità (potenzialità e limiti) delle PA nell'adottare e integrare strumenti digitali e ambientali nelle proprie pratiche; 3) elaborazione di linee guida (un framework metodologico replicabile) capace di supportare le PA nella promozione di politiche ambientali coerenti con gli indirizzi europei e applicabili lungo l'intero ciclo vita delle opere pubbliche.

Le linee guida si articolano in quattro sezioni; l'insieme delle strategie individuate per ciascuna sezione si articola a sua volta in due macro-ambiti: azioni di indirizzo (a livello statale e istituzionale) e strategie operative (applicabili dalle stazioni appaltanti e dagli attori della filiera tecnica). Il risultato finale è un framework la cui architettura propone benchmark, indicatori, strumenti di monitoraggio e raccomandazioni per l'attuazione delle politiche pubbliche. La sua strutturazione ha tenuto altresì conto di alcune specifiche criticità: mancanza di criteri premiali e incentivi nei bandi di gara pubblici; assenza di un linguaggio comune tra indicatori tecnici e documentazione amministrativa; carenza di competenze tecniche per l'uso degli strumenti digitali.

Nell'ambito del contesto sopra delineato e coerentemente con gli obiettivi fissati dal progetto di ricerca, le azioni sviluppate dall'U.O. di Reggio Calabria sono state finalizzate all'introduzione dello Smart Readiness Indicator quale criterio e indicatore guida nelle fasi di programmazione, progettazione, realizzazione e gestione del Patrimonio edilizio pubblico. L'ambito di applicazione è l'ecosistema definito dalla nuova direttiva EPBD in tema di efficienza energetica e smartness, con particolare attenzione alla redazione dei già richiamati atti di programmazione previsti dal nuovo Codice degli Appalti – dal Quadro esigenziale al Documento di indirizzo alla progettazione – in un'ottica Life Cycle Thinking.

La metodologia proposta dall'U.O. di Reggio Calabria integra approcci di ricerca comparata e sperimentazione sul campo, attraverso: 1) applicazione dello SRI sulla base delle indicazioni fissate dalla EPBD, attraverso il calcolo tramite una checklist di smart services (da 27 a 54, in base alla complessità dell'edificio), valutati per livello di funzionalità e impatto (efficienza energetica, comfort degli utenti, flessibilità della domanda); 2) contestualizzazione di strumenti europei (Smart Readiness Indicator, Energy Performance Certificate digitale, Building Logbook, Digital Twin) per le PA; 3) mappatura delle possibilità di integrazione dello SRI e degli altri strumenti digitali nei documenti di programmazione e gestione; 4) definizione di criteri operativi e protocolli di verifica digitale a supporto del Responsabile Unico del Procedimento (RUP) e dei progettisti.

L'integrazione delle tecnologie IoT e BIM nel settore delle costruzioni consente di ottimizzare i processi costruttivi, migliorare l'efficienza e ridurre gli sprechi di risorse attraverso la gestione intelligente e il controllo automatizzato degli edifici (Tang et alii, 2019; Rangasamy and Yang, 2024). Parallelamente la transizione verso un'economia circolare dell'ambiente costruito, facilitata e supportata dall'integrazione con gli strumenti digitali, consente di ridurre il consumo di risorse, le emissioni e la produzione di rifiuti alimentando cluster di ricerca su componenti edilizi circolari, materiali da costruzione, progettazione per il disassemblaggio e progetti di riuso adattivo (Heisel and Rau-Oberhuber, 2020).

In questo contesto l'integrazione dello Smart Readiness Indicator è assunta all'interno di un più ampio processo di valutazione olistica delle prestazioni edilizie, in sinergia con altri parametri già introdotti a livello europeo – Renewable Energy Ratio (European Parliament and Council of the European Union, 2023b), Primary Energy Non-Renewable e Primary Energy Factors (Amann et alii, 2023); ciò consente un allineamento tra obiettivi europei, strumenti operativi e processi decisionali, trasformando lo Smart Readiness Indicator da elemento tecnico a dispositivo strategico di policy ambientale e digitale.

Linee guida a supporto dell'efficienza energetica e la smartness degli edifici: struttura, livelli di applicabilità e criteri premiali | L'U.O. di Reggio Calabria non si è limitata a testare singoli indicatori digitali, ma ha elaborato un quadro operativo più ampio, volto ad adattare e trasferire strumenti digitali europei alle procedure della PA. In particolare le azioni e le strategie verdi e digitali (DIG) non operano come ambiti isolati, ma si integrano trasversalmente con le altre tre dimensioni strategiche delle linee guida: circolarità delle risorse (CIR), decarbonizzazione (DEC) e valutazione LCA / LCC (Fig. 4).

La proposta dell'U.O. di Reggio Calabria si articola in azioni di indirizzo e strategie operative (DIG 1-11) progettate per differenti scale territoriali, che intervengono in ogni fase del ciclo, dalla pianificazione / policy alla gestione / fine vita (Figg. 5, 6). Le azioni di indirizzo (DIG) mirano a creare un quadro regolamentare e organizzativo che consente di rafforzare la tracciabilità dei processi (CIR), incrementare la trasparenza delle procedure di gara e favorire l'applicazione sistematica di criteri ambientali e la riduzione delle emissioni (DEC).

Ne costituiscono presupposto teorico e principi di riferimento: a) l'aggiornamento dell'ecosistema nazionale di e-procurement che prevede l'adeguamento del Fascicolo Virtuale dell'Operatore Econo-

mico includendo requisiti relativi alla digitalizzazione, alla sostenibilità (LCA/LCC), alla circolarità dei materiali e alla decarbonizzazione per rafforzare la trasparenza e la tracciabilità dei processi di gara; b) l'obbligatorietà dei CAM che introducono la transizione da CAM 'premianti' a 'obbligatori' per la progettazione edilizia, con particolare riferimento all'ottimizzazione delle soluzioni progettuali (LCA e LCC), al miglioramento delle prestazioni energetiche e all'adozione di sistemi di automazione e monitoraggio; c) il Capitolato Informativo BIM che prevede che le stazioni appaltanti includano all'interno dei Capitolati BIM requisiti specifici relativi ai quattro temi centrali (digitalizzazione, economia circolare, decarbonizzazione, LCA), favorendo la gestione intelligente dei dati e dei consumi; d) le competenze digitali nella PA che definiscono la necessità di rafforzare le competenze interne alle PA attraverso la formazione e l'introduzione di nuove figure professionali (BIM manager, esperti SRI), così da ridurre la dipendenza da consulenze esterne.

Le strategie operative consentono di trasferire i suddetti principi nella pratica, lungo l'intero iter processuale, introducendo strumenti digitali per la progettazione (BIM, IoT, BACS), la certificazione delle prestazioni (Smart Readiness Indicator) e la gestione del ciclo vita edilizio (Piani di manutenzione, monitoraggio dati), garantendo coerenza tra progettazione, esecuzione e gestione. In particolare le linee guida propongono:
– l'adozione dello Smartness che prevede che le PA definiscano Key Performance Indicator (KPI) per ogni tematica, integrandoli nei documenti di programmazione e nei modelli informativi digitali; gli obiettivi riguardano la riduzione dell'impatto ambientale (energia, FER, emissioni), il miglioramento del comfort e della qualità architettonica (dimensione sociale) e la gestione avanzata dei sistemi tramite BACS e BMS (dimensione di governance);
– l'inserimento di standard tecnici in fase di programmazione affinché i requisiti tecnici relativi allo SRI e ai CAM siano integrati fin dalla redazione del Documento di Indirizzo alla Progettazione e del Piano di Fattibilità Tecnico-Economica;
– l'adozione della Smartness nella fase di progettazione che sancisce il ruolo centrale del RUP nel verificare la coerenza tra requisiti e obiettivi e nel garantire che i criteri di smartness restino integrati lungo l'intero iter progettuale;
– l'adozione di componenti tecnologiche smart che prevede che il progettista e il direttore dei lavori dettaglino e integrino le tecnologie digitali da implementare, assicurando continuità tra progettazione ed esecuzione e la compatibilità fra queste e gli standard tecnici individuati secondo i criteri di impatto SRI;
– il calcolo e l'attestazione dello Smart Readiness Indicator che presuppone la figura di un certificatore esterno chiamato a calcolare, verificare e rilasciare l'attestazione del livello di smartness dell'edificio, garantendo trasparenza e validità ai processi di valutazione;
– la coerenza del Piano di Manutenzione con gli indicatori smartness, così da garantire che le prestazioni previste in fase progettuale si mantengano nel tempo;
– la gestione dei dati con la partecipazione, oltre del facility manager, anche dell'utente finale che partecipa al monitoraggio dei parametri di esercizio e alla condivisione dei dati, in conformità al GDPR, favorendo una gestione consapevole e partecipata delle prestazioni edilizie.

La elaborazione di questa sezione delle linee guida ha ampliato e integrato gli altri contributi sottolineando la natura multilivello e intersettoriale della digitalizzazione, sia come dispositivo normativo per la PA sia come strumento operativo per la filiera edilizia (Tab. 1). Il processo di allineamento e messa a sistema delle proposte per ciascuna dimensione strategica ha portato alla strutturazione di quadri sinottici relativi agli ambiti di azione riferiti alle diverse scale territoriali e all'edificio, suddiviso per fasi di intervento. La loro struttura consente di fornire un quadro complessivo alle PA rispetto all'intero processo e di seguire percorsi tematici rispetto alle singole strategie; a corredo del materiale è fornito alle PA uno schema di lettura rivolto agli operatori economici coinvolti in alcune azioni. Ogni proposta è dettagliata in una scheda di approfondimento che fornisce le indicazioni per renderla operativa e suggerisce buone prassi cui fare riferimento; le schede possono essere collettive o mono tematiche. Un esempio di scheda relativa alla strategia operativa 'Promozione della Smartness e relativi KPI' è riportato nella Tabella 2.

Conclusioni e indirizzi per l'introduzione dello Smart Readiness Indicator come dispositivo strategico

Il contributo ha affrontato il tema della transizione ecologica e digitale del Patrimonio edilizio pubblico, ponendo l'attenzione sulla necessità di superare la distanza tra quadro normativo europeo e attuazione concreta da parte delle PA (European Commission, 2019b, 2020b). In particolare si è evidenziato il ruolo strategico che strumenti come lo Smart Readiness Indicator, se integrati in maniera sistemica all'interno dei processi decisionali, programmatori e gestionali della PA, possono assumere sia nei processi connessi alla doppia transizione ecologica e digitale degli insediamenti urbani e del comparto edilizio sia nel raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione entro il 2050 (Ness, 2024; WEF, 2022; Ghodsian, 2025).

Partendo dal progetto PRIN 'Better Policy' e dall'elaborazione di un framework metodologico, che ha condotto alla redazione di linee guida operative da affiancare agli indicatori ambientali e digitali, il lavoro contribuisce al dibattito scientifico su smartness ed efficienza energetica offrendo uno strumento operativo concreto per la definizione di una nuova generazione di politiche pubbliche ambientali, in grado di introdurre criteri 'verdi e digitali' sin dalla fase di programmazione e poi in quelle di progettazione, realizzazione e gestione, in un'ottica di Life Cycle Thinking (Marzinger and Osterreicher, 2019; Fokaides, Panteli and Panayidou, 2020; Autio et alii, 2024).

L'inclusione dello Smart Readiness Indicator tra i criteri guida nella redazione degli atti di programmazione previsti dal nuovo Codice degli Appalti costituisce infatti uno degli aspetti originali della struttura delle linee guida proposte, individuando per ciascuna fase proprie specificità operative: a) nella fase di programmazione si configura come elemento per definire scenari e alternative progettuali; b) nella fase di verifica e validazione diviene parametro di misurazione della prontezza digitale e dell'efficienza tecnica; c) nella fase di gestione è assunto come supporto per il monitoraggio continuo delle performance.

Una tale integrazione e capacità di interazione nelle diverse fasi, se correttamente strutturata, potrebbe effettivamente consentire nel medio-lungo termine un allineamento tra obiettivi europei, strumenti operativi e processi decisionali. Il framework proposto si allinea infatti con molteplici SDG dell'Agenda 2030, contribuendo non solo alla transi-



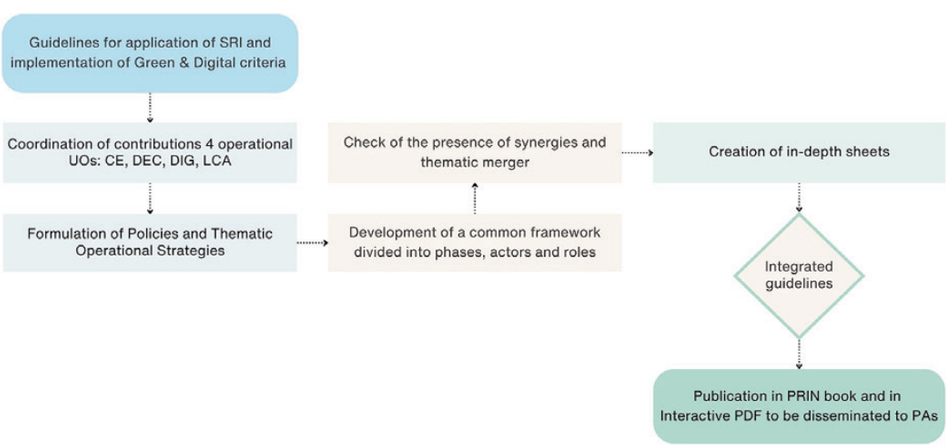


Fig. 3 | SDGs pursued by European Green Deal, Renovation Wave, Fit for 55, Digital Age: the objectives linked to the paper are highlighted (credit: G. M. La Face, 2025).

Fig. 4 | Shaping process of the guidelines integrated within the PRIN 'Better Policy' project (credit: G. M. La Face, 2025).

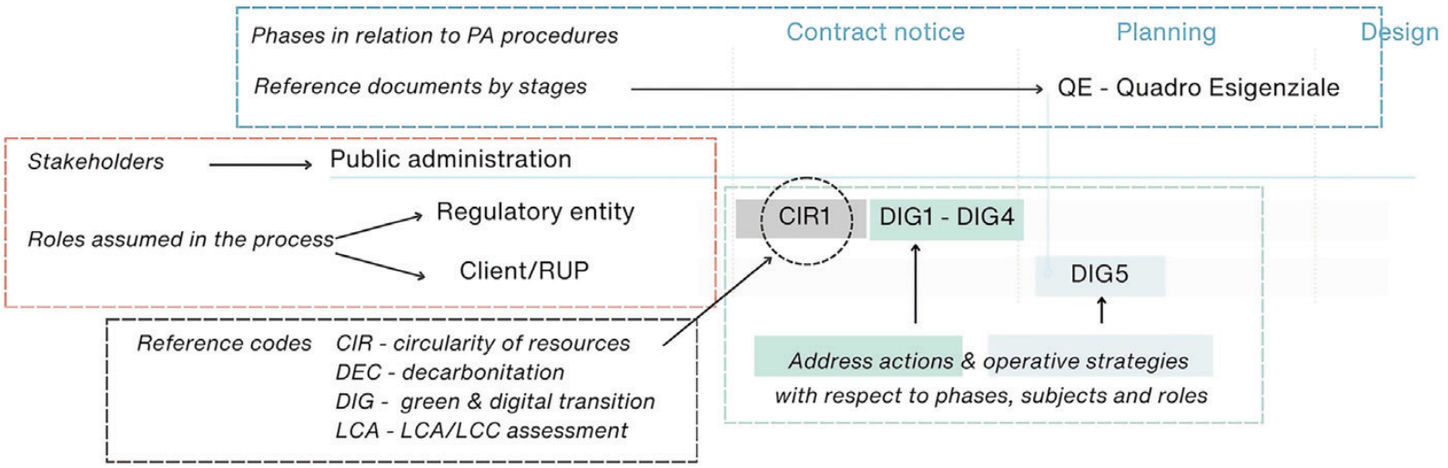


Fig. 5 | Diagram of the common framework composition for the guidelines (credit: G. M. La Face, 2025).

zione energetica (SDG 7) e alla lotta contro il cambiamento climatico (SDG 13), ma anche allo sviluppo di città e comunità sostenibili (SDG 11) e all'innovazione industriale e infrastrutturale (SDG 9), configurandosi come approccio olistico alla sostenibilità del Patrimonio costruito (UN-Habitat, 2020).

Al contempo la ricerca ha consentito di mettere in luce alcune importanti criticità connesse alla difficoltà di accesso ai dati, alla disomogeneità nella loro raccolta e gestione, alla mancanza di benchmark standardizzati e alla scarsa formazione tecnica all'interno delle PA. Queste criticità suggeriscono la necessità di rafforzare le competenze dei tecnici della PA, sia sul piano normativo che su quello gestionale, fornendo strumenti digitali, checklist di verifica, interoperabilità con modelli BIM e piattaforme open access, che possano essere integrati direttamente nei processi attuativi.

Si configurano tre diversi livelli di impatto della ricerca sul territorio: 1) normativo, con l'allineamento con l'EPBD 2024 che rende obbligatori gli Smart Readiness Indicator e Logbook digitali; 2) gestionale, attraverso la digitalizzazione come strumento di implementazione delle competenze per la PA, migliorando l'efficacia del RUP; 3) sistemico, grazie al digitale come livello trasversale e abilitante per circolarità delle risorse e decarbonizzazione, garantendo sinergia e coerenza di applicazione.

L'individuazione degli impatti consente di delineare alcune prospettive di sviluppo ed eventuali futuri avanzamenti della ricerca sul tema. Quattro sono le direttrici principali: 1) standardizzazione del framework, attraverso la definizione di template, schede tecniche e criteri premiali che possano essere effettivamente utilizzabili nei documenti di programmazione previsti dal Nuovo Codice degli Appalti; 2) scalabilità nazionale ed europea del modello DIG, con possibilità di adattamento in diversi contesti normativi e amministrativi; 3) integrazione degli strumenti digitali negli strumenti di spesa pubblica e nei meccanismi di monitoraggio; 4) formazione e implementazione delle competenze dei tecnici delle PA per l'uso degli strumenti digitali.

Parallelamente emerge la necessità di una fase di testing operativo delle linee guida su casi pilota con il coinvolgimento attivo delle PA e in tutte le fasi del ciclo vita edilizio, dalla programmazione alla gestione post-intervento, contribuendo così a ridurre i divari tra prescrizioni normative e pratica operativa. Il modello proposto, con le sue azioni operative, è infatti trasferibile, scalabile e replicabile in diversi contesti, fornendo un riferimento metodologico per future applicazioni a livello nazionale ed europeo. In questo senso la digitalizzazione non rappresenta un mero supporto tecnico, ma un vero e proprio dispositivo abilitante per l'efficacia delle politiche pubbliche in materia di decarbonizzazione e circolarità, garantendo e promuovendo coerenza tra strategie europee e attuazione locale.

The Ecological and Digital Transitions are key drivers of change in European public policies, especially in sectors with high energy use and environmental impact, like construction. The European building stock is mostly outdated and inefficient, responsible for about 50% of total energy consumption (IEA, 2021). Its renewal is essential for reaching the Net-Zero emissions target set for 2050. To achieve this, the European Union has established a comprehensive strategic framework based on the principle of Energy Efficiency First (European Parliament and Council of the European Union, 2018, 2023a), supported by measures such as the Green Deal (European Commission, 2019a), Renovation Wave Strategy (European Commission, 2020a), Digital Decade (European Commission, 2024), along with the Digital Compass programme (European Commission, 2021a), and Fit for 55 (European Commission, 2021b).

This framework aims to lead Member States towards a model of sustainable and resilient development characterised by inclusiveness, digital interoperability, and circularity. The combination of energy efficiency and smartness – meaning the ability of buildings to interact with their users and energy grids – is considered an operational model for transforming the stock in light of the twin ecological and digital transitions. Such a combined strategy seeks to emphasise the significance of smart buildings in achieving the 2050 decarbonisation targets. However, implementing this strategy also involves overcoming methodological and instrumental barriers that hinder its integration into local policies.

Many available operating tools – the Smart Readiness Indicator (SRI), the Energy Performance Certificate (EPC), the Building Logbook, and the Renovation Roadmap – offer significant opportunities. However, they are still used on a voluntary and/or experimental basis today. Conversely, their integration into public policy implementation can help close the gaps between legal frameworks and operational practices.

The issues mentioned above have been addressed in the PRIN 2022 'Better Policy' project (Building Environmental Tools To Empower Responsive Policies Outreaching LifeCycle – Guidelines and protocols to enable Public Administrations-driven processes in the Italian construction sector). The main aim of the project was to investigate and propose solutions to reduce the methodological, legal and operational problems hindering the effective implementation of green and digital policies in the public sector. One of the project's specific objectives is to develop replicable, multilevel guidelines for Public Administrations (PAs) that can be directly applied across various local contexts.

The methodology aims to develop a framework (comprising guidelines) for the entire life-cycle of public works, drawing on multi-scale references to European legal standards, national experiments, and stakeholder surveys. The framework serves as a tool for integrating environmental and digital indicators across the Planning, Design, Runtime, and Management phases of the public building stock. It includes a system of benchmarks, an integrated assessment and monitoring framework, and operational procedures. Life Cycle Thinking guides the overall approach and aligns with both the European legal framework mentioned earlier and the national framework, primarily established by the new Procurement Code (Presidente della Repubblica, 2023).

Although the methodology used is effective and aligned with the project aims, some limitations can be observed. The evolving nature of European and national legal frameworks, the confrontational aspect of the process, and the limited number of case studies may affect the transferability of the results. At the same time, this presents an opportunity for further investigation, guiding future research towards framework validation through pilot applications and experimentation across varied administrative and climate contexts.

This approach aims to enhance PAs' ability to implement effective environmental policies by providing standardised, measurable tools, including assessment and monitoring procedures for public

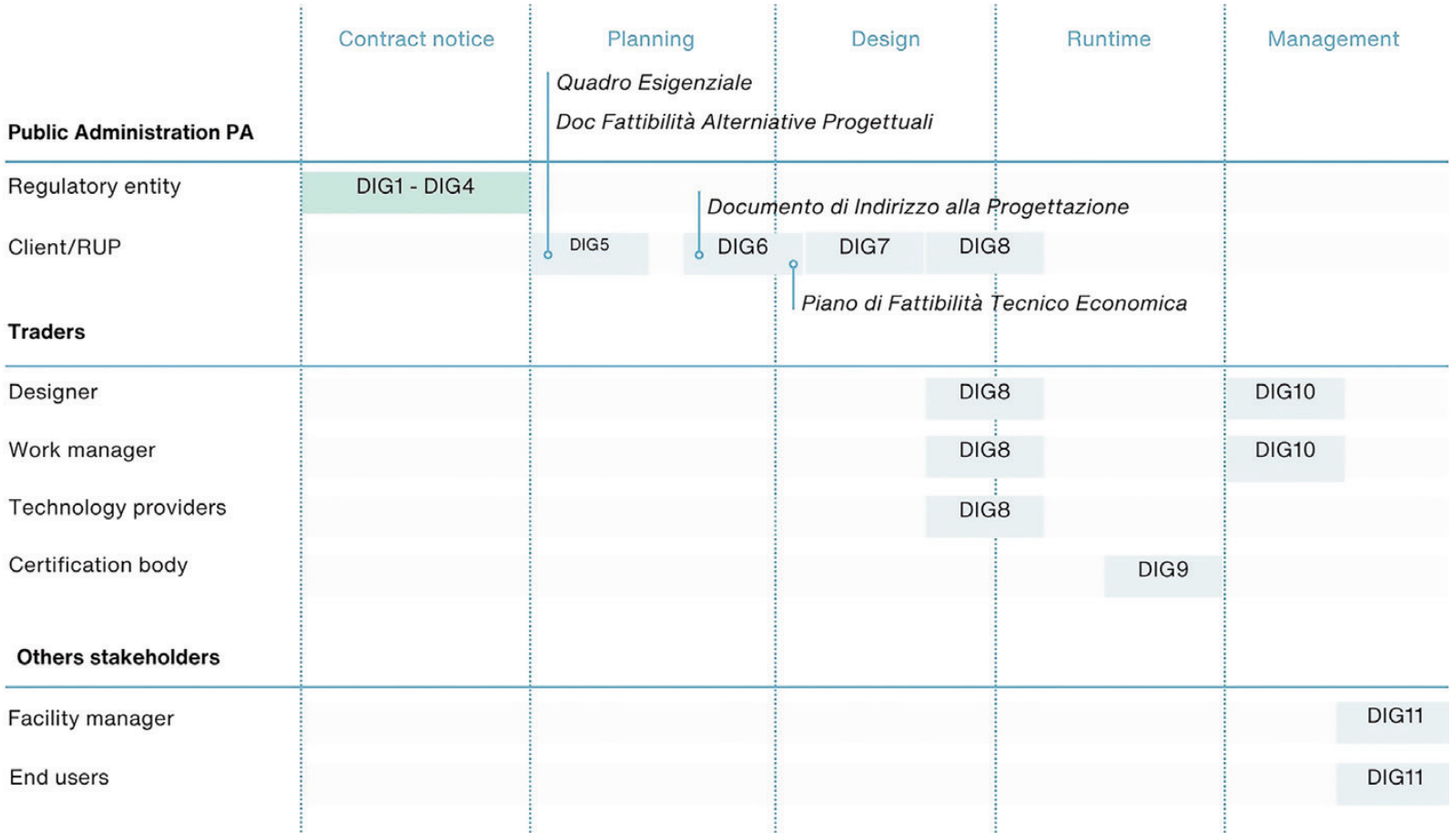


Fig. 6 | Guideline framework for green and digital transition and application of the Smart Readiness Indicator (credit: G. M. La Face, 2025).

works. This promotes consistency between European strategies and their implementation at local levels, making the public building stock a potential area for advanced experimentation. In this context, development opportunities include the potential use of the Smart Readiness Indicator as a tool to support the design and evaluation of public policies and to help build a decision-making system increasingly focused on green and digital transitions.

More specifically, the paper presents the results of Reggio Calabria's Operational Unit, which has created a dedicated section of the guidelines mentioned above by developing methods to apply the Smart Readiness Indicator across the planning, operation, and management processes of PAs' public interventions. The article details the results of the Reggio Calabria Operational Unit, which established a specific section of the guidelines, developing methodologies to incorporate the Smart Readiness Indicator, as introduced by the EPBD Directive 2024/1275 (European Parliament and Council of the European Union, 2024; Fig. 1), into the planning, design, and management processes of public authorities.

The Operational Unit, of which the authors are members, does not seek to introduce new indicators but rather to develop a framework for the experimental application of existing ones; transforming tools still in the voluntary testing phase – such as the Smart Readiness Indicator – into operational decision-making tools for public governance in building transformation. This approach helps bridge the gap between the theoretical aspects outlined in current European and national regulations on the subject and their practical implementation. Of particular importance is the proposed interaction between the planning documents required by Annex I.7 of the Public Procurement Code – the Requirements Framework, the Design Alternatives Document, and the Design Brief – and the opportunity for public clients to incorporate specific actions and/ or guidelines. These can inform decisions during the subsequent design phase and in the construction and management stages, within a broader framework for implementing environmental policies focused on energy efficiency and smartness. In this context, the Smart Readiness Indicator stands out as a potentially robust 'ecological and digital' indicator.

Two levels of potential impact from the research can be observed: in the scientific and public governance fields. The latter involves three distinct levels: i) the legal level, concerning the evolution of regulatory mechanisms; ii) the management level, aiming to enhance the capabilities of PAs; and iii) the systematic level, examining the role of public buildings as spaces for testing green and digital strategies.

The framework's potential applications include adopting it as a replicable model for developing tools such as plans, specifications, and protocols that enable PAs to measure and gradually improve the smartness of the public building stock. This approach fosters decision-making processes grounded in quantifiable, interoperable evidence, building on the concepts already explored by the authors of this paper in previous studies (Azzalin, 2024; Lauria et alii, 2025). Additionally, it highlights the scalability of the operating model at both national and European levels, supported by existing tools and effective monitoring procedures. The creation of integrated guidelines and their incorporation into expenditure assessment systems constitute essential steps in the ecological and digital transition, as well as the decarbonisation of the public building stock.

Ecological and digital transition in public environmental policies: combining energy efficiency and building smartness | Over the years, the European Commission has developed an ambitious legal framework to promote the twin ecological and digital transitions of European economic and productive systems. Regarding the relationship between energy efficiency and building smartness, from the first 2010 version to the fourth 2024 version, the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) introduces the Smart Readiness Indicator (SRI) as a benchmark for measuring a building's digital readiness.

The EPBD also connects the SRI to other operational tools such as Renovation Passports and Building Logbooks, creating an integrated ecosystem of data and digital monitoring. Under this framework, the goal of achieving climate neutrality by 2050 has led to integrated strategies, including Energy Efficiency First (European Parliament and Council of the European Union, 2018, 2023a), the Green Deal (European Commission, 2019a), the Fit for 55 (European Commission, 2021b), and the EPBD Recast (European Parliament and Council of the European Union, 2024), which updates minimum requirements for building energy performance in more rigorous terms (Fig. 2).

The Energy Efficiency First approach prioritises energy efficiency in Member States' planning and investment decisions, establishing it as a key strategy for achieving several of the 17 Sustainable Development Goals (SDGs; UN, 2015). SDG 7 (Affordable and Clean Energy), along with SDG 13 (Climate

Action), SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), and notably SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), highlight synergies and facilitate technology transfer. Meanwhile, the strategy proposed by the European Green Deal aims to have the European Union reach net-zero greenhouse gas emissions by 2050, thereby signalling the decoupling of economic growth from resource consumption (European Commission, 2020b; UNEP, 2022). However, realising these objectives largely depends on refurbishing the building stock, which is old and poorly performing, and currently accounts for 50% of total final energy consumption for heating and cooling.

In this scenario, the Renovation Wave Strategy (European Commission, 2020a) represents a turning point, significantly contributing, through its concrete implementation, to reducing greenhouse gas emissions linked to digitally-enabled sustainable transformation processes of the built heritage. Based on this strategy, the energy renovation of 35 million buildings and their transformation into efficient, intelligent assets is planned for the next decade.

Equally important is the Fit for 55 package (European Commission, 2021b), which, in promoting common standards to lower the carbon footprint, has guided the revision of the EPBD directive and the EPC, redefining energy efficiency standards for a zero-emission building stock by 2050 (European Parliament and Council of the European Union, 2024). Recent studies show that digital solutions can cut total emissions by up to 20% (WEF, 2022), recognising the integration of building automation systems, standardised according to UNI EN ISO 52120-1: 2022 and the SRI, as a vital tool for optimising energy performance, integrating smart technologies, and enhancing building adaptability (Walczyk and Ozadowicz, 2025). Meanwhile, European regulations, especially the EPBD, which requires the gradual development of nearly zero-energy buildings, are clearly boosting the smart building market, which grew from approximately $6.3 billion in 2024 to an expected $7.5 billion in 2025, with forecasts reaching $31 billion by 2033 (Ghodsian, 2025).

The European Union, employing tools such as the EPBD and the Green Taxonomy (European Parliament and Council of the European Union, 2020), along with related technical standards, is establishing an advanced regulatory framework to enhance building quality, minimise environmental impact, and boost digital resilience. This approach also addresses the aims of SDG 11, striving to make human settlements and urban areas inclusive, safe, resilient, and sustainable (Fig. 3). A renewed, contemporary strategic outlook on environmental policies is emerging, with many European public bodies adopting these guidelines and translating them into increasingly rigorous action plans that incorporate ecological and digital priorities alongside energy efficiency.

In this context, the idea of smartness, represented by the Smart Readiness Indicator as its key operational tool, is playing a crucial role. It serves both as a measure of technical efficiency and as a catalyst for innovation within the construction industry. Introduced by the European Commission in 2020, the Smart Readiness Indicator is designed to assess the smart capabilities of buildings and facilitate their transition toward more intelligent and interconnected systems. This approach addresses energy efficiency, comfort, flexibility in use, and digital interoperability (European Commission, 2020c).

Unlike other certification tools, the Smart Readiness Indicator is a composite indicator that recognises active technologies, automated management systems, and connectivity solutions. Its use also promotes the integrated adoption of additional instruments such as the Energy Performance Certificate, updated with digital parameters, the Building Logbook, and the Renovation Roadmap. These are dynamic information management tools that enable more efficient and transparent data handling through digital technologies (Capozzoli et alii, 2024). However, despite these instruments having been formally defined at the European level for some time, many Member States still implement them on a voluntary, experimental basis. In Italy, this process is supported by the New Public Procurement Code, a legislative framework that guides the ongoing transformation and innovation within the construction sector.

Recent studies (Delavar, Borgentorp and Junnila, 2025) confirm the SRI's potential to innovate public policies on existing building interventions. Additional analyses in Northern Europe highlight the importance of understanding if construction market practices align with widespread SRI use, regardless of whether the indicator becomes mandatory in the future (Autio et alii, 2024).

Additionally, the Smart Readiness Indicator is establishing itself as a technical diagnostic and decision-support tool for low-carbon buildings, as it is capable of assessing technological readiness and the functionality level of various smart services, also contributing to meet user needs, ensuring energy flexibility, and achieving energy-saving objectives (Chatzikonstantinidis et alii, 2024). This systemic perspective aims to guide, within the context of public procurement planning and management, policies and strategies for innovation, sustainability, and environmental quality in the construction sector (Del Curto, Garzulino and Turrina, 2024).

Significant obstacles to such application persist, including difficulty in accessing data, lack of benchmarks, standardised indicators, and common operational tools, compounded by fragmentation of energy efficiency and intelligence assessment methodologies, for which alternative calculation methods have also been proposed to simplify the evaluation process (Beras et alii, 2025).

Operational tools and indicators for assessing the energy efficiency and smartness of buildings: metrics and benchmarks | The research project, in its general strategic framework, involves four Operational Units (O.U.s) located in as many universities and originates from the need to support Public Administrations in defining their environmental policies within a Life-Cycle Thinking approach, bridging current gaps through the definition of operational guidelines that introduce sustainability indicators into decision-making processes. The research develops along four strategic thematic axes, one for each O.U., identified through a critical review of the development trajectories of the Italian NRP 2021-2027 and the National Recovery and Resilience Plan (NRRP), as well as an analysis of related European policies: Decarbonisation (O.U. Genoa); Resource Circularity (O.U. Bologna); LCA Metrics (O.U. Milan); Digitalisation for the Green Transition (O.U. Reggio Calabria). This latter axis takes the form of a transversal and enabling device for processes and connections between European strategies and local implementation policies, highlighting the close relationship with SDG 9.

The approach adopted by the different O.U.s shares both objectives and methodology: a) imple-

COD	Action	Phase	Implementing body and other stakeholders	Synergies
DIG1	Creation of specific skills in the field of digitalisation of procedures, BIM management and SRI calculation	long-term planning	Nation | External expert (BIM for PA)	LCA, DEC, and CIR
DIG2	Mandatory CAM – Methodologies for optimising design solutions for sustainability (LCA and LCC) – Improved energy performance – Building automation, control and monitoring system	long-term planning	Nation | Traders	LCA, DEC, and CIR
DIG3	Updating the National Digital Procurement Ecosystem (e-procurement) and the requirements in the Economic Operator Virtual File	long-term planning	Nation | Traders	LCA, DEC, and CIR
DIG4	Promotion of the Smartness strategic objective with related key performance indicator (SRI) and preparation of technical data to be included in the digital model	contract notice | planning	Region | Metropolitan City | Union of Municipalities | Municipality	LCA, DEC, and CIR (indicators)
DIG5	Integration and detail of technologies (IoT, BACS) to be used at runtime	planning | runtime	Designer | Works Manager	

Tab. 1 | Extract of the Operating Unit contribution on the smartness issues and synergies with other issues (credit: the Authors, 2025).

DIG	Promotion of strategic objectives in the QE and DOC.FAP reference documents
Phase	Planning
Implementing body	Metropolitan City
Description	The Public Administration defines the general objectives of the intervention (KPI criteria and key performance indicators), the qualitative and quantitative requirements; it provides for the integration of data into information models in accordance with the provisions of the Requirements Framework attached as Annex I.7, SECTION I, Articles 1.1a and 2 respectively.
Operational guidelines	1) Promotion of Smartness and related SRI KPI, inclusion of the following criteria: a) ENVIRONMENTAL – Reduced primary energy consumption – Installation of RES systems relevant to the RES building-production – Airborne pollutant reduction – Energy-environmental certification protocols b) SOCIAL – Cultural value / Architectural quality – Increased well-being and comfort – Thermal comfort – Increased well-being and comfort – Improvement of the conditions of use and use of work spaces c) MANAGEMENT (Governance following ESG principles) – Building Automations and Control System (BACS) – Building Management System (BMS) – Energy Management System (EMS) 2) Activation and promotion of training courses 3) Invitations to tender aimed at hiring professionals with such skills 4) Preparation of cards to be included in the DOCFAP that include the identified indicators, specifically the SRI: a) indicator compilation sheet b) indicator evaluation threshold sheet
Good practice	The State Property Agency, Calabria Regional Directorate, has prepared a feasibility document for the DOC.FAP design alternatives relating to the construction of the new Catanzaro Fire Brigade headquarters, including a sustainability assessment based on the principles of Environment / Social / Governance, a parameter linked to the Building Automation and Control System (BACS). Technical data sheets are also attached, such as the Compilation of Indicators and the Evaluation of Indicator Thresholds, in order to define and determine the aforementioned KPIs in the PFTE, final design and executive design phases.

Tab. 2 | Example of a model picture for digitalisation strategic objectives (credit: the Authors, 2025).

ment policies aimed at improving sustainability based on life-cycle assessment (LCA) criteria, considering all categories of environmental impact and all life-cycle phases; b) develop simplified yet reliable tools based on robust methodologies; c) propose Minimum Environmental Criteria and benchmark / reference targets (to be implemented in CAM-GPP, protocols, etc.); d) train Public Administration technicians through the gradual integration of LCA indicators into environmental policies; e) map barriers and obstacles (cultural, economic, regulatory, etc.), identify opportunities, and test the feasibility of the research proposals; f) define verification procedures that are feasible for PA technicians.

The general methodology is articulated into three main actions: 1) multi-scale regulatory analysis (critical study of European and national legislation, aimed at mapping objectives, tools, and constraints); 2) empirical investigation within the reference context, developed through a series of interviews with public stakeholders at different institutional levels (Lombardy Region and City of Milan; Liguria Region; Emilia-Romagna Region and City of Bologna; Calabria Region and Metropolitan City of Reggio Calabria), which made it possible to verify recurring criticalities and the capacity (potential and limitations) of Public Administrations to adopt and integrate digital and environmental tools into their practices; 3) development of guidelines (a replicable methodological framework) capable of supporting Public Administrations in promoting environmental policies consistent with European directives and applicable throughout the life-cycle of public works. The guidelines are divided into four sections, and the set of strategies identified for each section is further articulated into two macro-areas: strategic guidance actions (at the state and institutional levels) and operational strategies (applicable by contracting authorities and technical supply-chain stakeholders). The result is a framework that provides benchmarks, indicators, monitoring tools, and recommendations for implementing public policies. Its structure also takes into account specific critical issues: the lack of reward criteria and incentives in public tenders; the absence of a common language between technical indicators and administrative documentation; and the lack of technical skills for using digital tools.

Within this context and in line with the objectives of the research project, the actions developed by the O.U. of Reggio Calabria aimed to introduce the Smart Readiness Indicator as a guiding criterion and indicator across the planning, design, implementation, and management phases of the public building stock. The scope of application is the ecosystem defined by the new EPBD directive on energy efficiency and smartness, with particular attention to the drafting of the aforementioned planning acts required by the new Public Procurement Code, from the Requirements Framework to the Design Guidance Document, within a Life-Cycle Thinking perspective. The methodology proposed by the O.U. of Reggio Calabria integrates comparative research and field experimentation through: 1) application of the SRI based on EPBD guidelines, calculating it through a checklist of smart services (from 27 to 54, depending on the complexity of the building), assessed by level of functionality and impact (energy efficiency, user comfort, demand-side flexibility); 2) contextualisation of European tools (Smart Readiness Indicator, digital Energy Performance Certificate, Building Logbook, Digital Twin) for Public Administrations; 3) mapping the possibilities for integrating the SRI and other digital tools into planning and management documents; 4) defining operational criteria and digital verification protocols to support the Project Manager (RUP) and designers.

The integration of IoT and BIM technologies in the construction sector enables the optimisation of construction processes, improvement of efficiency, and reduction of resource waste through intelligent building management and automated control (Tang et alii, 2019; Rangasamy and Yang, 2024). At the same time, the transition toward a circular built environment, facilitated and supported by digital tools, reduces resource consumption, emissions, and waste production, fostering research clusters on circular building components, construction materials, design for disassembly, and adaptive reuse projects (Heisel and Rau-Oberhuber, 2020). In this context, the integration of the Smart Readiness Indicator is

embedded within a broader holistic evaluation of building performance, in synergy with other parameters already introduced at the European level – Renewable Energy Ratio (European Parliament and Council of the European Union, 2023b), Primary Energy Non-Renewable, and Primary Energy Factors (Amann et alii, 2023); this allows alignment between European objectives, operational tools, and decision-making processes, transforming the Smart Readiness Indicator from a technical element into a strategic environmental and digital policy instrument.

Guidelines to support the energy efficiency and smartness of buildings: structure, applicability levels, and reward criteria | The Operational Unit (O.U.) of Reggio Calabria has not limited itself to testing individual digital indicators; rather, it has developed a broader operational framework aimed at adapting and transferring European digital tools to Public Administration procedures. In particular, the green and digital actions and strategies (DIG) do not operate as isolated fields but integrate transversally with the other three strategic dimensions of the guidelines: resource circularity (CIR), decarbonisation (DEC), and LCA/LCC assessment (Fig. 4).

The proposal of the O.U. of Reggio Calabria is articulated into guidance actions and operational strategies (DIG 1-11) designed for different territorial scales, intervening in every phase of the cycle, from planning / policy to management / end-of-life (Figg. 5, 6). The guidance actions (DIG) aim to establish a regulatory and organisational framework that strengthens process traceability (CIR), increases transparency in procurement procedures, and promotes the systematic adoption of environmental and emission-reduction criteria (DEC).

Their theoretical premises and guiding principles include: a) Updating the national e-procurement ecosystem, envisaging the adaptation of the Virtual Register of Economic Operators to include requirements related to digitalisation, sustainability (LCA/LCC), material circularity, and decarbonisation; this will strengthen transparency and traceability of procurement processes; b) The mandatory nature of Minimum Environmental Criteria (CAM), transitioning from 'reward-based' to 'mandatory' CAM for building design, with specific reference to the optimisation of design solutions (LCA and LCC), improvement of energy performance, and adoption of automation and monitoring systems; c) The BIM Information Specifications, requiring contracting authorities to include within BIM Specifications specific requirements concerning the four core themes (digitalisation, circular economy, decarbonisation, LCA), thus supporting smart data and consumption management; d) Digital skills in Public Administration, highlighting the need to strengthen internal competencies through training and the introduction of new professional figures (BIM manager, SRI specialist), reducing reliance on external consultancy.

The operational strategies enable the translation of these principles into practice throughout the entire process, introducing digital tools for design (BIM, IoT, BACS), performance certification (Smart Readiness Indicator), and life-cycle management (maintenance plans, data monitoring), ensuring consistency between design, execution, and management. Specifically, the guidelines propose:
– Adoption of Smartness, which requires Public Administrations to define Key Performance Indicators (KPIs) for each theme, incorporating them into programming documents and digital information models; the objectives include reducing environmental impact (energy, RES, emissions), enhancing comfort and architectural quality (social dimension), and improving system management through BACS and BMS (governance dimension);
– Inclusion of technical standards and CAM in the programming phase, stipulating that technical requirements related to the SRI and CAM be incorporated from the drafting of the Design Brief and the Technical-Economic Feasibility Plan;
– Adoption of Smartness in the design phase, which emphasises the critical role of the Single Procurement Officer in verifying coherence between requirements and objectives, and ensuring that smartness criteria remain integrated throughout the entire design process;
– Implementation of smart technological components, requiring the designer and works director to specify and incorporate the digital technologies to be applied, maintaining consistency between design and construction, and ensuring compatibility with the technical standards identified according to SRI impact criteria;
– Calculation and certification of the Smart Readiness Indicator, involving an external certifier responsible for calculating, verifying, and issuing certification of the building's smartness level, ensuring transparency and integrity in assessment procedures;
– Coherence of the Maintenance Plan, which must be developed in alignment with smartness indicators to guarantee that the performance levels set out during the design phase are sustained over time;
– Data management involving not only the facility manager but also the end user, who participates in monitoring operational parameters and data sharing, in compliance with GDPR, promoting conscious and participatory building management.

This section of the guidelines has expanded and incorporated other contributions, highlighting the multilevel and intersectoral character of digitalisation, both as a regulatory instrument for Public Administration and as an operational tool for the construction supply chain (Tab. 1). The process of aligning and systematising proposals for each strategic dimension has resulted in the development of synoptic frameworks related to action domains across different territorial scales, including the building sector, and organised by intervention phases.

Their structure allows for a comprehensive framework to be provided to Public Administrations covering the entire process, or for thematic pathways to be followed for individual strategies. Accompanying the material is a reading guide designed for Public Administrations aimed at economic operators involved in specific actions. Each proposal is detailed in an in-depth fact sheet that offers guidance on how to implement it and references to best practices; these fact sheets can be either collective or mono-thematic. An example of a fact sheet related to the operational strategy 'Promotion of Smartness and related KPIs' is shown in Table 2.

Conclusions and guidelines for introducing the Smart Readiness Indicator as a strategic tool | This paper examined the ecological and digital transition of public building stock, emphasising the need to bridge the gap between the European regulatory framework and its practical implementation by the European Commission (2019b, 2020b). Specifically, it has underscored the strategic importance of existing tools, such as the Smart Readiness Indicator, when systematically incorporated into PA decision-making, programming and management processes. This integration is crucial for both the dual ecological and digital transformation of urban settlements and the building sector, as well as for achieving decarbonisation targets by 2050 (Ness, 2024; WEF, 2022; Ghodsian, 2025).

Building upon the PRIN 'Better Policy' project and the development of a methodological framework that resulted in operational guidelines to supplement environmental and digital indicators, this work advances the scholarly discussion on smartness and energy efficiency. It provides a practical operational tool for defining a new wave of public environmental policies that incorporate 'green and digital' criteria from the programming stage through to design, construction, and management, all within a Life Cycle Thinking approach (Marzinger and Osterreicher, 2019; Fokaides, Panteli and Panayidou, 2020; Autio et alii, 2024).

The inclusion of the SRI among guiding criteria in drafting the programming documents required by the new Public Procurement Code indeed constitutes one of the original aspects of the proposed guidelines structure, identifying specific operational characteristics for each phase: a) in the programming phase it is configured as an element for defining scenarios and design alternatives; b) in the verification and validation phase it becomes a parameter for measuring digital readiness and technical efficiency; c) in the management phase it is adopted as support for continuous performance monitoring.

This integration and capacity for interaction across different phases, if correctly structured, could effectively enable, in the medium to long term, alignment between European objectives, operational tools and decision-making processes. The proposed framework is indeed aligned with multiple SDGs of the 2030 Agenda, contributing not only to energy transition (SDG 7) and climate action (SDG 13), but also to the development of sustainable cities and communities (SDG 11), and the promotion of infrastructural innovation (SDG 9), configuring itself as a holistic approach to built heritage sustainability (UN-Habitat, 2020).

Simultaneously, the work has highlighted several critical issues, including difficulty in accessing data, heterogeneity in their collection and management, a lack of standardised benchmarks, and insufficient technical training within PAs. These issues underline the need to enhance the PA technicians' skills in regulatory and management areas by providing digital tools, verification checklists, interoperability with BIM models, and open-access platforms that can be directly integrated into implementation processes.

There are three levels of research impact on the territory: 1) regulatory, aligned with EPBD 2024, which mandates Smart Readiness Indicators and digital Logbooks; 2) managerial, via digitalisation as a means of developing competencies within PAS and improving the effectiveness of Single Procurement Officers; 3) systemic, with digital technology acting as a transversal and enabling layer for resource circularity and decarbonisation, promoting synergy and coherence in application.

The identification of impacts enables the delineation of specific development prospects and potential future research advances on the topic. There

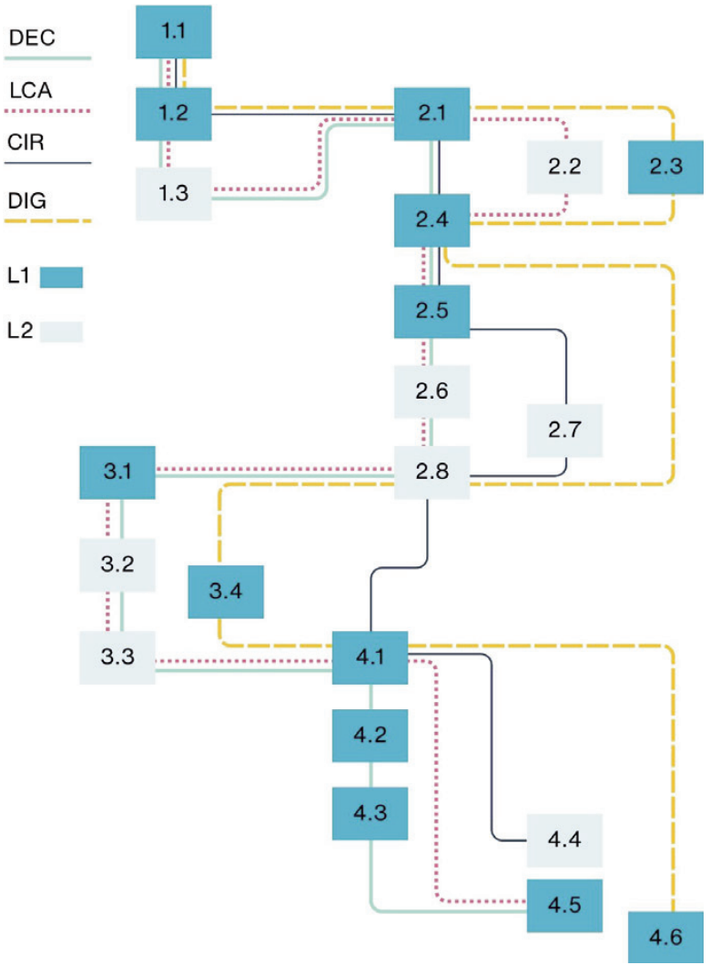


Fig. 7 | Reading map of the strategic guidance actions section of the guidelines, in relation to the thematic axes and action priority, level 1 or 2 (credit: G. M. La Face, 2025).

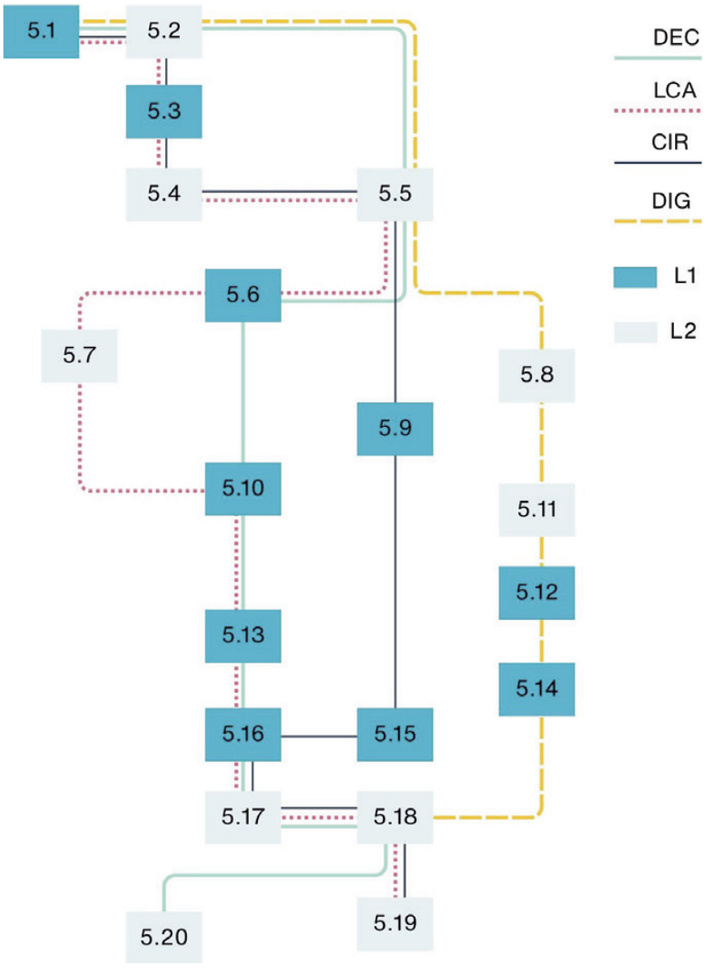


Fig. 8 | Reading map of the operational strategies section of the guidelines, in relation to the thematic axes and action priority, level 1 or 2 (credit: G. M. La Face, 2025).

are four main directions: 1) standardisation of the framework, through the definition of templates, technical fact sheets, and reward criteria that can be effectively utilised in the programming documents required by the New Public Procurement Code; 2) national and European scalability of the DIG model, with the possibility of adaptation in different regulatory and administrative contexts; 3) integration of digital tools into public expenditure instruments and monitoring mechanisms; 4) training and enhancement of PA technicians' competencies for using digital tools.

In parallel, there is a need for an operational testing phase of the guidelines on pilot cases, with active involvement of PA across all stages of the building life cycle: from programming to post-intervention management. This would help reduce the gap between regulatory prescriptions and operational practice. The proposed model, with its operational actions, is indeed transferable, scalable, and replicable in different contexts, providing a methodological reference for future applications at both national and European levels. In this sense, digitalisation does not merely serve as technical support but also functions as an enabling device for the effectiveness of public policies on decarbonisation and circularity, ensuring and promoting coherence between European strategies and local implementation.

Acknowledgements

This paper is the result of a shared reflection among the Authors, all of whom are involved in the PRIN 2022 'Better Policy' research project, with different roles and responsibilities. Nevertheless, it is acknowledged that M. Lauria curated the methodological structure of the paper, the introduction, and its supervision; M. Azzalin curated the writing of the entire paper and the sections 'Operational tools and indicators for assessing the energy efficiency and smartness of buildings: metrics and benchmarks' and 'Conclusions and guidelines for introducing the Smart Readiness Indicator as a strategic tool'; F. Giglio curated the section 'Ecological and digital transition in public environmental policies: combining energy efficiency and building smartness' as well as the related update of the references; M. G. La Face developed, in the section 'Guidelines to support the energy efficiency and smartness of buildings: structure, applicability levels, and reward criteria', the proposed guidelines, developed by all research participants, and curated the iconographic apparatus of the entire paper.

This work forms an integral part of the PRIN 2022 research project 'Better Policy' – Building Environmental Tools To Empower Responsive Policies Outreaching LifeCYcle (2023-2025), funded under the European Union – NextGeneration EU, PRIN 2022, Ministry of Universities and Research; MUR: 2022PZ5MWJ_002 – CUP: J53D23009470006. The project involves four research units: University of Genoa, Department of Architecture and Design (DAD); Politecnico di Milano, ABC Department – Architecture, Built Environment and Construction Engineering; University of Bologna, Department of Architecture (DA); 'Mediterranea' University of Reggio Calabria, Department of Civil, Energy, Environmental and Materials Engineering (DICEAM).

References

Amann, C., Torres, P., Boldizsar, G., Hofer, G., Stumpf, W., Leutgob, K. and van Nuffel, L. (2023), *Support to primary energy factors review (PEF) – Final report*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2833/404077 [Accessed 30 September 2025].

Autio, P., Borgentorp, E., Pulkka, L. and Junnila, S. (2024), "Smart Readiness Indicator: Ready for Business? Evidence from a Northern EU Country", in *Buildings*, vol. 14, issue 11,

article 3638, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14113638 [Accessed 30 September 2025].

Azzalin, M. (2024), "Indicatore smart readiness per l'edilizia – Asset digitali per la transizione energetica | Smart readiness for buildings – Digital asset for energy transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 148-159. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15112024 [Accessed 30 September 2025].

Beras, M., Brezocnik, M., Zuperl, U. and Kovacic, M. (2025), "Developing an Alternative Calculation Method for the Smart Readiness Indicator Based on Genetic Programming and Linear Regression", in *Buildings*, vol. 15, issue 10, article 1675, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings15101675 [Accessed 30 September 2025].

Capozzoli, A., Piscitelli, M. S., Maggiulli, M. and Pavan, A. (2024), *Smart Building – La digitalizzazione per il Net Zero*, Green Building Council Italia, Milano. [Online] Available at: gbcitalia.org/public_documents/GBCItalia_PositionPaper_BACS-BEMS_WEB.pdf [Accessed 30 September 2025].

Chatzikonstantinidis, K., Giama, E., Fokaides, P. A. and Papadopoulos, A. M. (2024), "Smart Readiness Indicator (SRI) as a Decision-Making Tool for Low Carbon Buildings", in *Energies*, vol. 17, issue 6, article 1406, pp. 1-18. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en17061406 [Accessed 30 September 2025].

Del Curto, D., Garzulino, A. and Turrina, A. (2024), "Sostenibilità e transizione energetica – Prospettive per un approccio integrato al patrimonio costruito | Sustainability and energy transition – Perspectives for an integrated approach to the built heritage", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 114-123. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1582024 [Accessed 30 September 2025].

Delavar, T., Borgentorp, E. and Junnila, S. (2025), "The Smart Buildings Revolution – A Comprehensive Review of the Smart Readiness Indicator Literature", in *Applied Sciences*, vol. 15, issue 4, article 1808, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app15041808 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2024), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – State of the Digital Decade 2024*, document 52024DC0260, COM/2024/260 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52024DC0260# [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2021a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – 2030 Digital Compass – the European way for the Digital Decade*, document 52021DC0118, COM/2021/118 final. [Online] Available at eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0118 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2021b), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Fit for 55 – Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality*, document 52021DC0550, COM/2021/550 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0550 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2020a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A Renovation Wave for Europe – Greening our buildings, creating jobs, improving lives*, document 52020DC0662, COM/2020/662 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2020b), *Reflection Paper Towards a Sustainable Europe by 2030*, document 52019DC0022, COM/2019/22 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A52019DC0022 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2020c), *Commission Delegated Regulation (EU) 2020/2155 of 14 October 2020 supplementing Directive (EU) 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council by establishing an optional common European Union scheme for rating the smart readiness of buildings*, document 32020R2155, C/2020/6930. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2020/2155/oj [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2019a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2019b), *Urban Agenda for the EU – Multi-level governance in action*. [Online] Available at: ec.europa.eu/regional_policy/en/information/publications/brochures/2019/urban-agenda-for-the-eu-multi-level-governance-in-action [Accessed 30 September 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2024), *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast)*, document 32024L1275. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj [Accessed 30 September 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2023a), *Directive (EU) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast)*, document 32023L1791. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj [Accessed 30 September 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2023b), *Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652*, document 32023L2413. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj [Accessed 30 September 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2020), *Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088*, document 32020R0852. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj [Accessed 30 September 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2018), *Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Governance of the Energy Union and Climate Action, amending Regulations (EC) No 663/2009 and (EC) No 715/2009 of the European Parliament and of the Council, Directives 94/22/EC, 98/70/EC, 2009/31/EC, 2009/73/EC, 2010/31/EU, 2012/27/EU and 2013/30/EU of the European Parliament and of the Council, Council Directives 2009/119/EC and (EU) 2015/652 and repealing Regulation (EU) No 525/2013 of the European Parliament and of the Council*, document 32018R1999. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32018R1999 [Accessed 30 September 2025].

Fokaides, P. A., Panteli, C. and Panayidou, A. (2020), "How Are the Smart Readiness Indicators Expected to Affect the Energy Performance of Buildings – First Evidence and Perspectives", in *Sustainability*, vol. 12, issue 22, article 9496, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12229496 [Accessed 30 September 2025].

Ghodsian, N. (2025), "Top 7 IoT Building Automation Trends Transforming Smart Buildings", in *neuroject*, 08/04/2025. [Online] Available at: neuroject.com/iot-building-automation/ [Accessed 30 September 2025].

Heisel, F. and Rau-Oberhuber, S. (2020), "Calculation and evaluation of circularity indicators for the built environment using the case studies of UMAR and Madaster", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 243, article 118482, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118482 [Accessed 30 September 2025].

IEA – International Energy Agency (2021), *Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector*. [Online] Available at: iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf [Accessed 30 September 2025].

Lauria, M., Azzalin, M., Giglio, F. and La Face, G. M. (2025), "Responsive Public Policies for Smart and Sustainable Buildings – An Experimental Application of the Smart Readiness Indicator", in *Buildings*, vol. 15, issue 12, article 2002, pp. 1-22. [Online] Available at: doi org/10.3390/buildings15122002 [Accessed 30 September 2025].

Marzinger, T. and Osterreicher, D. (2019), "Supporting the Smart Readiness Indicator – A Methodology to Integrate a Quantitative Assessment of the Load Shifting Potential of Smart Buildings", in *Energies*, vol. 12, issue 10, article 1955, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en12101955 [Accessed 30 September 2025].

Ness, D. (2024), "La decarbonizzazione degli edifici sarà sufficiente? Limitare e ridistribuire l'aumento di superficie costruita | Will decarbonising buildings be enough? Constrain and redistribute growth in floor area", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 84-97. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1562024 [Accessed 30 September 2025].

Presidente della Repubblica (2023), "Decreto Legislativo 31 marzo 2023, n. 36 – Codice dei contratti pubblici in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al Governo in materia di contratti pubblici (23G00044), entrata in vigore del provvedimento 01/04/2023 (Ultimo aggiornamento all'atto pubblicato il 09/09/2025)", in *Gazzetta Ufficiale*, n. 77 del 31/03/2023 – Suppl. Ordinario n. 12. [Online] Available at: normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2023;036 [Accessed 30 September 2025].

Rangasamy, V. and Yang, J.-B. (2024), "The convergence of BIM, AI and IoT – Reshaping the future of prefabricated construction", in *Journal of Building Engineering*, vol. 84, article 108606, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108606 [Accessed 30 September 2025].

Tang, S., Shelden, D. R., Eastman, C. M., Pishdad-Bozorgi, P. and Gao, X. (2019), "A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration – Present status and future trends", in *Automation in Construction*, vol. 101, pp. 127-139. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020 [Accessed 30 September 2025].

UNEP – United Nations Environment Program (2022), *Adaptation Gap Report 2022 – Too little, too slow – Climate adaptation failure puts world at risk*. [Online] Available at: unep.org/resources/adaptation-gap-report-2022 [Accessed 30 September 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*, A/RES/70/1. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 30 September 2025].

UN-Habitat (2020), *World Cities Report 2020 – The Value of Sustainable Urbanization*, United Nations Human Settlements Programme, Nairobi. [Online] Available at: unhabitat.org/world-cities-report-2020-the-value-of-sustainable-urbanization [Accessed 30 September 2025].

UNI EN ISO 52120-1:2022, *Energy performance of buildings – Contribution of building automation, controls and building management – Part 1 – General framework and procedures*. [Online] Available at store.uni.com/en/uni-en-iso-52120-1-2022 [Accessed 30 September 2025].

Walczyk, G. and Ozadowicz, A. (2025), "Moving Forward in Effective Deployment of the Smart Readiness Indicator and the ISO 52120 Standard to Improve Energy Performance with Building Automation and Control Systems", in *Energies*, vol. 18, issue 5, article 1241, pp. 1-28. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en18051241 [Accessed 30 September 2025].

WEF – World Economic Forum (2022), "Digital solutions can reduce global emissions by up to 20%. – Here's how", in *weforum*, 23/05/2022. [Online] Available at: weforum.org/agenda/2022/05/how-digital-solutions-can-reduce-global-emissions [Accessed 30 September 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 276-293
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18162025

ARTICLE INFO

Received 13 September 2025
Revised 22 October 2025
Accepted 24 October 2025
Published 30 December 2025

LCA E DOMANDA ENERGETICA COMPLESSIVA DEI PRODOTTI EDILI IN CANAPA

LCA AND CUMULATIVE ENERGY DEMAND OF HEMP BUILDING PRODUCTS

Maria Chiara Capasso

ABSTRACT

Il settore edile è uno dei più impattanti per l'ambiente e per ridurne il consumo energetico si sono attuati sforzi che si traducono anche nell'utilizzo di materiali edili a bassa energia incorporata, come la canapa. Per validare la conformità della canapa come materia prima idonea alla costruzione di 'edifici verdi' è stata condotta una valutazione del ciclo vita del blocco in calce e canapa e applicata la metodologia Cumulative Energy Demand per valutare l'impatto del blocco sulle risorse energetiche. La valutazione ha rilevato un ridotto impatto ambientale, con bassa influenza sulle diverse fonti energetiche e peso leggermente maggiore su quelle non rinnovabili. In questo modo il blocco risulta idoneo per l'efficientamento energetico e per il raggiungimento degli SDG 6 e 7, riducendo i consumi del settore edile e consentendo un più equo accesso all'energia e all'acqua.

The building sector is one of the most environmentally impactful; to reduce its energy consumption, various efforts have been undertaken, including the use of construction materials with low embodied energy, such as hemp. To validate hemp's suitability as a raw material for the construction of 'green buildings', a Life Cycle Assessment (LCA) of hemp-lime blocks was carried out through the application of the Cumulative Energy Demand (CED) methodology to assess the block's impact on energy resources. The assessment revealed a low environmental impact, with limited influence on different energy sources and a slightly higher weight on non-renewable ones. The block, therefore, proves suitable for energy-efficiency improvements and for achieving SDGs 6 and 7 by reducing the building sector's energy consumption and enabling more equitable access to energy and water.

KEYWORDS

canapa, architettura sostenibile, energia incorporata, domanda di energia complessiva, valutazione del ciclo vita

hemp, sustainable architecture, embodied energy, cumulative energy demand, life cycle assessment



Maria Chiara Capasso, Architect and PhD, is a Research Fellow at the Department of Architecture, 'G. d'Annunzio' University of Chieti-Pescara (Italy). She conducts research primarily in Architectural Technology, with a specific focus on the sustainable development of architectural systems. E-mail: mariachiaracapasso@unich.it

Nell'ambito degli Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile (SDGs) dell'Agenda 2030 (UN, 2015) si pone l'attenzione sulla necessità di assicurare a tutta la popolazione su scala globale l'accesso alle risorse energetiche e idriche che, rispetto agli SDG 7 (assicurare a tutti l'accesso a sistemi di energia economici, affidabili, sostenibili e moderni) e 6 (garantire a tutti la disponibilità e la gestione sostenibile dell'acqua e delle strutture igienico-sanitarie), in ambito architettonico si traduce nell'urgenza di ridurre i consumi di energia e di acqua durante l'intero ciclo vita dell'edificio. Secondo studi condotti a livello globale il settore edile è responsabile dell'utilizzo di 61 miliardi di tonnellate di acqua (Huang et alii, 2024), del 34% della domanda energetica e del 37% delle emissioni globali di anidride carbonica legate all'energia impiegata per le attività di costruzione e produzione dei materiali (UNEP, 2024). È da considerare inoltre che, nonostante la transizione energetica in atto per la sostituzione dei combustibili fossili con fonti rinnovabili, dal 2010 al 2023 il loro utilizzo negli edifici è aumentato (IEA, 2023; Fig. 1).

Per ridurre emissioni e consumi energetici del settore edile sono state elaborate diverse strategie, direttive, norme e standard e sono stati stanziati finanziamenti a livello internazionale, europeo e nazionale: dalle proposte del Green Deal Europeo (European Commission, 2019), tradotto nel Nuovo Bauhaus Europeo (European Commission, 2023, 2021c), all'ultima revisione della Direttiva Case Green (European Parliament and Council of the European Union, 2024) e al pacchetto Fit for 55 (European Commission, 2021a), che forniscono i principali obiettivi per la realizzazione di edifici a emissione zero da raggiungere entro il 2050, fino ai finanziamenti della Next Generation Europe (European Parliament, 2020) e al Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) italiano (MIMIT, 2023).

Nonostante questi sforzi il settore edile risulta ancora in ritardo nel raggiungimento della decarbonizzazione entro il 2050, in quanto il processo di cambiamento è eccessivamente lento (UNEP, 2024), probabilmente perché focalizzato sulla dimensione operativa dei manufatti edili, a discapito dell'attenzione verso l'intero ciclo vita delle costruzioni (Palumbo, Romano and Gallo, 2024). È invece fondamentale considerare che il consumo energetico di un edificio non è legato prevalentemente alla sua fase d'uso (Cabeza et alii, 2014), ma dipende dall'energia incorporata, ovvero dall'energia necessaria a produrre un'unità di prodotto.

Una possibile risposta alla realizzazione di 'edifici ad energia quasi zero' viene quindi dall'impiego di materiali a bassa energia incorporata (Arrigoni et alii, 2017); infatti del 34% della domanda energetica globale richiesta dal settore edile il 4% è rappresentato dall'energia impiegata per la lavorazione delle materie prime e la successiva produzione di cemento, acciaio, alluminio, mattoni e vetro, mentre del 37% delle emissioni di gas serra globali del settore edile il 7-9% è correlato alla produzione di questi materiali (UNEP, 2024); infine il 50% delle emissioni complessive di carbonio nei nuovi edifici è associato alle emissioni incorporate nei materiali (WBCSD and ARUP, 2023).

Da questi dati emerge la necessità da un lato di progettare gli edifici attingendo a materie prime rinnovabili e con basso valore di energia incorporata, attraverso l'impiego di materiali derivati da processi di approvvigionamento e trasformazione semplici, dall'altro di privilegiare soluzioni a secco per la dismissione ed il disassemblaggio della maggior parte di elementi e componenti edilizi a fine vita, garantendone recupero, riutilizzo o riciclo. Con tali obiettivi è possibile indagare gli scenari di fine vita dei prodotti da costruzione già dalle prime fasi del processo, quando si configurano le strategie progettuali (Finch et alii, 2021) e si selezionano accuratamente i materiali (Franzoni, 2011) da includere nelle valutazioni di impatto.

Per perseguire questi obiettivi e ridurre emissioni e consumi energetici del settore edile una fra le possibili soluzioni è l'impiego di materiali di origine naturale, derivanti da risorse rinnovabili o da biomasse vegetali (Melià et alii, 2014). In tale ottica il presente contributo rivolge l'attenzione a materiali dal basso contenuto di energia incorporata, come la canapa, e alla necessità di utilizzare la LCA (Life Cycle Assessment) per valutare aspetti ambientali ed energetici dei materiali.

Nello specifico ad oggi gli studi in campo edile hanno esteso le possibilità di scelta di materiali a basse emissioni di carbonio, ma malgrado questi ampliamenti si tratta di materiali ancora poco utilizzati (Aldersoni et alii, 2025), di conseguenza è necessario incrementare gli studi del settore, al fine di dimostrare e validare le performance di questi materiali da un punto di vista prestazionale ed ambientale (Bungau et alii, 2022), approfondendo l'influenza che hanno sull'impiego dell'energia e sulle emissioni di carbonio (Dou et alii, 2024; Madessa et alii, 2024; Li et alii, 2023).

Il contributo è strutturato in sezioni: la prima riporta una panoramica dei benefici generati dall'impiego della canapa in edilizia, anche con riferimenti a lavori già condotti dalla comunità scientifica; la seconda introduce lo strumento di valutazione LCA e la metodologia CED (Cumulative Energy Demand); la terza presenta l'applicazione della metodologia CED al blocco in calce e canapa, i risultati e le criticità emerse durante la valutazione; nella conclusione si elaborano riflessioni generali e sviluppi futuri.

Obiettivi della ricerca | Nonostante il numero di ricerche sui materiali a basse emissioni di carbonio sia in aumento, come esplicitato anche da Aldersoni et alii (2025), persistono alcune lacune. Pertanto il presente studio si prefigge di indagare le connessioni tra la scelta del materiale da costruzione e il consumo energetico per la cui quantificazione viene applicata la metodologia CED, in modo da poter integrare le informazioni a supporto della progettazione architettonica sostenibile. In questo modo si raggiunge l'obiettivo di aggiungere input importanti a sostegno dell'utilizzo dei materiali edili derivanti dalla canapa e utili per le diverse figure professionali del settore delle costruzioni, dalle aziende produttrici agli architetti ed ingegneri, fino alla classe dirigente. La metodologia CED viene impiegata infatti per misurare i consumi diretti e indiretti in mega joule (MJ) durante il ciclo di vita di un sistema, di un servizio o di un prodotto e pertanto risulta un indicatore fondamentale per stimare l'energia primaria consumata per la realizzazione di un'unità di prodotto (Samadikun, Syafrudin and Whayuni, 2024). Questo lavoro si propone quindi di approfondire l'incidenza che il ciclo di vita di prodotti edili a base di canapa ha sulle principali categorie energetiche, in modo da analizzare e restituire un'adeguata panoramica su aspetti sempre più importanti nella scelta dei prodotti derivanti da quelli che una volta erano ritenuti scarti dell'attività agricola, come il canapulo (legno di canapa).

Punti di forza e barriere nell'impiego della canapa | Nel settore edile viene adoperata la 'Cannabis sativa', una pianta potenzialmente a scarto zero (Aluigi and Viganò, 2016), dal cui fusto vengono estratte fibre e canapulo utili per la realizzazione di prodotti da costruzione (Fig. 2). Considerando il ciclo vita della canapa si evidenziano alcuni aspetti significativi: la piantagione di 'Cannabis sativa' non necessita di particolari cure ed attenzioni, di acqua per l'irrigazione, di pesticidi e fertilizzanti o altre sostanze chimiche che inquinano suolo e falde acquifere (InterChanvre, 2020) e la fase di produzione di semilavorati per l'edilizia prevede pochi e semplici passaggi. Inoltre, le piantagioni di canapa assorbono anidride carbonica dall'atmosfera: un ettaro di terreno coltivato a canapa è in grado di catturare, in circa sei mesi, 22 tonnellate di anidride carbonica, valore particolarmente elevato se confrontato con quello di foreste e altre colture più diffuse (Adesina et alii, 2020).

Questa elevata capacità di stoccare la CO_2 contribuisce ad avere prodotti per l'edilizia 'carbon negative', in quanto una parete in calce e canapulo, nonostante le emissioni generate nella fase di coltivazione e produzione (Fig. 3), è in grado di stoccare 36,08 kg di CO_{2eq} (Ip and Miller, 2012). Lo studio condotto da Nazri e Woods (2025) evidenzia infatti che i materiali isolanti in canapa hanno un elevato potenziale nel ridurre l'impatto ambientale dei materiali edili, soprattutto se paragonati a fibra di vetro, lana di roccia, EPS e XPS. Inoltre la canapa è una pianta con un ciclo di vita annuale, aspetto significativo se si considera l'ampio utilizzo di risorse naturali non rinnovabili e sempre più scarse (Ding, 2014), con conseguenti risvolti negativi sull'oscillazione dei prezzi delle materie prime (Fig. 4), sulla perdita di biodiversità globale e sullo stress idrico (Haigh, 2023).

Tutte le proprietà riscontrate nei prodotti edili in canapa consentono di considerarla una materia prima con diversi punti di forza: a) sotto il profilo ambientale, sia a livello di coltivazione che di prodotto finale per l'edilizia; b) sotto il profilo economico in quanto ha un elevato rendimento sia per il terreno di coltura che per le piantagioni, non produce scarti e richiede pochissimi input durante tutto il ciclo vita (prodotti fitosanitari, acqua ed energia) e infine costituisce una filiera potenzialmente autonoma; c) sotto il profilo sociale ed etico, in quanto l'incremento della filiera creerebbe nuovi posti di lavoro e l'assenza di sostanze nocive non danneggierebbe lavoratori e consumatori (InterChanvre, 2020).

Le barriere che frenano l'impiego diffuso dei prodotti a base di canapa nel settore edile possono essere individuate in diversi aspetti tra cui la carenza di filiere produttive, la presenza di pregiudizi verso una materia prima considerata una 'droga', la diffidenza da parte dei professionisti del settore (Capasso et alii, 2024) e diverse carenze normative (Aluigi and Viganò, 2016). A tal riguardo Jami, Karade e Singh (2019) segnalano l'opportunità di inserire i calcestruzzi a base di canapa negli standard edilizi, in quanto prodotti in grado di influenzare positivamente l'architettura, inoltre Barbhuiya e Bhusan Das (2022) propongono la denominazione 'bio-based materials with carbon capture and storage' per identificare materiali con elevate capacità di stoccare carbonio, richiamando l'attenzione su materiali derivanti da biomassa animale o vegetale in grado di contribuire anche alla biodiversità e all'attivazione di filiere produttive locali (Morpurgo, 2024). Attualmente sono molteplici i prodotti edili presenti sul mercato che

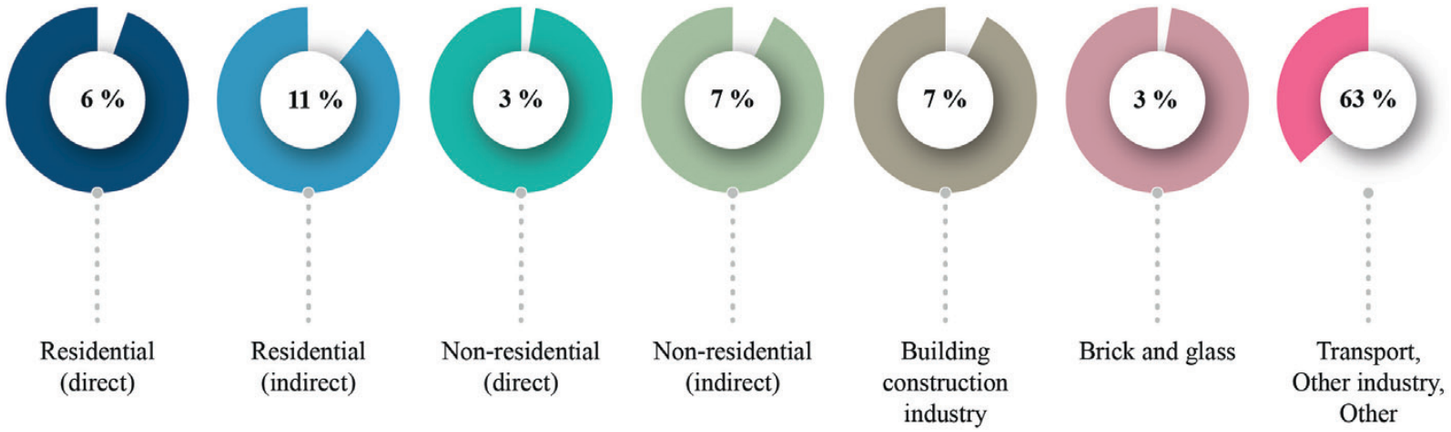


Fig. 1 | Construction sector emissions in 2022 (source: UNEP, 2024; adapted by the Author).

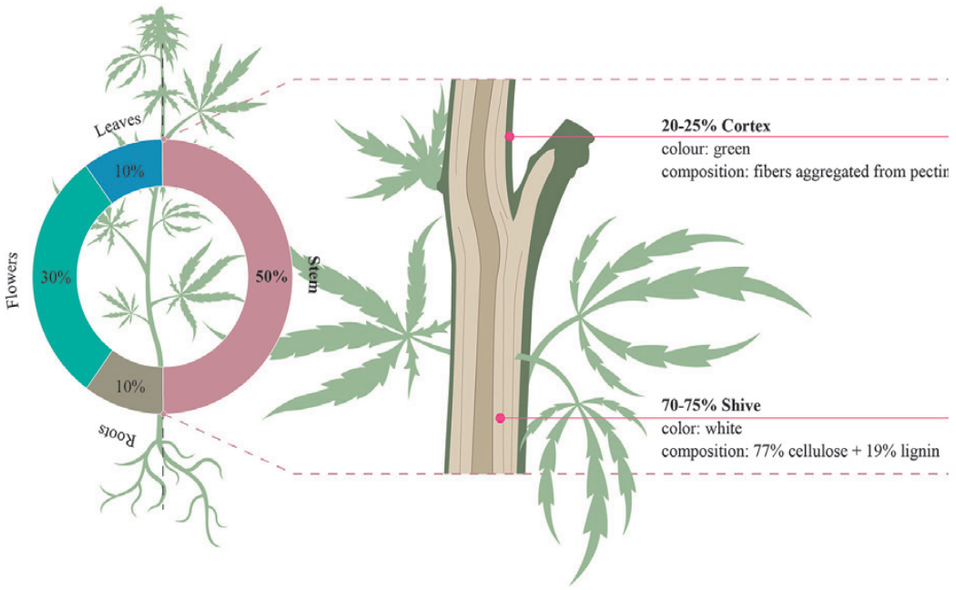


Fig. 2 | Composition of the 'Cannabis sativa' plant and structure of the stem, representing approximately 60% of the total plant and consisting of 25-30% of an external bark composed of aggregated pectin fibers and 70-75% of the internal part, particularly light, called shive and composed of cellulose and lignin (source: Azienda Agricola Passerini, 2025; adapted by the Author).

possono derivare dalle fibre di canapa o dal canapulo; nel primo raggruppamento rientrano i pannelli a bassa / media densità con fibre di canapa e leganti, comunemente utilizzati per la realizzazione di cappotti o per essere inseriti all'interno delle intercapedini murarie. I vantaggi nell'utilizzo di questo prodotto risiedono nella possibilità di essere facilmente tagliato in cantiere, per adattarsi alle condizioni esistenti, e di essere posato a secco (Perletti, Rattazzi and Zaccanti, 2020), aspetto, quest'ultimo, particolarmente rilevante in fase di demolizione selettiva del fabbricato.

Nel secondo raggruppamento rientrano quattro tipologie di materiale: le lastre ad alta densità sono un prodotto autoportante a base di canapulo e leganti impiegato per la realizzazione di partizioni interne, controsoffitti, contropareti e pareti con intercapedini interne; come i pannelli anche le lastre possono essere posate in opera a secco o con l'ausilio di malte, in quest'ultimo caso si preferisce sempre l'utilizzo di malte a base di canapa per una omogeneità e continuità materica. Un altro prodotto è composto da conglomerati a base di canapulo, calce e additivi ed è utilizzato per l'isolamento termico ed acustico, da inserire nelle intercapedini di strutture verticali o per l'esecuzione di massetti di strutture orizzontali e inclinate. Uno dei principali vantaggi di questo prodotto è che viene fornito dalle aziende produttrici già miscelato e pronto per essere addizionato con acqua (Perletti, Rattazzi and Zaccanti, 2020).

Dal conglomerato deriva quello che viene comunemente denominato 'hempcrete', ovvero cemento di canapa, prodotto che gettato in opera all'interno di casseforme e impiegato per la realizzazione di chiusure non portanti (Di Capua et alii, 2021), risulta ideale per l'impiego combinato con strutture a telaio in legno; da un punto di vista del fine vita il cemento di canapa presenta il vantaggio di un'uniformità materica e quindi la fase di smaltimento selettivo può risultare più semplice e veloce. Ultimo prodotto è il blocco in calce e canapulo, autoportante o meno, da utilizzare per la realizzazione di chiusure e partizioni, da posare in opera con l'ausilio di una malta che ha la stessa composizione del blocco (Perletti, Rattazzi e Zaccanti, 2020) per garantire continuità materica e prestazionale alle chiusure verticali.

Sul mercato sono presenti anche prodotti per la finitura delle superfici, come intonaci e pitture che amplificano le performance di isolamento termico dei materiali sottostanti a base di canapa e consentono di abbattere i consumi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti interni.

Infine la canapa è una materia prima in grado di restituire prodotti edili[1] dall'elevato potere fonoisolante, leggeri, facili da posare in opera e durevoli nel tempo, resistenti a muffe, batteri e roditori, traspiranti e autoregolatori di umidità, resistenti al fuoco e alle sollecitazioni di compressione (EIHA, n.d.; Figg. 5, 6).

Edilizia in canapa | Secondo i dati della Commissione Europea, tra il 2015 e il 2019 la canapa industriale ha registrato nel continente un vero e proprio balzo in avanti (European Commission, n.d.): gli ettari coltivati sono passati da 19.970 a 34.960 (+75%; Fig. 7), mentre la produzione è salita da 94.120 a 152.820 tonnellate (+62,4%), con la Francia al primo posto (60% del totale), seguita da Germania (17%) e Paesi Bassi (5 %). Stime diverse elaborate da InterChanvre – l'Organismo che rappresenta l'intera filiera francese – attribuiscono al 2019 una superficie coltivata di 58.000 ettari nel continente europeo (InterChanvre, 2021; Fig. 8); negli anni successivi (2020-2021) si osserva una contrazione dovuta verosimilmente ai rallentamenti produttivi e logistici imposti dalla pandemia, mentre nel 2022 gli indicatori sono tornati a crescere, segno che l'interesse per la canapa – trainato dalla domanda di materiali da costruzione a base biologica e dalle politiche europee – ha ripreso slancio dopo la parentesi emergenziale.

In Italia l'interesse per la canapa sembra comunque in aumento, anche grazie all'attenzione dedicata al settore dalla comunità scientifica, a partire dallo studio di Agliata et alii (2020) i quali hanno testato i benefici, in termini di risparmio energetico, determinati dall'impiego di materiale composito a base di calce e canapa con funzione isolante nell'intervento di ristrutturazione di Palazzo Jadicicco (XVII sec.), ubicato a Frattamaggiore. L'edificio presenta una struttura portante in tufo napoletano giallo e mattoni forati, i rivestimenti esterni in granito e quelli interni in intonaco gesso-calce.

I ricercatori hanno ipotizzato la sostituzione dei rivestimenti esterni e di quelli interni non affrescati con l'intonaco in calce e canapa. La valutazione delle prestazioni energetiche delle pareti dopo l'intervento simulato dimostra un raddoppio della capacità di isolamento, riducendo drasticamente sia l'impiego di energia per il riscaldamento interno che la domanda di energia primaria non rinnovabile. Aversa et alii (2021) hanno invece presentato i risultati dell'impiego sperimentale di blocchi in calce e canapa in due cantieri situati in Sicilia e Veneto, verificando che le prestazioni termoigrometriche del prodotto in condizioni climatiche diverse, in regime invernale ed estivo, consentono buoni livelli di comfort interno.

LCA e metodologia CED | Le indagini citate confermano la possibilità di impiegare prodotti a base di canapa per ridurre gli impatti ambientali del settore edile. Per validare questa affermazione è necessario applicare strumenti codificati e riconosciuti dalla comunità scientifica tra cui l'approccio Life Cycle Thinking (LCT; European Commission, 2003) per la riduzione degli impatti ambientali complessivi dei prodotti, attraverso il taglio degli input (materiali ed energia) e degli output (emissioni e rifiuti) dei processi produttivi (Campioli et alii, 2018), attenzionando in modo particolare la LCA.

La valutazione del ciclo vita stimola quella 'cultura dell'errore' che enfatizza la sua individuazione per elaborare soluzioni innovative e creative (Porfirione, Ferrari Tumay and Leggiero, 2024). Infatti la LCA è lo strumento per quantificare e valutare gli impatti ambientali di un prodotto lungo il suo ciclo vita, uno strumento utile per analizzare le prestazioni di prodotto rispetto a specifici indicatori ambientali che rende evidenti le fasi del processo più impattanti (errori) e consente di intervenire dove necessario. In questo modo i processi vengono resi trasparenti e confrontabili con i risultati di altri prodotti, permettendo di scegliere consapevolmente la soluzione migliore. La LCA si basa sulle UNI EN ISO 14040 e 14044 (aggiornate nel 2021) che hanno messo a punto una metodologia in grado di modellare gli impatti ambientali attraverso un percorso causa-effetto che collega ogni processo del ciclo di vita analizzato con uno o più potenziali effetti sull'uomo e sull'ambiente e dove ogni effetto è classificato in categorie di impatto (Sposito and De Giovanni, 2023); nella fase di valutazione si utilizzano modelli di caratterizzazione, i quali consentono di convertire i flussi

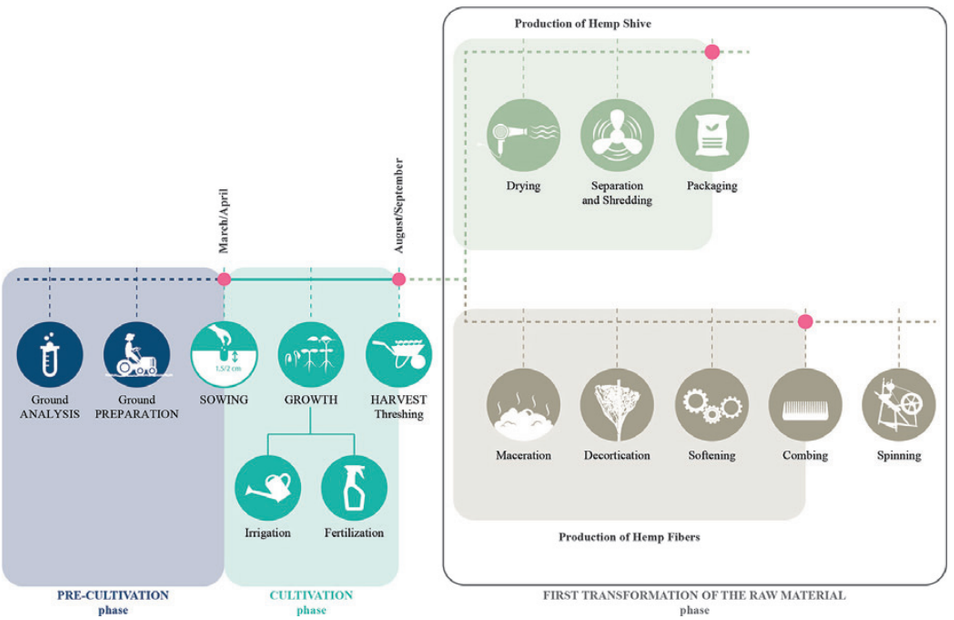


Fig. 3 | The main method of cultivation and first processing the hemp raw materials (credit: M. C. Capasso, 2025).

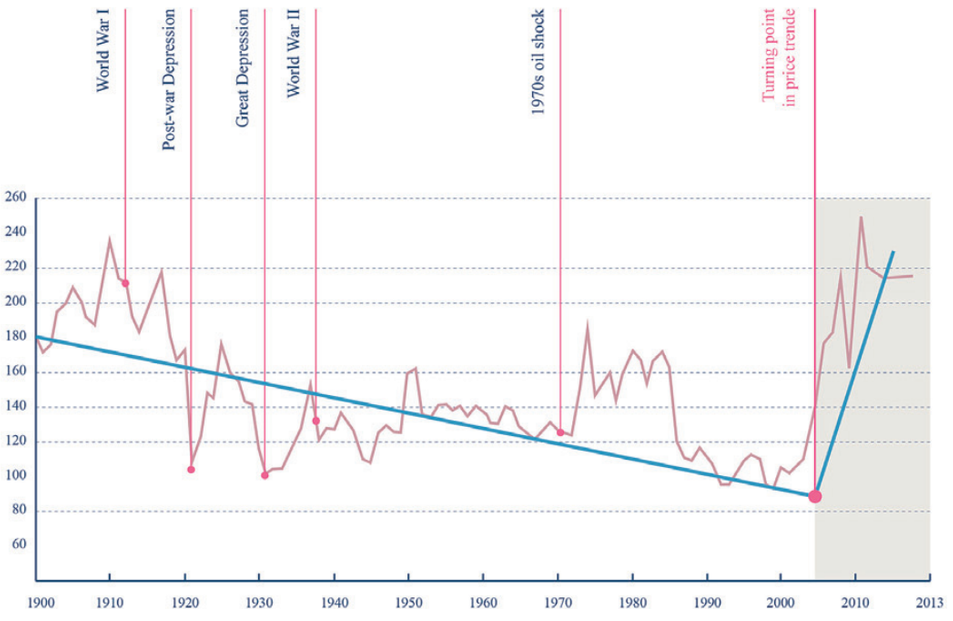


Fig. 4 | McKinsey Commodity Price Index (source: Dobbs et alii, 2011; adapted by the Author).

elementari in emissioni e categorie di impatto (European Commission, 2021b).

Fra le categorie midpoint è presente la metodologia CED che fornisce fattori di caratterizzazione per le risorse energetiche suddivise in 5 categorie, non rinnovabili e rinnovabili. Prendendo in considerazione il consumo energetico derivante da fonti 'non rinnovabili, fossili', 'non rinnovabili, nucleare', 'rinnovabile, biomassa', 'rinnovabile, vento, sole, geotermico' e 'rinnovabile, acqua' (SimaPro, 2020), come indicato da Gürzenich et alii (1999), è possibile considerare la metodologia CED un indicatore di impatto ambientale in riferimento all'esaurimento delle risorse energetiche.

La LCA è fondamentale per cercare di ridurre gli impatti ambientali legati al ciclo vita di un prodotto; tuttavia risulta una metodologia particolarmente lunga e complessa la cui attendibilità è legata alla qualità dei dati impiegati (Ding, 2014) e al tipo di processo produttivo. La valutazione è influenzata anche dalla vita utile del prodotto e questo aspetto è poco considerato; infine, oltre a non esaminare la distribuzione temporale, la LCA è sito-indipendente, ovvero non considera la distribuzione spaziale dell'impatto, aspetto che non consente di rilevare gli impatti reali, ma solo quelli potenziali (Muazu, Rothman and Maltby, 2021).

Nel presente studio la valutazione di impatto ambientale si focalizza sull'applicazione della metodologia CED per quantificare la domanda di energia primaria da parte del ciclo vita del prodotto in analisi. Generalmente la categoria d'impatto maggiormente utilizzata negli studi LCA è il GWP, ovvero il potenziale di riscaldamento globale, per verificare l'impatto che un prodotto ha sul cambiamento climatico espresso in kg CO_{2eq}, considerando al suo interno tutti i principali gas serra emessi in un arco temporale di 100 anni. Sebbene i dati risultanti dalla CED e dal GWP siano differenti, sono entrambi necessari per valutare al meglio la scelta dei materiali da impiegare nella realizzazione di nuove costruzioni, ma anche in interventi di retrofit o risanamento di edifici preesistenti. L'utilizzo combinato di CED e GWB consente di avere una panoramica più completa sul materiale e sul prodotto edile finale, per conoscere da un lato i consumi di energia, dall'altro l'impatto che il ciclo vita del prodotto ha in termini climatici.

Le principali motivazioni che nel presente studio spingono a indagare e soffermarsi sul consumo energetico del prodotto edile, in linea con l'SDG 7, sono da ricercare nell'importanza che ha l'energia per il raggiungimento e/o il mantenimento del benessere dell'essere umano, che deve trovare un equilibrio con la limitatezza delle risorse energetiche a disposizione (Smil, 2003). Mentre in uno studio precedente (Capasso et alii, 2025) sono state identificate diverse categorie di impatto ambientale sulla stessa tipologia di prodotto, e tra queste il GWP, contenuto all'interno della metodologia CML-IA baseline, nel presente studio si riporta un approfondimento della metodologia CED.

Dall'analisi della letteratura scientifica è emerso che pochi studi applicano esplicitamente la metodologia CED ai prodotti edili a base di canapa, più comunemente si parla di energia incorporata. Nel lavoro di Fu et alii (2024) si analizza una LCA comparativa, limitandola al confine del sistema 'gate-to-gate', fra il nuovo processo di macerazione batterica e il tradizionale processo termochimico per l'ottenimento di fibre di canapa grezze: nella valutazione viene utilizzata la metodologia CED per verificare

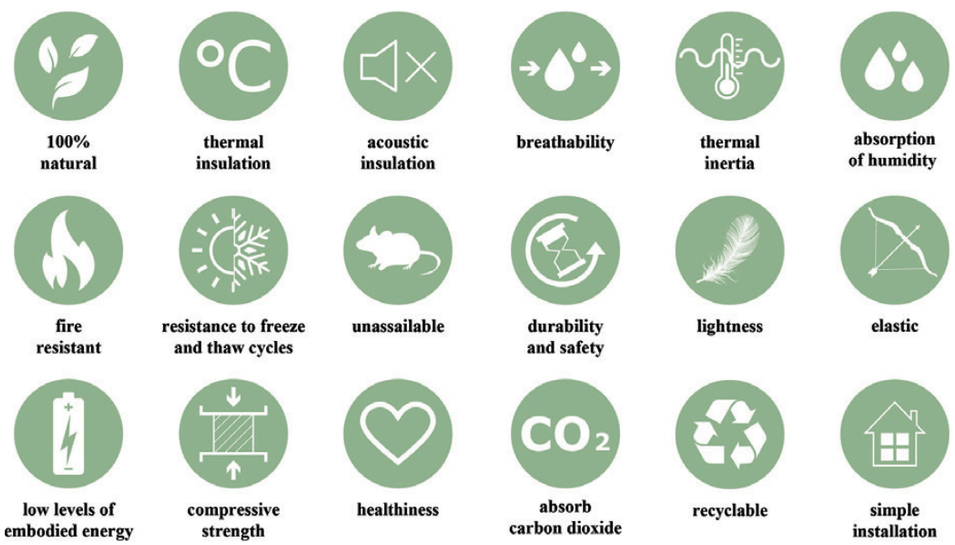


Fig. 5 | Main properties of building products derived from 'Cannabis sativa' (source: edilcanapa.it, 2024; adapted by the Author).



Fig. 6 | Lime and hemp blocks and block installation for a false wall (copyright: Edilcanapa Srl; source: edilcanapa.it, 2024).



Fig. 7 | Trend from 2015 to 2022 of the European Union's territorial area cultivated with hemp for fibre production (source: European Commission, n.d.; adapted by the Author).

i consumi energetici delle due tipologie di macerazione, evidenziando un risparmio del 23,9% di energia grazie all'impiego della macerazione batterica per la produzione di un grammo di fibra di canapa.

Díaz, López e Bugallo (2022) valutano alcuni prodotti derivati da biomassa di rifiuti agricoli per verificare quale sia in grado di rendere maggiormente stabile la temperatura: fra i prodotti analizzati vi è anche il cemento di canapa, un prodotto con un valore di conduttività termica compreso tra 0,05 e 0,16 W/mK, una densità compresa tra 220 e 550 kg/m^3 e un valore del calore specifico, rilevato da Kinnane et alii (2015), compreso fra 900 e 4.700 J/kgK. L'analisi condotta da Díaz, López e Bugallo (2022) relativa al comportamento del calcestruzzo in canapa, abbinato a un pannello di sughero espanso e a uno di cartongesso, rispettivamente utilizzati per l'isolamento e la chiusura della parete, ha evidenziato un'onda con oscillazione bassa e un ritardo temporale di 9 ore; lo stesso studio con la LCA della parete in canapa, condotta utilizzando dati reperiti da database, ha mostrato valori relativamente bassi (se confrontati con quelli di materiali più convenzionali) dei consumi delle principali fonti energetiche considerate dalla metodologia CED.

LCA del blocco in calce e canapa: fonti, limiti e attendibilità dell'analisi | Per validare il ridotto impatto ambientale dei prodotti edili a base di canapa e il loro basso livello di energia incorporata è stata condotta la LCA del blocco in calce e canapa, con applicazione della metodologia CED che valuta i consumi energetici del blocco durante il suo ciclo vita, individuando le risorse energetiche sulle quali esso incide maggiormente. Si precisa che si riportano i risultati della valutazione delle singole fasi oggetto di studio, in modo da semplificare la lettura dei risultati e consentire una rapida individuazione dei processi più energivori e impattanti.

La LCA è stata condotta sul blocco in calce e canapa in quanto, dal riscontro con le vendite effettuate negli ultimi anni dall'Azienda partner del progetto di ricerca, il blocco è risultato essere la componente più richiesta. Si tratta di un prodotto prefabbricato, quindi semplice e veloce da posare in opera in fase di cantierizzazione. Nello specifico il blocco in analisi è l'EC11/30 di 30 x 20 x 40 cm, con conducibilità termica pari a 0,0784 W/mK (categoria T1 – UNI EN 1745:2020), massa volumica di 424 Kg/m^3, resistenza a compressione di 0,56 N/mm^2 e valore di trasmittanza termica dell'intera chiusura verticale realizzata con solo blocchi pari a 0,25 W/m^{2}K. Il blocco, composto da canapulo, calce idraulica ed additivi naturali, è un isolante massiccio che combina proprietà di isolamento e massa termica; è autoportante, ma non ha funzione strutturale, il che implica la necessità di affiancarlo a strutture portanti a telaio e di utilizzarlo come elemento di tamponatura per la realizzazione di chiusure verticali e partizioni interne, per cappotti, per isolamento termoacustico e come deumidificante in edifici di nuova costruzione o in interventi su edilizia preesistente. Si precisa che il processo produttivo del blocco avviene interamente all'interno della stessa azienda e prevede le seguenti fasi: a) pesatura delle componenti; b) miscelazione delle componenti con aggiunta di acqua; c) pressovibratura e formatura, fase nella quale la miscela del blocco viene colata e pressata all'interno degli stampi e fatta vibrare per eliminare eventuali bolle d'aria; d) asciugatura all'aria aperta del blocco estratto dallo stampo; e) deposito e stoccaggio, attraverso l'ausilio dei materiali per l'imballaggio (bancali lignei, angolari in cartonato e reggette in PET).

Lo studio ha utilizzato il programma di calcolo SimaPro 9.1 e il database Ecoinvent v3, integrando dati specifici quando disponibili. L'analisi condotta è del tipo 'from cradle to gate', comprensiva delle fasi di fornitura dei materiali (fase A1), di trasporto (fase A2) e di produzione del blocco (fase A3). In aggiunta sono state effettuate ipotesi sui carichi ambientali e sui benefici oltre i confini del sistema (modulo D), come previsto dalla normativa UNI EN 15 804:2021 (Fig. 9). L'esclusione dei moduli B e C, che limita l'applicazione e i risultati dello studio LCA, è dettata dalla momentanea impossibilità di reperire dati affidabili su queste fasi. Tralasciando quindi la fase di posa in opera, uso e manutenzione del prodotto si è utilizzata come unità dichiarata la produzione di blocchi realizzati in una mensilità (Capasso et alii, 2025). Si precisa che, per il patto di riservatezza stipulato con l'Azienda produttrice, non è possibile riportare ulteriori informazioni in merito dall'unità dichiarata, così come non sarà possibile inserire i risultati di dettaglio dell'analisi, ma solo valori aggregati.

Lo svolgimento della LCA ha visto l'impiego di dati primari forniti direttamente dall'Azienda produttrice del blocco riferiti alla fase di trasporto dai siti di produzione delle materie prime alla sede di lavorazione del prodotto (fase A1) e all'intera fase di realizzazione e imballaggio del blocco (fasi A2 e A3). Si tratta di dati considerati attendibili, in quanto specifici del processo in analisi e reperiti in loco tramite appositi questionari predisposti dall'autrice su base normativa. Sono stati invece impiegati dati di secondo livello per la descrizione della fase A1 (relativa ai processi di produzione e prima trasformazione delle materie prime) derivanti dai processi di modellizzazione del database Ecoinvent e forniti direttamente dall'Azienda CalcePiasco, attinenti alla coltivazione della canapa e alla produzione di canapulo; questi ultimi dati si considerano attendibili, in quanto derivanti da fonti certe.

L'intera valutazione ha visto l'applicazione di due metodologie che raggruppano i risultati della fase di inventario in categorie midpoint, ovvero la metodologia CED, che non valuta impatti ambientali, ma verifica i quantitativi di energia richiesta dal ciclo vita del blocco, e la metodologia CML-IA baseline, con la quale si verificano le incidenze sulle principali categorie di impatto ambientale (SimaPro, 2020). A livello endpoint è stata invece applicata la metodologia Eco-indicator 99 (H) per valutare i danni del ciclo vita del blocco sulla salute umana, sulla qualità dell'ecosistema e sulle risorse (SimaPro, 2020). Come precedentemente dichiarato, nel presente lavoro si riporta l'approfondimento di quanto emerso dall'applicazione della metodologia CED, per conformità all'SDG 7, mentre l'intera valutazione è stata indagata in una precedente pubblicazione (Capasso et alii, 2025).

Risultati | L'applicazione della metodologia CED alla fase A1 di approvvigionamento e prima trasformazione delle materie prime impiegate nella miscela del blocco ha rilevato un impatto maggiore sull'energia derivante da fonti fossili, sulla quale il processo produttivo della calce idraulica ha un'incidenza superiore (Tab. 1; Fig. 10).

La fase A2 considera il trasporto dal sito di estrazione e prima trasformazione della materia prima al sito di produzione del blocco; pertanto si sono considerati tre differenti trasporti relativi ai tre materiali che costituiscono il blocco e anche in questo caso la caratterizzazione CED ha rilevato un maggiore impatto sull'energia derivante da fonti fossili, con incidenza superiore data dal trasporto della calce idraulica, seguita da quello del canapulo (Tab. 2; Fig. 11).

La fase A3 considera i processi legati alla produzione del blocco all'interno dell'Azienda, ovvero i consumi energetici dei diversi macchinari, facendo riferimento al mix italiano di energia elettrica da rete a medio voltaggio (Capasso et alii, 2025) e all'acqua impiegata nella miscela del blocco. Come nelle precedenti fasi, la caratterizzazione della metodologia CED ha rilevato un maggiore impatto sull'energia derivante da fonti fossili, con un'incidenza superiore del processo legato all'impiego della blocchiera (Tab. 3; Fig. 12). In quest'ultimo caso sono stati adoperati dati di primo livello raccolti attraverso l'elaborazione di appositi questionari compilati durante il periodo di monitoraggio interno all'Azienda partner del progetto di ricerca.

Nella fase A3 è stata calcolata separatamente l'incidenza dell'imballaggio dei blocchi (angolari in cartone, bancali in legno e reggette in PET), comprensiva dei processi legati ai trasporti dei singoli

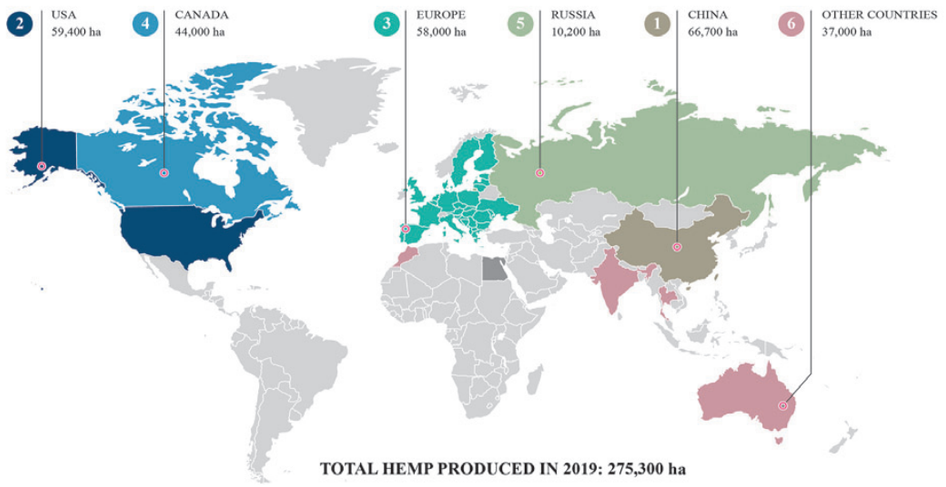


Fig. 8 | Industrial hemp cultivation in Europe in 2019 (source: InterChanvre, 2021; adapted by the Author).

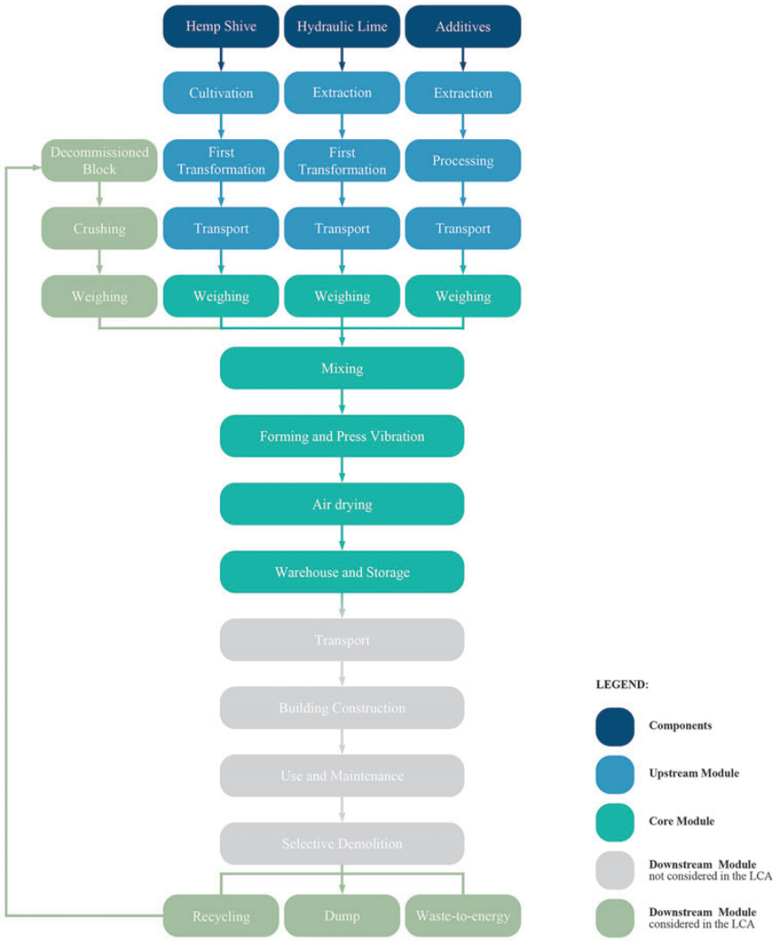


Fig. 9 | Simplified flowchart of all the processes in the block life cycle, divided into upstream, core and downstream modules (credit: M. C. Capasso, 2025).

A1 phase | Raw material supply

Impact Category	Characterisation		Weight	
	Unit	Numeric value	Unit	Numeric value
Non renewable: fossil	MJ	1.49e5	GJ	149
Non renewable: nuclear	MJ	7.61e3	GJ	7.61
Non renewable: biomass	MJ	104	GJ	0.104
Renewable: biomass	MJ	2.51e3	GJ	2.51
Renewable: wind, solar, and geothermal	MJ	1.31e3	GJ	1.31
Renewable: water	MJ	4.57e3	GJ	4.57
			Total	
			GJ	**165**

Tab. 1 | A1 phase: Raw material supply – Results of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

elementi dai loro siti produttivi all'Azienda che realizza il blocco. In questo caso la metodologia CED ha evidenziato una maggior incidenza sulle risorse energetiche derivanti da fonti fossili, prevalentemente legata all'impiego dei bancali e poi alle reggette in PET, mentre è quasi irrilevante l'influenza degli angolari in cartone (Tab. 4; Fig. 13).

Confrontando i risultati della presente LCA con studi di letteratura si può dedurre che, in linea generale, l'esito della metodologia CED applicata al blocco in calce e canapa ha evidenziato bassi valori di consumi energetici legati alle fasi analizzate, rilevando maggiori consumi anzitutto nella prima fase di approvvigionamento e di prima trasformazione delle materie prime e in secondo luogo nella terza fase, relativa alla produzione del blocco.

Anche se non è possibile effettuare una comparazione precisa con altri studi effettuati dalla comunità scientifica negli ultimi anni (anche a causa della differenza di unità dichiarata / funzionale impiegata), al fine di verificare l'effettivo beneficio in termini di energia consumata del blocco in calce e canapa, si è comunque effettuato un confronto di questi consumi con quelli di altri materiali più comunemente impiegati nel settore edile. Si sono considerati studi che hanno approfondito la metodologia CED su prodotti similari per funzione e spessore al blocco analizzato.

Come primo prodotto per il confronto si è deciso di considerare il mattone forato analizzato da Di Capua et alii (2021). I ricercatori hanno svolto una LCA comparativa sui confini del sistema 'from cradle to gate', fra tre differenti chiusure verticali: a) una parete in cemento di canapa; b) una parete in blocchi di canapa e calce; c) una parete in laterizi forati, alla quale è stato aggiunto un pannello di polistirene esterno, per ottenere le medesime prestazioni di isolamento termico delle prime due pareti.

Il confronto evidenzia che la soluzione costruttiva con mattoni forati è quella con un'incidenza maggiore sulle categorie di energia 'non rinnovabile, fossile' e 'non rinnovabile, nucleare', a causa soprattutto del materiale isolante in polistirene, necessario per garantire un isolamento termico adeguato. Al secondo posto, per incidenza sulla categoria di fonti energetiche fossili, si trovano le pareti in cemento di canapa, con conseguente risultato migliore sulla medesima categoria energetica da parte delle chiusure realizzate in blocchi di canapa e calce.

Wolfova (2020) nella sua valutazione comparativa ('from cradle to gate') tra due pareti portanti esterne (unità funzionale un metro quadrato) realizzate rispettivamente in mattoni (spessore 30 cm) e in blocchi di calcestruzzo cellulare (spessore 40 cm), entrambe con uno strato isolante in polistirene espanso, applica la metodologia CED. La LCA valuta la muratura in blocchi di calcestruzzo cellulare migliore rispetto a quella realizzata in mattoni per tutte le categorie energetiche considerate. La differenza maggiore fra i due prodotti si riscontra nelle categorie 'non rinnovabili, fossili' e 'rinnovabili, biomassa', nelle quali la parete in mattoni è più incidente rispetto a quella in blocchi in calcestruzzo cellulare.

A seguito di questo confronto puramente teorico fra i consumi energetici di vari prodotti impiegati per la realizzazione di chiusure verticali, possiamo confermare che il blocco in calce e canapa è un prodotto idoneo alla realizzazione di 'edifici verdi', in quanto l'incidenza delle fasi del ciclo vita analizzate sulle categorie della metodologia CED ha complessivamente valori ridotti, con una maggiore incidenza

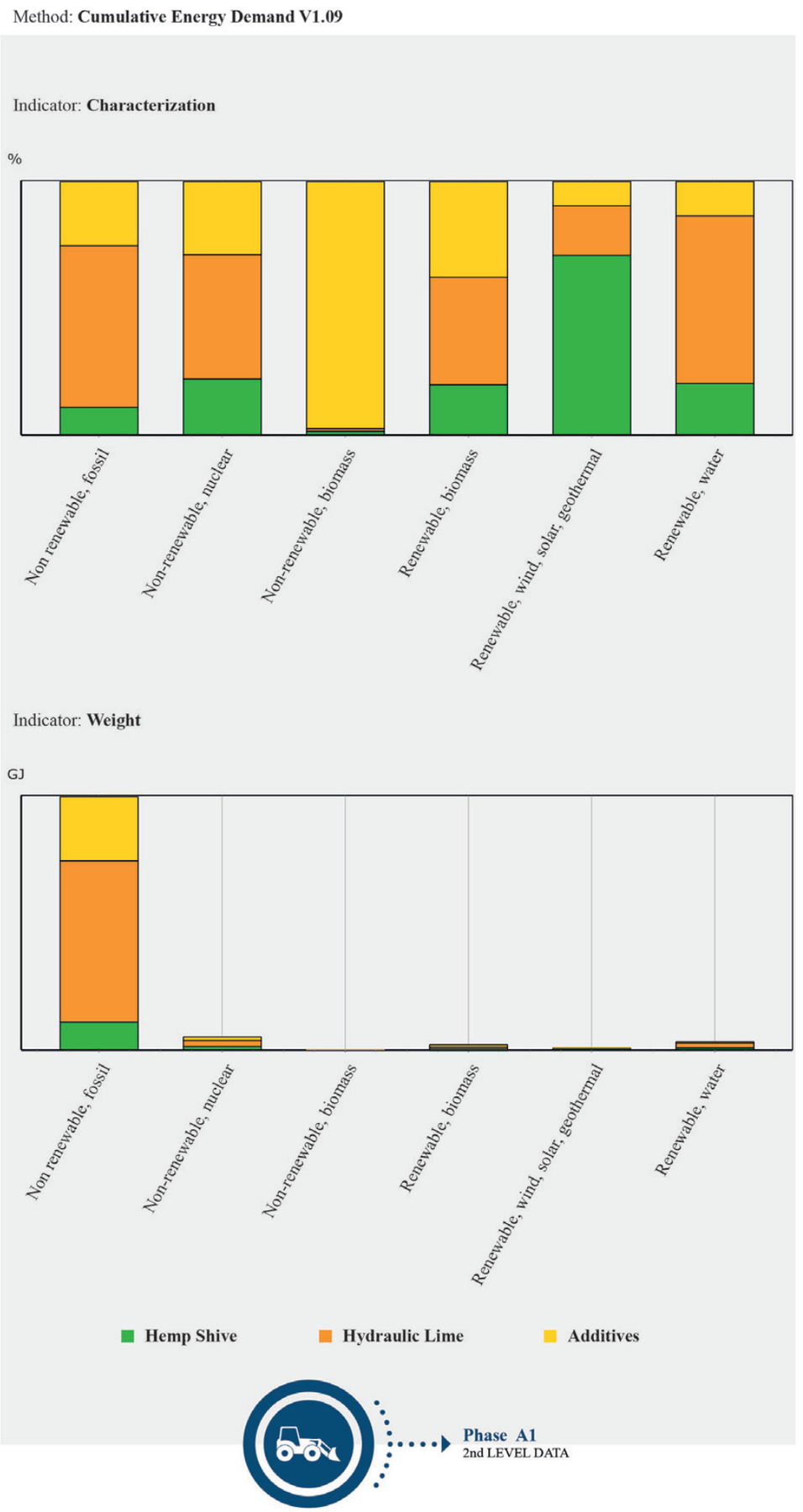


Fig. 10 | A1 phase: Raw material – Charts of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

A2 phase | Transport				
Impact Category	Characterisation		Weight	
	Unit	Numeric value	Unit	Numeric value
Non renewable: fossil	MJ	1.9e4	GJ	19.4
Non renewable: nuclear	MJ	301	GJ	0.301
Non renewable: biomass	MJ	0.503	GJ	0.000503
Renewable: biomass	MJ	112	GJ	0.112
Renewable: wind, solar, and geothermal	MJ	18.4	GJ	0.0183
Renewable: water	MJ	104	GJ	0.104
			Total	
			GJ	19.9

Tab. 2 | A2 phase: Transport – Results of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

sull'energia non rinnovabile derivante da fonti fossili. Questi risultati consigliano di passare a fornitori di energia rinnovabile per ridurre gli impatti legati ai consumi energetici e, considerando il potenziale dei materiali a 'km 0', ove possibile, di individuare fornitori di calce e di additivi più vicini all'azienda produttrice del blocco, al fine di ridurre anche i consumi energetici relativi alla fase A2.

Poiché i risultati della LCA possono variare significativamente in base alle ipotesi preliminari adottate e in relazione ai limiti del sistema (Haik, Meir and Peled, 2023), è stata condotta un'analisi di sensitività sostituendo l'input energetico in fase A3 di produzione del blocco. L'analisi ha previsto la sostituzione del mix italiano di energia elettrica da rete a medio voltaggio (Capasso et alii, 2024) con energia derivante esclusivamente da fonti rinnovabili. Nella restituzione finale dei risultati aggregati della metodologia CED, in questo caso riferiti all'intero ciclo del blocco (fasi A1, A2 e A3 aggregate), si è riscontrata una cospicua diminuzione della domanda energetica, passando da 18,0 a 14,7 MJ. Nel confronto con i risultati dell'analisi di sensitività le principali variazioni si riscontrano sulle fonti energetiche 'non rinnovabili, fossili' per le quali si evidenzia un'importante riduzione del peso, mentre aumenta l'incidenza del blocco sulle categorie energetiche 'rinnovabili, vento, sole, geotermica' e 'rinnovabili, acqua'.

Essendo stata condotta un'analisi 'from cradle to gate', una delle limitazioni del lavoro è che non si conoscono gli impatti legati alle fasi di cantierizzazione e demolizione che generano rifiuti ed emissioni nell'ambiente (Ding, 2014). Nonostante questa mancanza, da un resoconto empirico dell'azienda, sappiamo che il blocco in cantiere produce sfridi che potrebbero essere recuperati e riutilizzati direttamente in loco.

Considerazioni conclusive | Il concetto di sostenibilità in ambito edile fa riferimento sia alla realizzazione di manufatti architettonici e al loro uso, sia alla riduzione dei consumi energetici e di risorse naturali; in quest'ottica è evidente il ruolo cardine della materia impiegata per la realizzazione di prodotti edili (Franzoni, 2011) e l'utilità di una LCA, intesa come approccio sistemico per la valutazione degli impatti ambientali associati a uno specifico prodotto per conoscere l'energia primaria del materiale, ovvero i quantitativi di energia consumata per l'estrazione / produzione della materia prima e l'energia necessaria per il funzionamento dei macchinari impiegati nel processo (Ding, 2014).

La LCA condotta sul blocco in calce e canapa ha rilevato una ridotta domanda energetica su tutte le principali fonti considerate dalla metodologia CED, contribuendo positivamente, se pur in minima parte, alla riduzione su scala globale della domanda energetica e delle emissioni di anidride carbonica legate all'uso dell'energia del settore edile. Alla luce di ciò il blocco risulta essere un prodotto utilizzabile per l'efficientamento energetico degli edifici e per il raggiungimento dell'SDG 7, grazie alle elevate prestazioni tecniche del prodotto e, a monte del processo, grazie all'impiego di una materia prima altamente rinnovabile, che richiede pochi e semplici processi di lavorazione, che gli assicurano un basso contenuto di energia incorporata.

Attraverso l'impiego della canapa come materia prima orientiamo il settore edile anche verso il raggiungimento dell'SDG 6, grazie alla poca acqua necessaria sia in fase di coltivazione della canapa sia in fase di creazione del blocco, consentendo così un più equo accesso all'energia e all'acqua. L'impiego della canapa genera co-benefici anche con l'SDG 12 (Garantire modelli sostenibili di produzione e di consumo) e il 3 (Salute e benessere), in quanto non solo riduce i consumi di materie prime, energia ed emissioni del settore edile, ma assicura elevati livelli di comfort interno e benessere dell'utente che vive gli spazi confinati: un materiale può infatti considerarsi sostenibile quando non ha conseguenze negative sull'uomo, sull'ambiente naturale e sul costruito (Ding, 2014).

Nonostante alcune lacune riscontrate nel processo, si ritiene che lo studio LCA condotto sia fondamentale come primo step per riconoscere e comunicare su larga scala le prestazioni ambientali del prodotto durante le varie fasi del suo ciclo vita. Un ulteriore passo sarà estendere l'attuale valutazione LCA a tutte le fasi del ciclo vita del blocco, al fine del rilascio della Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD; UNI EN ISO 14025:2010) e validare la sua conformità ai Criteri Ambientali Minimi; infine, per una panoramica completa sulla sostenibilità del blocco, sarebbe opportuno integrare lo studio LCA con gli aspetti economici e sociali.

Come dichiarato da Aldersoni et alii (2025) sono ancora presenti significative mancanze relative all'applicazione su larga scala della canapa in campo edile, una delle quali è relativa alla conoscenza degli effetti combinati nell'impiego, in un unico sistema edilizio, di diversi materiali con verificata bassa emissione di carbonio; infatti fra i limiti del presente studio si segnala quella relativa alla restrizione dell'applicazione al singolo prodotto edile, scorporato dal suo contesto di utilizzo.

Per valorizzare le potenzialità dei prodotti edili a base di canapa e superare le barriere alla loro ampia diffusione Agliata et alii (2020), confermando la necessità di ampliare gli studi, sviluppi, verifiche ed incentivi su questo tipo di prodotti, si individuano sei pilastri / aspetti fondamentali:
1) aspetto tecnico che tenga in considerazione tutte le proprietà della canapa e dei prodotti edili e contemporaneamente la scarsa conoscenza dei loro benefici da parte degli attori del settore, anche in ragione del fatto che in Italia si sono progressivamente perse le conoscenze legate alle tecniche di coltivazione della canapa a seguito degli effetti del proibizionismo, a partire dal 1937 e fino allo stop definitivo con l'approvazione della Convenzione Unica delle Sostanze Stupefacenti[2] nel 1961 (Fig. 14);
2) aspetto commerciale che considera l'aumento del rinnovato interesse verso la canapa solo negli ultimi 15 anni, nei quali si è notato un aumento della domanda di prodotti di origine naturale, probabilmente sollecitato dalla crescente sensibilità dei consumatori verso le problematiche di sostenibilità ambientale, oltre all'aumento dei prezzi delle materie prime più convenzionali a seguito della crisi petrolifera (Dobbs et alii, 2011); tale interesse crescente è dimostrato dall'aumento della coltivazione / produzione di canapa e della domanda di prodotti edili da parte del mercato (Fig. 15) che comunque potrebbe essere ostacolato dalla scarsa redditività economica della piantagione per i suoi coltivatori, a causa delle lunghe tempistiche di stoccaggio della materia prima e dell'incidenza dei trasporti;
3) aspetto conoscitivo che riprende la mancanza di conoscenza da parte degli operatori del settore sulle potenzialità dell'utilizzo della canapa in edilizia;
4) aspetto normativo ufficialmente riconosciuto dal Parlamento Italiano (2016, art. 1) che ha affermato come questa coltura sia in grado di «[…] contribuire alla riduzione dell'impatto ambientale in agricoltura e del consumo dei suoli, della desertificazione e della perdita di biodiversità, nonché come coltura da impiegare quale possibile sostituto di colture eccedentarie e come coltura da rotazione». Un riconoscimento che, insieme alle importanti proprietà tecniche dei prodotti edili in canapa, dovrebbe trovare riscontro nello sviluppo di norme tecniche specifiche per le costruzioni in canapa, come avvenuto in Francia nel 2014 con le Règles Professionnelles de la Construction en Chanvre[3] e successivi aggiornamenti;
5) aspetto psicologico che vede la necessità di au-

mentare la diffusione delle conoscenze sulla 'Cannabis sativa' e sui prodotti che ne derivano, al fine di eliminare qualsiasi fraintendimento con la marijuana; 6) aspetto invisibile, legato alla competitività dei prodotti in canapa rispetto ai prodotti edili tradizionali in termini di prestazioni e di qualità del comfort interno restituito.

In conclusione lo studio proposto, che è incentrato sulla materia e sul suo ciclo vita, evidenzia il ruolo essenziale dell'LCA per promuovere pratiche sostenibili in ambito edile e individuare le opportunità di miglioramento (Carvalho et alii, 2025). Sebbene quello presentato sia un approccio che punta alla 'efficienza' dei processi, parallelamente è necessario promuoverne uno sulla 'sufficienza' (Ness, 2024), come ribadito dal New European Bauhaus (European Commission, 2023, 2021c), al fine di stimolare soluzioni in grado di soddisfare esigenze e bisogni impiegando un quantitativo minore di risorse non rinnovabili e attivando azioni per il recupero e il riuso del patrimonio costruito.

Within the framework of the Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda (UN, 2015), focus is placed on the need to ensure that the entire global population has access to energy and water resources. In the field of architecture, and with regard to SDG 7 (ensuring access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all) and SDG 6 (ensuring the availability and sustainable management of water and sanitation for all), this translates into the urgent need to reduce energy and water consumption throughout the entire life cycle of buildings. According to global studies, the construction sector is responsible for the use of 61 billion tonnes of water (Huang et alii, 2024), 34% of energy demand and 37% of global carbon dioxide emissions related to energy used in construction and material production activities (UNEP, 2024). It is also worth noting that, despite the ongoing energy transition from fossil fuels to renewable sources, their use in buildings increased between 2010 and 2023 (IEA, 2023; Fig. 1).

Various strategies, directives, norms and standards have been developed to reduce emissions and energy consumption in the building sector, and funding has been allocated at international, European and national level: from the proposals of the European Green Deal (European Commission, 2019), translated into the New European Bauhaus (European Commission, 2023, 2021c), to the latest revision of the Case Green Directive (European Parliament and Council of the European Union, 2024) and the Fit for 55 package (European Commission, 2021a), which provide the primary targets for zero-emission buildings to be achieved by 2050, up to the funding of the Next Generation Europe (European Parliament, 2020) and the Italian National Recovery and Resilience Plan (MIMIT, 2023).

Despite these efforts, the construction sector is still lagging behind in achieving decarbonisation by 2050, as the process of change is excessively slow (UNEP, 2024), probably because it is focused on the operational dimension of construction products, to the detriment of the focus on the entire construction life cycle (Palumbo, Romano and Gallo, 2024). However, it is crucial to consider that the energy consumption of a building is not mainly related to its use phase (Cabeza et alii, 2014), but depends on the embodied energy, i.e., the energy required to produce

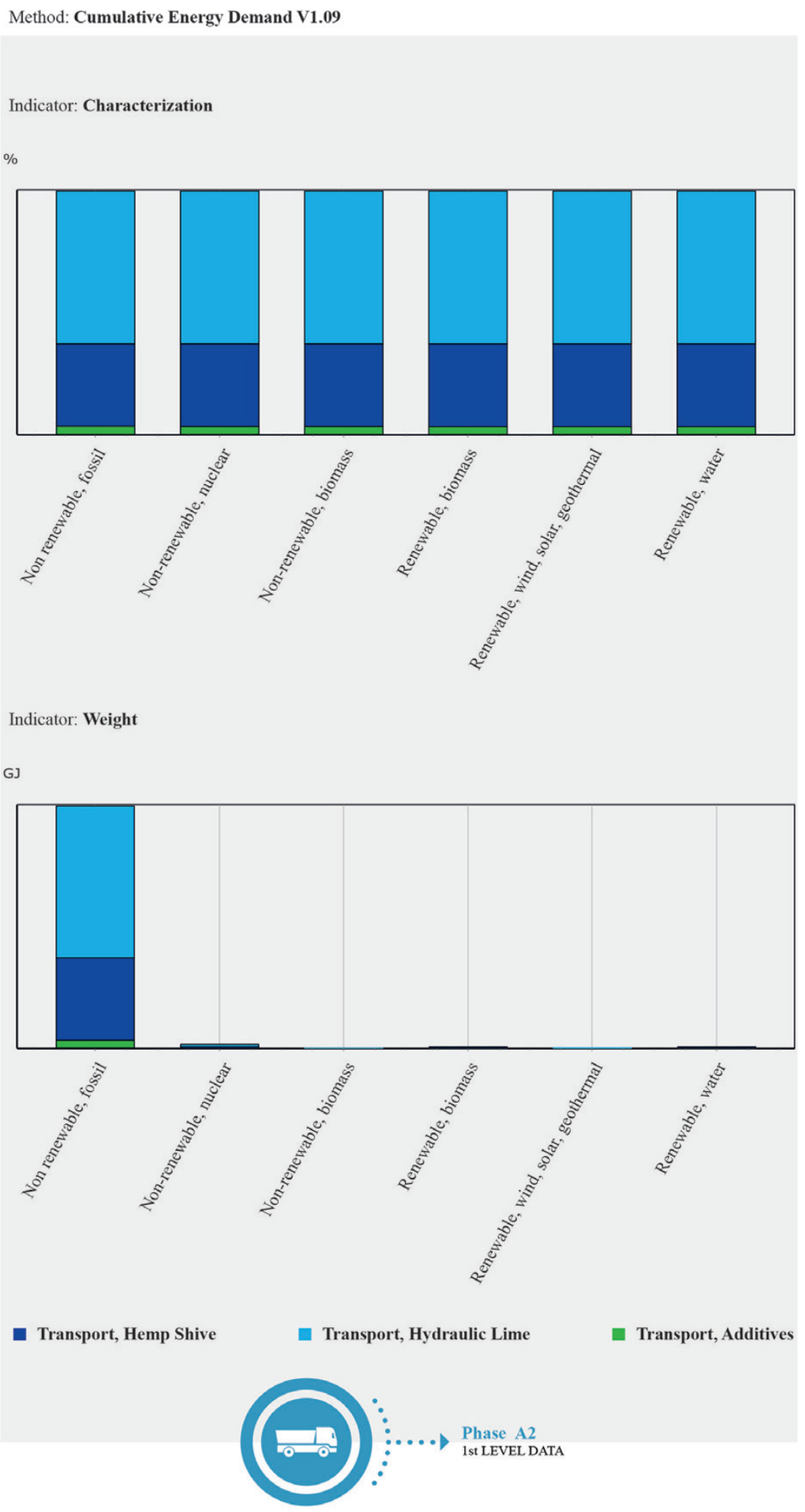


Fig. 11 | A2 phase: Transport – Charts of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

A3 phase | Manufacturing processes				
Impact Category	Characterisation		Weight	
	Unit	Numeric value	Unit	Numeric value
Non renewable: fossil	MJ	7.77e4	GJ	77.7
Non renewable: nuclear	MJ	1.06e4	GJ	10.6
Non renewable: biomass	MJ	8.63	GJ	0.00863
Renewable: biomass	MJ	1.66e3	GJ	1.66
Renewable: wind, solar, and geothermal	MJ	6.06e3	GJ	6.06
Renewable: water	MJ	5.94e3	GJ	5.94
			Total	
			GJ	102

Tab. 3 | A3 phase: Manufacturing processes – Results of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

a unit of product. A promising approach to achieving nearly zero-energy buildings is the use of low embodied-energy materials (Arrigoni et alii, 2017). Of the 34% of global energy demand attributable to the construction sector, 4% is used for processing raw materials and producing cement, steel, aluminium, bricks, and glass. Meanwhile, 7-9% of the sector's total greenhouse gas emissions stem from producing these materials (UNEP, 2024), and 50% of all carbon emissions in new buildings are associated with embodied carbon in materials (WBCSD and ARUP, 2023).

This data highlights the need, on the one hand, to design buildings by drawing on renewable raw materials with low embodied-energy value, through the use of materials derived from simple procurement and transformation processes, and, on the other hand, to favour dry solutions for the decommissioning and disassembly of most building elements and components at the end of their life, ensuring their recovery, reuse or recycling. With such objectives in mind, it is possible to investigate end-of-life scenarios for construction products early on in the process, when designing strategies (Finch et alii, 2021) and carefully selecting materials (Franzoni, 2011) for inclusion in impact assessments.

To meet these goals and reduce emissions and energy consumption in the building sector, one possible solution is to employ natural materials from renewable resources or plant-based biomass (Melià et alii, 2014). In this context, the present study focuses on low-embodied-energy materials, such as hemp, and on the need to use LCA (Life Cycle Assessment) to evaluate their environmental and energy performance.

Specifically, studies in the construction field have now expanded the range of low-carbon materials available, but despite this expansion, these materials are still rarely used (Aldersoni et alii, 2025). Consequently, there is a need for more studies in the field to demonstrate and validate the performance of these materials from a performance and environmental point of view (Bungau et alii, 2022), and to investigate their influence on energy use and carbon emissions (Dou et alii, 2024; Madessa et alii, 2024; Li et alii, 2023).

The contribution is divided into sections: the first provides an overview of the benefits generated by the use of hemp in construction, including references to work already carried out by the scientific community; the second introduces the LCA assessment tool and the CED (Cumulative Energy Demand) methodology; the third presents the application of the CED methodology to lime and hemp blocks, the results, and the critical issues that emerged during the assessment. The conclusion presents general reflections and future developments.

Research objectives | Although the amount of research on low-carbon materials is increasing, as also explained by Aldersoni et alii (2025), some gaps remain. Therefore, this study investigates how the selection of building materials influences energy consumption, quantified through the CED method, to inform sustainable architectural design. This contributes valuable insights supporting the use of hemp-derived building materials, information relevant to manufacturers, architects, engineers, and construction managers alike. The CED methodology measures both direct and indirect energy consumption, expressed in megajoules (MJ), throughout the life cycle of a system, service, or product. It therefore serves as a key indicator for estimating the primary energy required to produce a single unit of product (Samadikun, Syafrudin and Whayuni, 2024).

This study aims to examine the life-cycle impacts of hemp-based building products on key energy categories and to analyse and provide a comprehensive overview of aspects that are becoming increasingly significant in the selection of materials derived from what was once considered agricultural waste, such as hemp shive (hemp wood).

Strengths and barriers in the use of hemp | The construction sector employs 'Cannabis sativa': a potentially zero-waste plant (Aluigi and Viganò, 2016), whose stalks yield fibre and hemp shive, both valuable in producing building materials (Fig. 2). When considering the life cycle of hemp, several key features emerge. The cultivation of 'Cannabis sativa' requires minimal care, as it grows without irrigation, pesticides, fertilisers, or other chemicals that contaminate soil and groundwater (InterChanvre, 2020). Moreover, producing semi-finished construction materials from hemp requires only a few simple processing steps. In addition, hemp plantations absorb significant amounts of carbon dioxide from the atmosphere. One hectare of hemp can capture about 22 tonnes of CO_2 in about six months, a rate notably higher than that of forests and other common crops (Adesina et alii, 2020).

This high CO_2 storage capacity contributes to 'carbon-negative' building products, as a lime and hemp shive wall (Fig. 3) can store 36.08 kg of CO_{2eq} (Ip and Miller, 2012) despite the emissions generated during cultivation and production. Indeed, the study by Nazri and Woods (2025) shows that hemp-based insulation materials have strong potential to reduce the environmental impact of building materials, particularly when compared with fibreglass, rockwool, EPS, and XPS. In addition, hemp is an annual plant, a feature of particular significance given the widespread use of non-renewable and increasingly scarce natural resources (Ding, 2014), which in turn negatively affects commodity price stability (Fig. 4), global biodiversity loss and water stress (Haigh, 2023).

All the properties identified in hemp-based building materials highlight its potential as a raw material with multiple advantages: (a) Environmental, as it offers benefits both during cultivation and in the performance of the final building product; (b) Economic, as it provides high yields for both soil and plantations, produces no waste, requires minimal inputs throughout its life cycle (such as plant protection products, water, and energy), and supports the development of a potentially self-sustaining supply chain; (c) Social and ethical, as the expansion of this supply chain would create new employment opportunities, and the absence of harmful substances ensures the safety of both workers and consumers (InterChanvre, 2020).

The barriers hindering the widespread use of hemp products in the construction sector can be attributed to several factors, including the lack of production chains, persistent prejudice toward a raw material perceived as a 'drug', mistrust among professionals in the sector (Capasso et alii, 2024), and various regulatory shortcomings (Aluigi and Viganò, 2016). In this regard, Jami, Karade and Singh (2019) highlight the desirability of including hemp-based concretes in building standards, as these products can positively influence architectural design. Barbhuiya and Bhusan Das (2022) propose the term 'bio-based materials with carbon capture and storage' to describe materials with high carbon storage capacity, focusing on those derived from animal or plant biomass that can also promote biodiversity and the development of local production chains (Morpurgo, 2024).

At present, many building products available on the market can be derived from hemp fibres or hemp shive. The first group includes low to medium-density panels made with hemp fibres and binders, which are commonly used to make coatings or to be inserted into wall cavities. The advantages of using this product lie in its ability to be easily cut on site,

to adapt to existing conditions, and to be laid dry (Perletti, Rattazzi and Zaccanti, 2020), the latter being particularly relevant during selective building demolition.

The second group includes four types of material. High-density slabs are self-supporting products made of hemp shive and binders, used for constructing internal partitions, false ceilings, counter walls, and walls with internal cavities. Like the panels, the slabs can be installed dry or with the aid of mortars; in the latter case, hemp-based mortars are preferred to ensure material homogeneity and continuity. Another product consists of conglomerates of hemp shive, lime, and additives, used for thermal and acoustic insulation, either inserted into the cavities of vertical structures or applied as screeds in horizontal and sloping structures. One of the main advantages of this product is that it is supplied by manufacturers pre-mixed and ready for combination with water (Perletti, Rattazzi and Zaccanti, 2020).

From the conglomerate comes what is commonly referred to as 'hempcrete', a product that, when cast into formwork and used for the construction of non-load-bearing closures (Di Capua et alii, 2021), is ideal for use in combination with wooden platform-frame structures; from an end-of-life perspective, hemp cement has the advantage of material uniformity and therefore the selective disposal phase may be easier and faster. The last product is the lime and hemp shive block, either self-supporting or not, used for constructing enclosures and partitions: these blocks are laid on site with a mortar of the same composition to ensure material and performance continuity in the vertical closures (Perletti, Rattazzi and Zaccanti, 2020).

There are also surface finishing products available on the market, such as plasters and paints, which enhance the thermal insulation performance of the underlying hemp-based materials and reduce energy consumption for heating and cooling indoor spaces. Finally, hemp is a raw material capable of producing building products[1] that are highly soundproof, lightweight, easy to install, durable, resistant to mould, bacteria, and rodents, breathable and moisture-regulating, and fire- and compressive-stress-resistant (EIHA, n.d.; Figg. 5, 6).

Hemp construction | According to data from the European Commission, between 2015 and 2019 industrial hemp cultivation in Europe experienced a significant surge (European Commission, n.d.): the cultivated area increased from 19,970 to 34,960 hectares, representing a 75% growth (Fig. 7), while production increased from 94,120 to 152,820 tonnes (+62.4%), with France accounting for the largest share (60% of the total), followed by Germany (17%) and the Netherlands (5%). Different estimates provided by InterChanvre – the organisation representing the entire French hemp industry – indicate that the cultivated area in Europe reached 58,000 hectares in 2019 (InterChanvre, 2021; Fig. 8); in the following years (2020-2021), a contraction was observed, likely due to the production and logistical slowdowns caused by the pandemic. In 2022, however, the indicators returned to growth, indicating that interest in hemp – driven by the demand for bio-based building materials and by European policies – regained momentum after the temporary pandemic downturn.

However, interest in hemp appears to be growing in Italy, partly due to the attention the sector has received from the scientific community, starting with

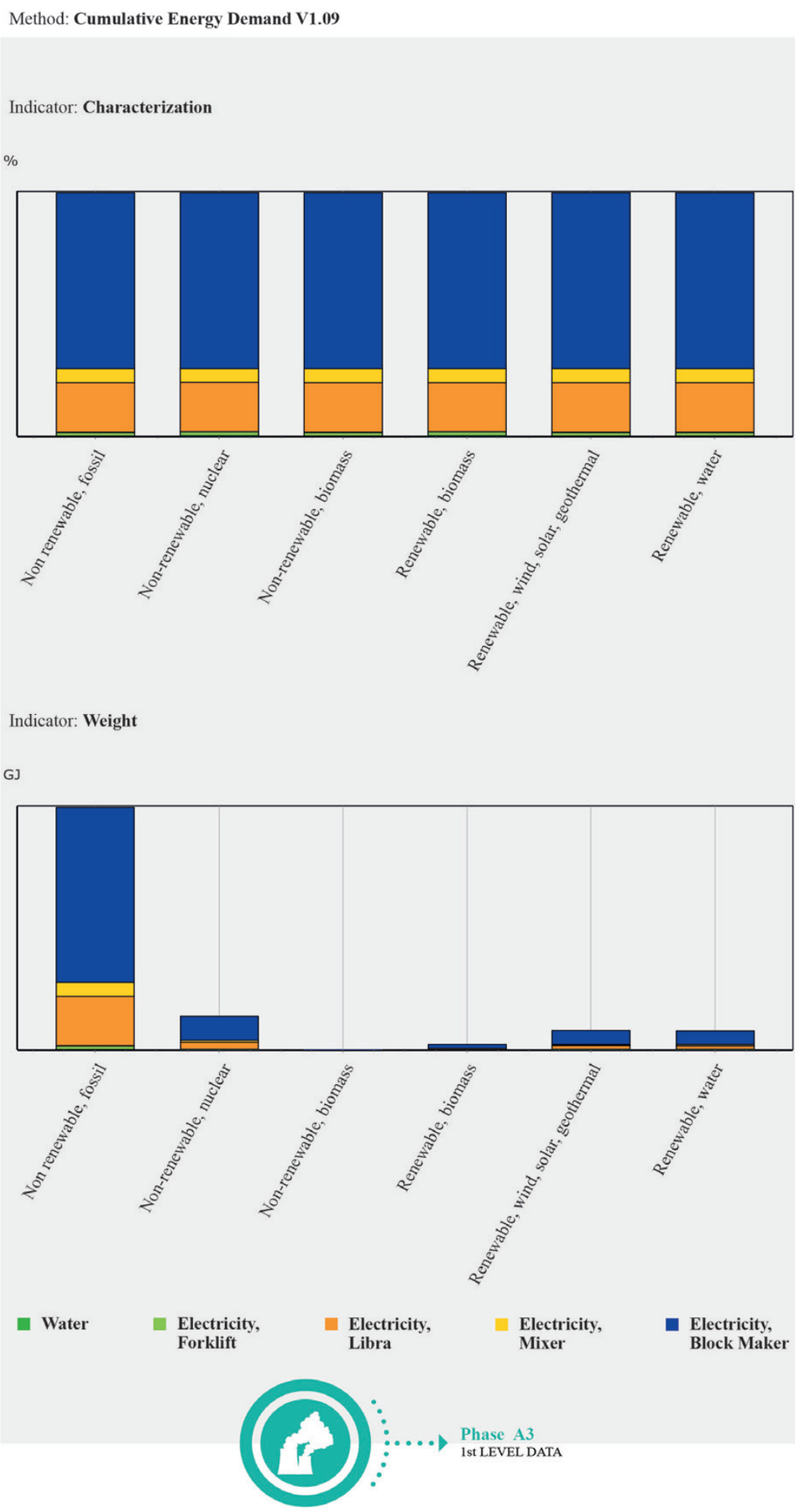


Fig. 12 | A3 phase: Manufacturing processes – Charts of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

the study by Agliata et alii (2020), which examined the energy-saving benefits resulting from the use of a lime and hemp-based composite material with an insulating function in the renovation of Palazzo Jadicicco (17th century), located in Frattamaggiore. The building features a load-bearing structure made of yellow Neapolitan tuff and perforated bricks, with granite cladding on the exterior and gypsum-lime plaster on the interior.

The researchers hypothesised that replacing the external cladding and the non-frescoed interior walls with lime and hemp plaster would improve the building's energy efficiency. The evaluation of the walls' energy performance after the simulated intervention showed a doubling of their insulation capacity, significantly reducing both the energy required for indoor heating and the demand for non-renewable primary energy. On the other hand, Aversa et alii (2021) presented the results of the experimental use of lime and hemp blocks at two construction sites in Sicily and Veneto, verifying that the thermo-hygrometric performance of the product under different climatic conditions, both in winter and in summer, ensures good levels of indoor comfort.

LCA and CED methodology | The studies mentioned above confirm the potential of hemp-based products to reduce the environmental impacts of the construction sector. To validate this assertion, it is necessary to apply standardised tools recognised by the scientific community, including the Life Cycle Thinking (LCT; European Commission, 2003) approach, which aims to reduce the overall environmental impacts of products by minimising the inputs (materials and energy) and outputs (emissions and waste) of production processes (Campioli et alii, 2018), with particular attention to LCA.

Life Cycle Assessment fosters a 'culture of error' that emphasises identifying mistakes as a means to develop innovative and creative solutions (Porfirione, Ferrari Tumay and Leggiero, 2024). In fact, LCA is the tool used to quantify and assess a product's environmental impacts throughout its life cycle. It is a valuable method for analysing product performance against specific environmental indicators, revealing the most impactful process stages (errors) and enabling targeted corrective actions where necessary. In this way, processes become transparent and comparable with the results of other products, enabling an informed selection of the most appropriate solution. LCA is based on UNI EN ISO 14040 and 14044 standards (updated in 2021), which define a methodology capable of modelling environmental impacts through a cause-and-effect pathway that connects each analysed life cycle process with one or more potential effects on humans and the environment, with each effect classified into specific impact categories (Sposito and De Giovanni, 2023). Characterisation models are employed in the assessment phase to convert elementary flows into emissions and corresponding impact categories (European Commission, 2021b).

Midpoint categories include the CED methodology, which provides characterisation factors for energy resources divided into five categories, both non-renewable and renewable. Taking into account energy consumption from 'non-renewable, fossil', 'non-renewable, nuclear', 'renewable, biomass', 'renewable, wind, solar, geothermal' and 'renewable, water' sources (SimaPro, 2020), it is therefore possible, as indicated by Gürzenich et alii (1999), to consider the CED methodology as an indicator of environmental impact in relation to the depletion of energy resources. LCA is essential for reducing the environmental impacts associated with a product's life cycle; however, it is a particularly time-consuming and complex methodology, whose reliability depends on the quality of the data used (Ding, 2014) and the specific characteristics of the production process. The assessment is also influenced by the product's useful life, an aspect that is often overlooked. Moreover, in addition to disregarding temporal distribution, LCA is site-independent – that is, it does not account for the spatial distribution of impacts – therefore allowing the identification of potential rather than actual effects (Muazu, Rothman and Maltby, 2021).

In this study, the environmental impact assessment focuses on applying the CED methodology to quantify the primary energy demand associated with the product's life cycle. Generally, the impact category most commonly used in LCA studies is the Global Warming Potential (GWP), which assesses a product's impact on climate change, expressed in kg CO_{2eq}, and accounts for all major greenhouse gases emitted over a 100-year period. Although the data from CED and GWP differ, both are necessary for a more comprehensive assessment of material selection in the construction of new buildings and in the retrofitting or renovation of existing ones. The combined use of CED and GWP offers a more complete understanding of both the material and the final building product, allowing for the evaluation of energy consumption as well as the product's climate-related life-cycle impacts.

In the present study, the main motivation for investigating the energy consumption of the building product, in line with SDG 7, lies in the fundamental role of energy in achieving and maintaining human well-being, which must be balanced with the limited energy resources available to us (Smil, 2003). While a previous study (Capasso et alii, 2025) identified various categories of environmental impact for the same product type, including the GWP, as defined within the CML-IA baseline methodology, the present work provides an in-depth analysis of the CED methodology.

A review of the scientific literature reveals that few studies explicitly apply the CED methodology to hemp-based building products, instead referring more frequently to embodied energy. In the study by Fu et alii (2024), a comparative LCA is conducted within a 'gate-to-gate' system boundary, comparing the new bacterial retting process with the traditional thermochemical process used to obtain raw hemp fibre. The CED methodology is applied to assess the energy consumption of the two retting methods, revealing a 23.9% reduction in energy use when employing bacterial retting for the production of one gram of hemp fibre.

Díaz, López and Bugallo (2022) evaluate several products derived from agricultural waste biomass to determine which exhibits greater thermal stability. Among the materials analysed is hempcrete, characterised by a thermal conductivity ranging between 0.05 and 0.16 W/mK, a density between 220 and 550 kg/m^3, and a specific heat capacity, as reported by Kinnane et alii (2015), between 900 and 4,700 J/kgK. The analysis conducted by Díaz, López and Bugallo (2022) on the performance of hemp concrete, combined with a cork foam panel and a plasterboard panel, used respectively for insulation and wall closure, revealed a low oscillation wave and a time lag of nine hours. The same study, which included an LCA of the hemp wall based on data from existing databases, reported relatively low values, when compared to those of more conventional materials, for the consumption of the main energy sources considered in the CED methodology.

LCA of the lime and hemp block: sources, limits and reliability of the analysis | To validate the reduced environmental impact of hemp-based building products and their low embodied energy, the LCA of the lime and hemp block was carried out

A3 phase | Hemp-Block Packaging				
Impact Category	**Characterisation**		**Weight**	
	Unit	**Numeric value**	**Unit**	**Numeric value**
Non renewable: fossil	MJ	8.55e3	GJ	8.55
Non renewable: nuclear	MJ	666	GJ	0.666
Non renewable: biomass	MJ	4.16	GJ	0.00416
Renewable: biomass	MJ	3.03e4	GJ	30.3
Renewable: wind, solar, and geothermal	MJ	29.6	GJ	0.0296
Renewable: water	MJ	169	GJ	0.169
			Total	
			GJ	**39.7**

Tab. 4 | A3 phase: Hemp-Block Packaging – Results of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

using the CED methodology. This approach assesses the block's energy consumption throughout its life cycle, identifying the energy resources on which it exerts the greatest impact. It should be noted that the results of the evaluation of the individual phases under analysis are presented to facilitate interpretation of the findings and enable rapid identification of the most energy-intensive and impactful processes.

The LCA was conducted on the lime and hemp block, as recent sales data from the partner company involved in the research project indicated that this component was the most widely used. It is a prefabricated product that enables quick, straightforward installation during construction. Specifically, the block under analysis is EC11/30 measuring 30 x 20 x 40 cm, with a thermal conductivity of 0.0784 W/mK (category T1 – UNI EN 1745:2020), volume mass of 424 Kg/m^3, compressive strength of 0.56 N/mm^2 and thermal transmittance value of the entire vertical closure made only with blocks equal to 0.25 W/m^{2}K.

The block, composed of hemp shive, hydraulic lime, and natural additives, is a massive insulating material that combines thermal insulation properties with thermal mass. It is self-supporting but non-structural, which means it can be used in conjunction with load-bearing frame structures and serve as an infill element for external walls and internal partitions, as cladding, for thermo-acoustic insulation, and as a dehumidifying component in both new constructions and retrofit interventions on existing buildings.

It's worth noting that the block production process is carried out entirely within the same company and includes the following phases: (a) weighing of the components; (b) mixing of the components with the addition of water; (c) pressing and moulding, during which the mixture is poured and compacted inside the moulds and vibrated to remove any air bubbles; (d) open-air drying of the block after demoulding; and (e) storage and warehousing, which involve the use of packaging materials, as wooden pallets, cardboard corner protectors, and PET strapping.

The study employed SimaPro 9.1 calculation software and the Ecoinvent v3 database, integrating specific data where available. The analysis conducted follows a 'cradle-to-gate' approach, encompassing the stages of material supply (phase A1), transport (phase A2), and block production (phase A3). In addition, assumptions were made about environmental loads and benefits across system boundaries (module D), as required by UNI EN 15804:2021 (Fig. 9). The exclusion of modules B and C, which restricts the scope and applicability of the LCA results, is due to the current unavailability of reliable data for these phases. Therefore, excluding the installation, use, and maintenance phases of the product, the production of blocks manufactured over the course of one month was adopted as the declared unit (Capasso et alii, 2025). Due to the confidentiality agreement with the manufacturing company, it is not possible to disclose further details regarding the declared unit or present the detailed results of the analysis; only aggregated values can therefore be reported.

The LCA was carried out using primary data provided directly by the block manufacturer, covering the transport phase from the raw material production sites to the processing facility (phase A1), as well as the entire block production and packaging process (phases A2 and A3). These data are considered reliable because they are specific to the pro-

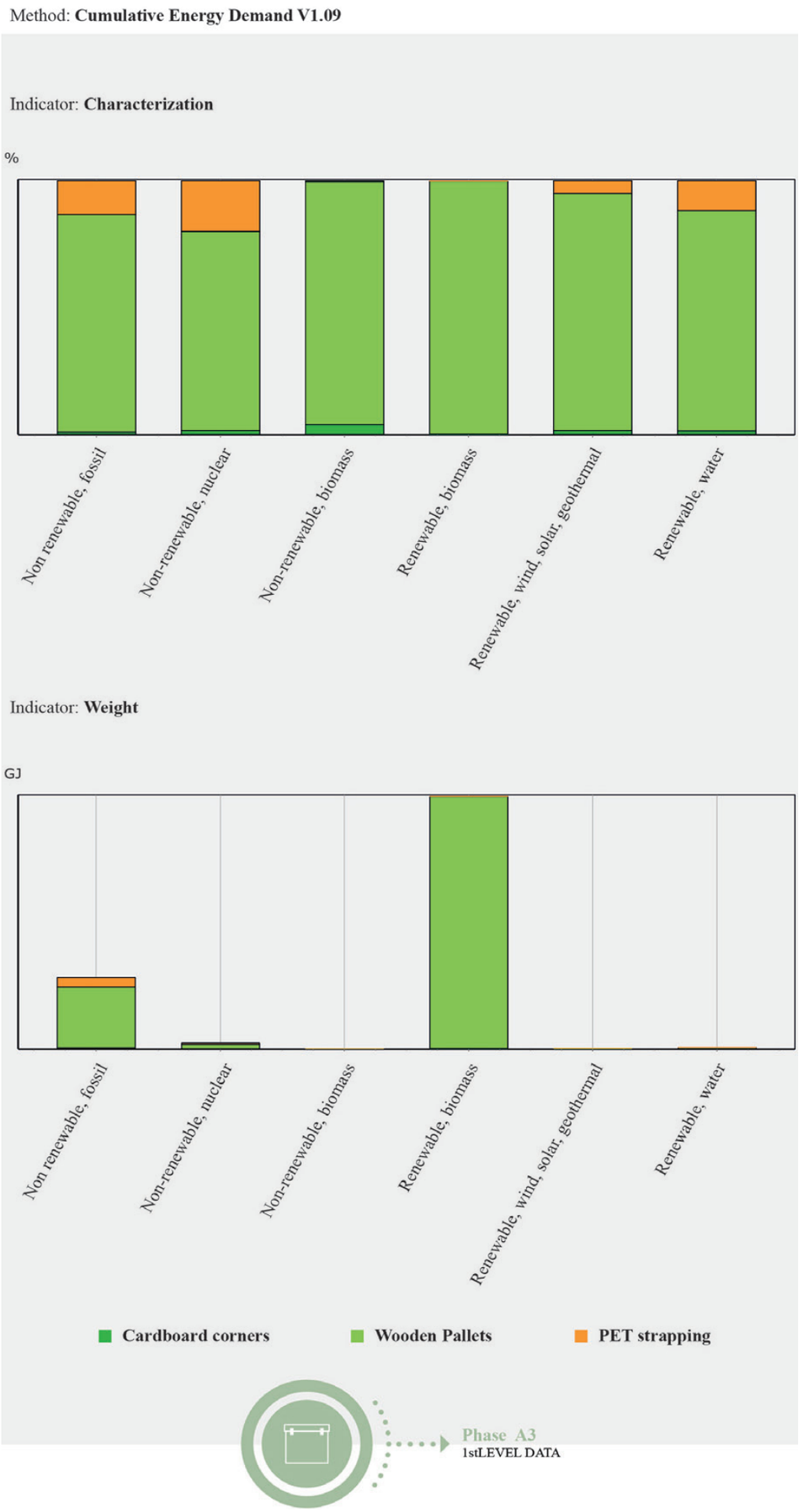


Fig. 13 | A3 phase: Hemp-Block Packaging – Charts of the CED methodology returned by the characterisation factors and the weighting (credit: M. C. Capasso, 2025).

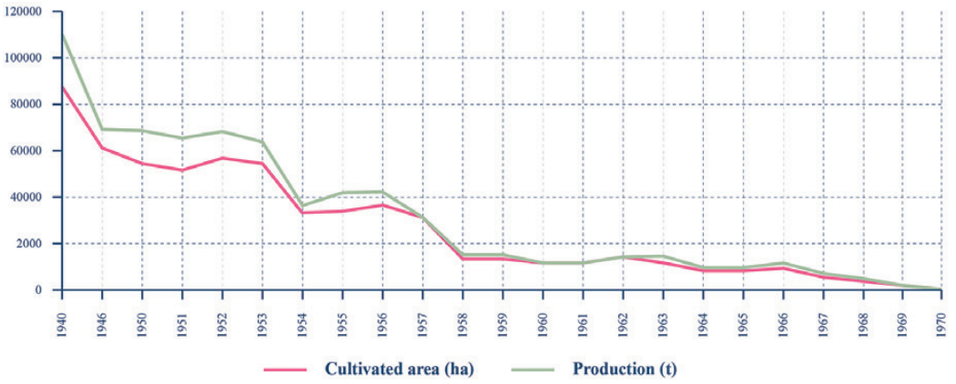


Fig. 14 | The drastic reduction in land cultivated with hemp in Italy from 1940 to 1970 and the relative decrease in the production of hemp fibre (source: Aluigi and Viganò, 2016; adapted by the Author).



Fig. 15 | Diagram showing the trend of hemp cultivation in Italy, in hectares, from 2012 to 2022 and the trend expressed in quintals of raw material production (flowers, leaves, stems) in the same time frame (source: Capasso et alii, 2024; adapted by the Author).

cess under investigation and were collected on-site using dedicated questionnaires prepared by the author in accordance with regulatory standards. Conversely, secondary data were used to describe phase A1, concerning the production processes and the initial transformation of raw materials. These data were derived from the modelling processes of the Ecoinvent database and directly provided by the company CalcePiasco, relating to hemp cultivation and the production of hemp shive. The latter are considered reliable, as they originate from verified and authoritative sources.

The overall assessment applied two methodologies that aggregate the results of the inventory phase into midpoint categories: the CED methodology, which does not evaluate environmental impacts but quantifies the energy required throughout the block's life cycle, and the CML-IA baseline methodology, which assesses the impacts across the main environmental impact categories (SimaPro, 2020). At the endpoint level, the Eco-indicator 99 (H) methodology was applied to assess the life-cycle damage of the block in terms of human health, ecosystem quality, and resource depletion (SimaPro, 2020). As previously noted, this paper presents findings from the application of the CED methodology, aligned with SDG 7, while the complete assessment was discussed in a previous publication (Capasso et alii, 2025).

Results | The application of the CED methodology to phase A1, covering the procurement and initial processing of raw materials used in the block mixture, revealed a greater impact on energy derived from fossil sources, primarily due to the impact of the hydraulic lime production process (Tab. 1; Fig. 10).

Phase A2 concerns the transport of materials from the extraction and initial processing sites to the block production facility. Accordingly, three different transport routes were considered, corresponding to the three materials composing the block. In this case as well, the CED characterisation indicated a higher impact associated with energy from fossil sources, with the transport of hydraulic lime showing the most significant contribution, followed by that of hemp shive (Tab. 2; Fig. 11).

Phase A3 concerns the processes involved in the in-house production of the block, including the energy consumption of the various machines, based on the Italian medium-voltage electricity mix (Capasso et alii, 2025), as well as the use of fresh water in the block mixture. As in the previous phases, the characterisation using the CED methodology revealed a greater impact associated with energy from fossil sources, with the process involving the use of the blockhouse showing the highest contribution (Tab. 3; Fig. 12). In this case, primary data were used, collected through dedicated questionnaires completed during the internal monitoring period conducted within the partner company of the research project.

In phase A3, the contribution of block packaging (comprising cardboard corner protectors, wooden pallets, and PET strapping) was calculated separately, including the processes related to the transport of each component from its production site to the block manufacturing company. In this case, the CED methodology indicated a higher contribution from fossil-fuel energy resources, primarily associated with the use of wooden pallets, followed by PET strapping, while the impact of cardboard corner protectors was almost negligible (Tab. 4; Fig. 13).

By comparing the results of this LCA with those reported in the literature, it can be observed that, overall, the application of the CED methodology to the lime and hemp block yielded low energy consumption values across the analysed phases. Higher consumption was recorded primarily in the first phase (raw material procurement and initial processing) and, subsequently, in the third phase (block production). Although a precise comparison with other studies conducted in recent years is not possible, partly due to differences in the declared or functional units used, a comparison was nonetheless made between the energy consumption of the lime and hemp block and that of other materials more commonly employed in the construction sector, to verify its actual advantages in terms of energy use. Con-

sideration was given to studies that applied the CED methodology to products comparable in both function and thickness to the block under analysis.

As the first comparison product, the perforated brick analysed by Di Capua et alii (2021) was selected. The researchers conducted a comparative LCA within a 'cradle-to-gate' system boundary, examining three different types of vertical enclosures: (a) a hempcrete wall; (b) a hemp and lime block wall; and (c) a perforated brick wall supplemented with an external polystyrene panel to achieve the same thermal insulation performance as the first two walls. The comparison indicates that the perforated brick construction solution exhibits the highest impact in the 'non-renewable, fossil' and 'non-renewable, nuclear' energy categories, primarily due to the use of polystyrene insulation, which is necessary to achieve adequate thermal performance. Hempcrete walls rank second in terms of impact within the fossil energy category, while hemp and lime block walls demonstrate superior performance in this regard.

Wolfova (2020), in a comparative evaluation conducted within a 'cradle-to-gate' system boundary, applied the CED methodology to analyse two external load-bearing walls (functional unit equivalent to one square metre): one constructed with 30 cm-thick brick and the other with 40 cm-thick cellular concrete blocks, both with an insulation layer of expanded polystyrene. The LCA indicates that cellular concrete block masonry performs better than brick masonry across all the energy categories considered. The greatest differences between the two products are observed in the 'non-renewable, fossil' and 'renewable, biomass' categories, in which the brick wall shows a higher impact than the cellular concrete block wall.

As a result of this purely theoretical comparison between the energy consumption of various products used for the construction of vertical closures, we can confirm that lime and hemp block is a suitable product for the construction of 'green buildings', as the incidence of the analysed life cycle phases on the categories of the CED methodology has overall low values, with a higher incidence on non-renewable energy from fossil sources. These results suggest the adoption of renewable energy suppliers to mitigate the impacts of energy consumption and, considering the potential of '0 km' materials, the identification, where possible, of lime and additive suppliers located closer to the block manufacturer, thereby also reducing the energy consumption associated with phase A2.

Since the results of an LCA can vary significantly depending on the preliminary assumptions adopted and the system boundaries defined (Haik, Meir and Peled, 2023), a sensitivity analysis was carried out by replacing the energy input used in phase A3, corresponding to the block production stage. The study involved replacing Italy's medium-voltage grid electricity mix (Capasso et alii, 2024) with energy sourced exclusively from renewable resources. In the final return of the aggregated results of the CED methodology, referring to the entire block cycle (phases A1, A2, and A3 aggregated), there was a significant decrease in energy demand, from 18.0 to 14.7 MJ. In comparison with the baseline results, the sensitivity analysis revealed significant changes in the 'non-renewable, fossil' energy category, which showed a substantial reduction in impact, while the influence of the block increased on the 'renewable, wind, solar, geothermal' and 'renewable, water' energy categories. Since a 'cradle-to-gate' analysis was conducted, one limitation of this study is the lack of information on the impacts associated with the construction and demolition phases, which generate waste and emissions into the environment (Ding, 2014). Despite this limitation, the company's information indicates that on-site block waste can be recovered and reused directly during construction.

Concluding remarks | The concept of sustainability in construction concerns both the creation and use of architectural artefacts and the reduction of energy consumption and the use of natural resources. From this perspective, the central role of the material employed in the production of building components becomes evident (Franzoni, 2011), as does the value of LCA as a systemic approach for assessing the environmental impacts associated with a specific product. Through LCA, it is possible to determine a material's primary energy, namely the energy consumed for the extraction or production of raw materials and the energy required to operate the machinery used in the process (Ding, 2014).

The LCA conducted on the lime and hemp block revealed reduced energy demand across all the main sources considered by the CED methodology, contributing, albeit modestly, to the global reduction of energy consumption and carbon dioxide emissions associated with energy use in the building sector. In light of this, the block represents a product suitable for improving the energy efficiency of buildings and for contributing to the achievement of SDG 7, owing to its high technical performance and, upstream in the process, the use of a highly renewable raw material that requires only a few simple processing steps, thereby ensuring a low embodied-energy content.

By using hemp as a raw material, the construction sector is also directed towards achieving SDG 6, given the limited water required for both hemp cultivation and block production, thereby promoting more equitable access to energy and water resources. The use of hemp also generates co-benefits with SDG 12 (Ensure sustainable consumption and production patterns) and SDG 3 (Good health and well-being), as it not only reduces raw material use, energy consumption, and emissions in the construction sector, but also contributes to high levels of indoor comfort and well-being for users. A material can, in fact, be considered sustainable when it does not produce adverse effects on humans, the natural environment, or the built environment (Ding, 2014).

Despite certain limitations in the process, the LCA conducted is considered a fundamental first step toward recognising and communicating, on a broader scale, the product's environmental performance across its life cycle. A further step will be to extend the current LCA assessment to encompass all phases of the block's life cycle, to issue an Environmental Product Declaration (EPD; UNI EN ISO 14025:2010) and validate its compliance with the Minimum Environmental Criteria. Finally, to obtain a comprehensive understanding of the block's sustainability, it would be advisable to integrate the LCA with economic and social dimensions.

As noted by Aldersoni et alii (2025), significant limitations still hinder the large-scale application of hemp in construction, one of which concerns the understanding of the combined effects of incorporating different materials with verified low carbon emissions within a single building system. Indeed, one of the constraints of this study lies in its focus on a single building product, analysed independently from its context of use.

To enhance the potential of hemp-based building products and overcome the barriers to their widespread adoption, Agliata et alii (2020), while confirming the need to expand research, development, testing, and incentives for this type of product, identify six key pillars/aspects:

1) the technical aspect, which considers all the properties of hemp and its derived building products, while also acknowledging the limited awareness of their benefits among professionals in the sector; this lack of knowledge is partly the result of the gradual disappearance of hemp cultivation techniques in Italy, following the effects of prohibitionism that began in 1937 and culminated in the definitive ban with the approval of the Single Convention on Narcotic Drugs[2] in 1961 (Fig. 14);

2) the commercial aspect, which takes into account the renewed interest in hemp that has emerged only over the past 15 years, marked by a growing demand for products of natural origin; this trend is likely driven by increasing consumer awareness of environmental sustainability issues, as well as by the rising prices of more conventional raw materials following the oil crisis (Dobbs et alii, 2011); such interest is reflected in the expansion of hemp cultivation and production, along with the growing market demand for hemp-based building products (Fig. 15), which, however, could be hindered by the low economic viability of the plantation for its growers, due to the long lead times for raw material storage and the incidence of transport;

3) the knowledge aspect, which highlights the limited awareness among professionals regarding the potential use of hemp in construction;

4) the regulatory aspect, officially recognised by the Italian Parliament (2016, art. 1), which declared that this crop could contribute to the reduction of environmental impact in agriculture and soil consumption, desertification and loss of biodiversity, as well as serve as a possible substitute for surplus crops and as a rotation crop. A recognition that, together with the important technical properties of hemp building products, should be reflected in the development of specific technical standards for hemp construction, as occurred in France in 2014 with the Règles Professionnelles de la Construction en Chanvre[3] and subsequent updates;

5) the psychological aspect, which emphasises the need to enhance the dissemination of knowledge about 'Cannabis sativa' and its derived products, to eliminate any misunderstanding with marijuana;

6) the invisible aspect, related to the competitiveness of hemp-based products compared to traditional building materials, both in terms of performance and the quality of indoor comfort they provide.

In conclusion, this study, centred on the material and its life cycle, highlights the key role of LCA in fostering sustainable practices in the construction sector and in identifying areas for further improvement (Carvalho et alii, 2025). Although the approach presented here focuses on the 'efficiency' of processes, it is equally necessary to promote one based on 'sufficiency' (Ness, 2024), as reaffirmed by the New European Bauhaus (European Commission, 2023, 2021c), to encourage solutions that meet needs and requirements through the use of fewer non-renewable resources and by fostering actions aimed at the recovery and reuse of the existing built heritage.

Acknowledgments

The Author conducted the present study as part of the PON Research Doctorate 'Land Systems and Built Environments' at the 'G. d'Annunzio' University of Chieti-Pescara. The PhD was carried out in partnership with the Institute of Sustainability in Civil Engineering at RWTH Aachen University (Germany) and the company Edilcanapa Srl (Italy).

Notes

1) For more information on hemp building materials, blocks, pre-mixes and panels, please visit: edilcanapasrl.co.uk [Accessed 20 October 2025].

2) For more information, see: treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=VI-15&chapter=6&clang=_en [Accessed 20 October 2025].

3) For more information, see: construire-en-chanvre.fr/documents/pdf/documentation/PAROIS_VERTICALES-Regles_professionnelles_(2024).pdf [Accessed 20 October 2025].

References

Adesina, I., Bhowmik, A., Sharma, H. and Shahbazi, A. (2020), "A review on the current state of knowledge of growing conditions, agronomic soil health practices and utilities of hemp in the United States", in *Agriculture*, vol. 10, issue 4, article 129, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/agriculture10040129 [Accessed 20 October 2025].

Agliata, R., Marino, A., Mollo, L. and Pariso, P. (2020), "Historic Building Energy Audit and Retrofit Simulation with Hemp-Lime Plaster – A Case Study", in *Sustainability*, vol. 11, issue 11, article 4620, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12114620 [Accessed 20 October 2025].

Aluigi, D. and Viganò, E. (2016), "La canapa come opportunità per imprese di sviluppo per le imprese agricole", in *Agriregioni Europa*, vol. 12, issue 45, pp. 113-117. [Online] Available at: hdl.handle.net/11576/2641861 [Accessed 20 October 2025].

Aldersoni, A. A., Ibrahim, A. O., Aldamady, A. A. H., Bashir, F. M., Babatunde, O. E. Dado, Y. A. and Ibrahim, W. (2025), "Investigating the impact of low-carbon building materials on energy consumption and carbon emissions in construction projects", in *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 20, pp. 1581-1592. [Online] Available at: doi.org/10.1093/ijlct/ctaf096 [Accessed 20 October 2025].

Arrigoni, A., Pelosato, R., Melià, P., Ruggeri, G., Sabbadini, S. and Dotelli, G. (2017), "Life cycle assessment of natural building materials – The role of carbonation, mixture components and transport in the environmental impacts of hempcrete block", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 149, pp. 1051-1061. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.161 [Accessed 20 October 2025].

Aversa, P., Marzo, A., Tripepi, C., Sabbadino, S., Dotelli, G., Lauriola, P., Moletti, C. and Luprano, V.A.M. (2021), "Hemplime buildings – Thermo-hygrometric behaviour of two case studies in North and South Italy", in *Energy and Buildings*, vol. 247, article 111147, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111147 [Accessed 20 October 2025].

Azienda Agricola Passerini (2025), *Canapa sativa*. [Online] Available at: aziendapasserini.it/canapa-sativa?utm_source=chatgpt.com [Accessed 20 October 2025].

Barbhuiya, S. and Bhusan Das, B. (2022), "A comprehensive review on the use of hemp in concrete", in *Construction and Building Materials*, vol. 341, article 127857, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127857 [Accessed 20 October 2025].

Bungau, C. C., Bungau, T., Prada, I. F. and Prada, M. (2022), "Green Buildings as a Necessity for Sustainable Environment Development – Dilemmas and Challenges", in *Sustainability*, vol. 14, issue 20, article 13121, p. 1-34. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su142013121 [Accessed 20 October 2025].

Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G. and Castell, A. (2014), "Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Energy Analysis (LCEA) of buildings and the building sector – A review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, pp. 394-416. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037 [Accessed 20 October 2025].

Campioli, A., Dalla Valle, A., Ganassali, S. and Giorgi, S. (2018), "Progettare il ciclo di vita della materia – Nuove tendenze in prospettiva ambientale | Designing the life cycle of materials – New trends in environmental perspective", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 16, pp. 86-95. [Online] Available at: doi.org/10.13128/Techne-23016 [Accessed 20 October 2025].

Capasso, M. C., Traverso, M., Mankaa, R., and Radogna, D. (2024), "The production capacities of Cannabis sativa and its growth Possibilities", in Scholz, S. G., Howlett, R. J. and Setchi, R. (eds), *Sustainable Design and Manufacturing 2023 – Proceedings of the 10th International Conference on Sustainable Design and Manufacturing (KES-SDM 2023), Bari, Italy, September 18-20, 2023*, Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 377, Springer, Singapore, pp. 125-137. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-981-99-8159-5_11 [Accessed 20 October 2025].

Capasso, M. C., Traverso, M., Radogna, D. and Mastrolonardo, L. (2025), "Life Cycle Impact Assessment del blocco in calce e canapa per la bioedilizia", in Raggi, A., Petti, L., Tascione, V. and Arzoumanidis, I. (eds), *Atti del XVIII Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA – Life Cycle Thinking a supporto di modelli di consumo sostenibili, Università degli Studi 'G. d'Annunzio', Pescara, Italy, July 3-5, 2024*, Associazione Rete Italiana LCA, pp. 417-424.

Carvalho, J. G. R. O., Cecchin, D., De Azevedo, A. R. G., Do Carmo, D. F., Paes, J. L., Ferraz, P. F. P., Hamacher, L. S., Costa, K. A. Rossi., G. and Bambi, G. (2025), "Life Cycle Assessment (LCA) in construction materials – Review", in *Agronomy Research*, vol. 23, issue 1, pp. 293-321. [Online] Available at: doi.org/10.15159/AR.25.041 [Accessed 20 October 2025].

Di Capua, S. E., Paoletto, L., Moretti, E., Rocchi, L. and Boggia, A. (2021), "Evaluation of the Environmental Sustainability of Hemp as a Building Material, through Life Cycle Assessment", in *Environmental and Climate Technologies*, vol. 25, issue 1, pp. 1215-1228. [Online] Available at: doi.org/10.2478/rtuect-2021-0092 [Accessed 20 October 2025].

Díaz, A. V., López, A. F. and Bugallo, P. M. B. (2022), "Analysis of Biowast-based Materials in the Construction Sector – Evaluation of Thermal Behaviour and Life Cycle Assessment (LCA)", in *Waste and Biomass Valorization*, vol. 13, pp. 4983-5004. [Online] Available at: link.springer.com/article/10.1007/s12649-022-01820-y?utm [Accessed 20 October 2025].

Ding, G. K. C. (2014), "Life Cycle Assessment (LCA) of sustainable building materials – An overview", in Pacheco-Torgal, F., Cabeza, L. F., Labrincha, J. and De Magalhães, A. (eds), *Eco-Efficient Construction and Building Materials – Life Cycle Assessment (LCA) – Eco-Labelling and Case Studies*, Woodhead Publishing, pp. 38-62. [Online] Available at: doi.org/10.1533/9780857097729.1.38 [Accessed 20 October 2025].

Dobbs, R., Oppenheim, J., Thompson, F., Brinkman, M. and Zornes, M. (2011), *Resource Revolution – Meeting the world's energy, materials, food, and water needs*. [Online] Available at: mckinsey.com/~/media/mckinsey/not%20mapped/test%20copy%20of%20resource%20revolution%20tracking%20global%20commodity%20markets/mgi_resources_survey_full_report_sep2013.pdf [Accessed 20 October 2025].

Dou, S., Zhu, H., Wu, S. and Shen, Y. (2024), "A review of information technology application in reducing carbon emission – From buildings to tunnels", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 452, article 142162, pp. 1-30. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142162 [Accessed 20 October 2025].

EIHA – European Industrial Hemp Association (n.d.), *Canapa – Il vero green deal*. [Online] Available at: eiha.org/wp-content/uploads/2020/09/Canapa-il-vero-green-deal_IT.pdf [Accessed 20 October 2025].

European Commission (n.d.), "Hemp", in *agriculture.ec.europa.eu.* [Online] Available at: agriculture.ec.europa.eu/farming/crop-productions-and-plant-based-products/hemp_en [Accessed 20 October 2025].

European Commission (2023), "New European Bauhaus Academy to build skills for sustainable construction with innovative materials", in *ec.europa.eu*, 18/12/2023. [Online] Available at: ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_ 23_6593 [Accessed 20 October 2025].

European Commission (2021a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Fit for 55 – Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality*, document 52021DC0550, COM/2021/550 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0550 [Accessed 20 October 2025].

European Commission (2021b), *Commission Recommendation on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations*, C/2021/9332 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=intcom:C%282021%299332 [Accessed 20 October 2025].

European Commission (2021c), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – New European Bauhaus – Beautiful, Sustainable, Together*, COM/2021/573 final. [Online] Available at: new-european-bauhaus.europa.eu/system/files/2021-09/COM(2021)_573_EN_ACT.pdf [Accessed 20 October 2025].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640 [Accessed 20 October 2025].

European Commission (2003), *Communication from the Commission to the Council and the European Parliament – Integrated Product Policy – Building on Environmental Life-Cycle Thinking*, document 52003DC0302, COM/2003/302 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52003DC0302 [Accessed 20 October 2025].

European Parliament (2020), *Next Generation EU – A European instrument to counter the impact of the coronavirus pandemic.* [Online] Available at: europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/652000/EPRS_BRI(2020)652000_EN.pdf [Accessed 20 October 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2024), *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings*, document 32024L1275, PE/102/2023/REV/1. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32024L1275 [Accessed 20 October 2025].

Finch, G., Marriage, G., Pelosi, A. and Gjerde, M. (2021), "Building envelope systems for circular economy – Evaluation parameters, current performance and key challenges", in *Sustainable Cities and Society*, vol. 64, article 102561, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scs.2020.102561 [Accessed 20 October 2025].

Franzoni, E. (2011), "Materials selection for green buildings – Which tools for engineers and architects?", in *Procedia Engineering*, vol. 21, pp. 883-890. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2090 [Accessed 20 October 2025].

Fu, Y., Gu, H., Wu, H. F. and Shi, S. Q. (2024), "Comparative Life Cycle Assessment of Bacterial and Thermochemical Retting of Hemp", in *Materials*, vol. 17, issue 16, article 4164, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.3390/ma17164164 [Accessed 20 October 2025].

Gürzenich, D., Mathur, J., Bansal, N. K. and Wagner, H.-J. (1999), "Cumulative energy demand for selected renewable energy technologies", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 4, pp. 143-149. [Online] Available at: doi.org/10.1007/BF02979448 [Accessed 20 October 2025].

Haigh, L. (2023), "Beyond the energy transition", in *Economist Impact | The Sustainability Project*, newspaper online, 31/07/2023. [Online] Available at: impact.economist.

com/sustainability/circular-economies/beyond-the-energy-transition-why-we-need-a-circular-economy-to-keep-human [Accessed 20 October 2025].

Haik, R., Meir, I. A. and Peled, A. (2023), "Lime Hemp Concrete with Unfired Binders vs. Conventional Building Materials – A Comparative Assessment of Energy Requirements and CO_2 Emissions", in *Energies*, vol. 16, issue 2, article 708, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en16020708 [Accessed 20 October 2025].

Huang, W., Shuai, C., Xiang, P., Chen, X., Zhao, B. and Sole, J. (2024), "Assessing the Consumption-based Water Use of Global Construction Sectors and its Impact to the Local Water Shortage", in *Water Resour Manage*, vol. 38, pp. 6063-6078. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11269-024-03944-3 [Accessed 20 October 2025].

IEA – International Energy Agency (2023), *World Energy Outlook 2023*. [Online] Available at: iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf [Accessed 20 October 2025].

InterChanvre (2021), *La filière Chanvre française & la Normandie*.

InterChanvre (2020), *Le Chanvre – Un culture 'verte' incroyable*. [Online] Available at: interchanvre.org/documents/1.Interchanvre/202005_PPT_Le%20Chanvre.pdf [Accessed 20 October 2025].

Ip, K. and Miller, A. (2012), "Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK", in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 69, 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.001 [Accessed 20 October 2025].

Jami, T., Karade, S. R. and Singh, L. P. (2019), "A review of the properties of hemp for green building applications", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 239, article 117852, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852 [Accessed 20 October 2025].

Kinnane, O., McGranaghan, G., Walker, R., Pavia, S., Byrne, G. and Robinson, A. (2015), "Experimental investigation of thermal inertia properties in hemp-lime concrete walls", in *Proceedings of the 10th Conference on Advanced Building Skins*, pp. 942-949. [Online] Available at: researchgate.net/publication/283498250_Experimental_investigation_of_thermal_inertia_properties_in_hemp-lime_concrete_walls [Accessed 20 October 2025].

Li, Y., Li, S., Xia, S., Li, B., Zhang, X., Wang, B., Ye, T. and Zheng, W. (2023), "A Review on the Policy, Technology and Evaluation Method of Low-Carbon Buildings and Communities", in *Energies*, vol. 16, issue 4, article 1773, pp. 1-43. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en16041773 [Accessed 20 October 2025].

Madessa, H. B., Shakerin, M., Reinskau, E. H. and Rabani, M. (2024), "Recent progress in the application of energy technologies in large-scale building blocks – A state-of-the-art review", in *Energy Conversion and Management*, vol. 305, article 118210, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118210 [Accessed 20 October 2025].

Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S. and Dotelli, G. (2014), "Environmental impacts of natural and conventional building materials – A case study on earth plasters", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 80, pp. 179-186. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.073 [Accessed 20 October 2025].

MIMIT – Ministero delle Imprese e del Made in Italy (2023), *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/documenti/PNRR_Aggiornato.pdf [Accessed 20 October 2025].

Morpurgo, E. (2024), "Biomateriali e zone umide – Filiere per l'edilizia e il tessile dalla valorizzazione di ecosistemi locali | Biomaterials and wetlands – Supply chains for construction and textiles through the enhancement of local ecosystems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 314-323. [Online] Available at: doi. org/10.19229/2464-9309/16262024 [Accessed 20 October 2025].

Muazu, R. I., Rothman, R. and Maltby, L. (2021), "Integrating life cycle assessment and environmental risk assessment – A critical review", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 293, article 126120, p. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126120 [Accessed 20 October 2025].

Nazri, F. and Woods, L. D. (2025), "Environmental life cycle assessment of hemp-based thermal insulation – From agricultural growth to manufacturing in the United States", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 506, article 145509, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145509 [Accessed 20 October 2025].

Ness, D. (2024), "La decarbonizzazione degli edifici sarà sufficiente? Limitare e ridistribuire l'aumento di superficie costruita | Will decarbonising buildings be enough? Constrain and redistribute growth in floor area", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 84-97. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1562024 [Accessed 20 October 2025].

Palumbo, E., Romano, R. and Gallo, P. (2024), "Strategie life cycle thinking per la realizzazione di scuole nZEB | Life cycle thinking strategies for constructing nZEB schools", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 252-265. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15202024 [Accessed 20 October 2025].

Parlamento Italiano (2016), "Legge del 2 dicembre 2016, n. 242 – Disposizioni per la promozione della coltivazione e della filiera agroindustriale della canapa", in *Gazzetta Ufficiale,* Serie Generale, n. 304 del 30/12/2024. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/2016/12/30/16G00258/sg [Accessed 20 October 2025].

Perletti, M. A., Rattazzi, A. and Zaccanti, O. (2020), "Nel mondo delle costruzioni", in Perletti, M. A. (ed.), *Costruire sostenibile con la canapa*, Maggiorli Editore, Santarcangelo di Romagna, pp. 51-134.

Porfirione, C., Ferrari Tumay, X. and Leggiero, I. (2024), "Conoscenza, innovazione e cambiamento – Il potere dell'errore nel design e nei sistemi complessi | Knowledge, innovation, and change – The power of error in design and complex systems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 232-241. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16202024 [Accessed 20 October 2025].

Samadikun, B. P., Syafrudin S. and Whayuni, R. H. (2024), "Analysis of Cumulative Energy Demand Potential Using Life Cycle Assessment Approach – A Case Study of XYZ Laboratory", in *Jurnal Presipitasi – Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, vol. 21, issue 3, pp. 894-906. [Online] Available at: doi.org/10.14710/presipitasi.v21i3.894-906 [Accessed 20 October 2025].

SimaPRo (2020), *SimaPro database manual – Methods library*. [Online] Available at: simapro.com/wp-content/uploads/2020/10/DatabaseManualMethods.pdf [Accessed 20 October 2025].

Smil, V. (2003), *Energy at the Crossroads – Global Perspectives and Uncertainties*, MIT Press, Cambridge.

Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), "Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 20 October 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication [Accessed 20 October 2025].

UNEP – United Nations Environment Programme (2024), *Global Status Report for Buildings and Construction – Beyond foundations – Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*, Nairobi. [Online] Available at: doi.org/10.59117/20.500.11822/45095 [Accessed 20 October 2025].

UNI EN 1745:2020, *Masonry and masonry products – Methods for determining thermal properties*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-1745-2020 [Accessed 20 October 2025].

UNI EN 15804:2021, *Sustainability of construction works – Environmental Product Declarations – Core rules for the product category of construction products*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-15804-2021 [Accessed 20 October 2025].

UNI EN ISO 14044:2021, *Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines*. [Online] Available at: store.uni.com/en/search/ALL/1/14044 [Accessed 20 October 2025].

UNI EN ISO 14040:2021, *Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-14040-2021 [Accessed 20 October 2025].

UNI EN ISO 14025:2010, *Environmental labels and declarations – Type III environmental declarations – Principles and procedures*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-14025-2010 [Accessed 20 October 2025].

Wolfova, M. (2020), "Analysing the cumulative energy demand of external bearing walls", in *IOP Conference Series – Materials Science and Engineering*, vol. 867, article 012048, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012048 [Accessed 21 October 2025].

World Business Council for Sustainable Development and ARUP (2023), *Net-zero building – Halving construction emissions today*. [Online] Available at: wbcsd.org/wp-content/uploads/2023/09/Net-zero-buildings_Halving-construction-emissions-today.pdf [Accessed 20 October 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 294-303
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18172025

ARTICLE INFO

Received 17 September 2025
Revised 07 November 2025
Accepted 10 November 2025
Published 30 December 2025

IMPATTI AMBIENTALI E SOCIALI NEL CICLO VITA PER UNA PROGETTAZIONE A BASSO CARBONIO

ENVIRONMENTAL AND SOCIAL LIFE CYCLE IMPACTS FOR LOW-CARBON DESIGN

Elisabetta Palumbo, Irene Mazzei, Martina Perpetua, Francesco Pomponi

ABSTRACT

Il raggiungimento dell'obiettivo di edifici a basse emissioni entro il 2030 impone una revisione integrata dei criteri progettuali che includa una valutazione delle emissioni di carbonio lungo l'intero ciclo vita. Tale valutazione risulta significativamente influenzata da vincoli sismici e territoriali che possono incrementare il potenziale di riscaldamento globale fino al 20%. Tuttavia un approccio focalizzato unicamente sulla dimensione ambientale della sostenibilità rischia di restituire una lettura parziale, trascurando gli impatti sociali su salute e sicurezza dei lavoratori, attori fondamentali dell'intera filiera delle costruzioni. In questa prospettiva il contributo propone un approccio metodologico integrato, basato su E-LCA e , applicato alla componente strutturale di un edificio residenziale pubblico localizzato in un'area a sismicità media, rappresentativa del 60% del territorio della Toscana. L'analisi mette in relazione gli impatti ambientali e sociali dimostrando come la valutazione del rischio infortunistico possa supportare la definizione di metriche utili per i sistemi di etichettatura, sia a livello di prodotto che di edificio.

Achieving the objective of low-emission buildings by 2030 requires an integrated revision of design criteria, including an assessment of carbon emissions throughout the entire building life cycle. Seismic and territorial constraints strongly influence these assessments and can increase global warming potential by up to 20%. However, an approach focused solely on the environmental dimension of sustainability may provide only a partial interpretation. It may neglect the social impacts related to the health and safety of workers, who are fundamental actors across the entire construction supply chain. From this perspective, this study proposes an integrated methodological approach combining environmental and social life cycle assessments. It is applied to the structural component of a public residential building located in an area of medium seismicity, representative of 60% of the territory of Tuscany (Italy). The analysis relates environmental and social impacts, demonstrating how the accident risk assessment can support the definition of useful metrics for labelling systems, both at the product and building levels.

KEYWORDS

carbonio sull'intero ciclo vita, E-LCA, S-LCA, salute e sicurezza sul lavoro, impatti ambientali e sociali

carbon along the entire life cycle, E-LCA, S-LCA, health and safety at work, environmental and social impacts

Elisabetta Palumbo, Architect and PhD, is an Associate Professor at the Department of Engineering and Applied Sciences of the University of Bergamo (Italy). Her research activities focus primarily on tools and metrics for assessing the sustainability of materials, products, and buildings using the life cycle thinking approach. E-mail: elisabetta.palumbo@unibg.it

Irene Mazzei, PhD, is a visiting Researcher at the Department of Engineering and Applied Sciences of the University of Bergamo (Italy). She participates in projects to harmonise LCA practices at the product and building scales. E-mail: irene. mazzei@guest.unibg.it

Martina Perpetua is a Research Fellow at the University of Bergamo (Italy). She conducts research on whole-life carbon in construction sector. E-mail: perpetua.martina @unibg.it

Francesco Pomponi, PhD, is a Full Professor in Sustainability and Environment at the University of York (UK), a Senior Associate at the University of Cambridge's Institute for Sustainability Leadership (UK), and an Honorary Professor at the University of Cape Town (South Africa). E-mail: francesco.pomponi@york.ac.uk

Il settore delle costruzioni in Italia rappresenta una componente significativa dell'economia nazionale, contribuendo per circa il 5,4% al Prodotto Interno Lordo e impiegando oltre 1,3 milioni di persone, pari a circa il 5% dell'occupazione nazionale; oltre a incidere su bilanci economici e occupazionali il comparto edilizio incide sul bilancio delle emissioni nazionali di gas serra, con una quota stimata pari al 18%, prevalentemente riconducibili ai consumi energetici e all'impiego di materiali ad alta intensità di carbonio (Monosilio et alii, 2022; ISTAT, 2024; ISPRA, 2025). La rilevanza e l'interconnessione di questi impatti, che coinvolgono simultaneamente le dimensioni ambientale, economica e sociale della sostenibilità, rendono necessario un ripensamento delle prassi edilizie convenzionali (Pradeep, Rismanchi and Ngo, 2025).

In questo contesto il settore delle costruzioni si configura anche come leva strategica per la creazione di occupazione qualificata e per la transizione verso un'economia a basse emissioni (Legambiente, 2022). Affinché tale potenziale si traduca in una forza lavoro resiliente e sostenibile è essenziale garantire condizioni di lavoro dignitose e standard elevati in materia di salute e sicurezza, in linea con i principi della sostenibilità sociale. Il legame tra neutralità climatica e benessere dei lavoratori assume quindi un ruolo sempre più rilevante, come evidenziato tra le priorità della roadmap congiunta per la competitività e la decarbonizzazione, sviluppata nell'ambito del Clean Industrial Deal (European Commission, 2020, 2025).

Malgrado il quadro normativo nazionale sulla prevenzione degli infortuni e delle malattie professionali il settore continua a registrare un'elevata incidenza di infortuni e patologie professionali, con circa 40.000 casi annuali in aumento rispetto al quinquennio precedente (INAIL, 2023). Per superare tale criticità è necessario strutturare approcci che integrino le tre dimensioni della sostenibilità e modellino scenari alternativi coerenti con le specificità del contesto locale. A tal fine occorre disporre di metodiche di calcolo basate su Life Cycle Thinking (LCT) complementari e riconosciute quali la Environmental Life Cycle Assessment (E-LCA), il Life Cycle Costing (LCC) e la Social Life Cycle Assessment (S-LCA).

Questa esigenza di integrazione è stata ampiamente riconosciuta dalla letteratura come condizione necessaria per affrontare in modo sistemico la complessità della sostenibilità nel settore delle costruzioni. In particolare Larsen et alii (2022), analizzando oltre quaranta studi, mostrano come l'applicazione della LCT in edilizia stia ampli ando il proprio campo di indagine dalla sola fase d'uso alle fasi di produzione, costruzione e fine vita. In questo quadro gli elementi critici di impatto ambientale riguardano la produzione dei materiali e la fase di demolizione che richiedono dati più solidi e una maggiore standardizzazione metodologica.

La centralità dell'approccio E-LCA si conferma anche nel quadro delle politiche europee di decarbonizzazione del Patrimonio edilizio, con particolare riferimento agli edifici a basso consumo energetico e ridotte emissioni di carbonio. In tale direzione la revisione della Direttiva EPBD IV (Energy Performance of Building Directive; European Parliament and Council of the European Union, 2024), la cui entrata in vigore è prevista per il 2027, introduce l'obbligo di calcolare le emissioni lungo tutte le fasi del ciclo vita (Whole Life Carbon – WLC), individuando proprio nella E-LCA lo strumento cardine per la quantificazione delle emissioni di CO_2. Sin dalle sue prime formulazioni metodologiche (Schmidt et alii, 1992) lo sviluppo della E-LCA dovrebbe essere accompagnato dalla considerazione degli impatti sulla salute correlati all'ambiente di lavoro. Tale esigenza trova riconoscimento esplicito anche nelle linee guida UNEP (2009) per la , dove la voce 'salute e sicurezza' è indicata come sottocategoria specifica all'interno del gruppo stakeholder 'lavoratori'.

Nel contesto edilizio tuttavia, mentre E-LCA e LCC hanno raggiunto un livello di maturità metodologica più avanzato, la S-LCA si configura ancora come una metodologia in fase di consolidamento. Nonostante i significativi progressi compiuti negli ultimi anni volti a rafforzare la robustezza analitica e la rilevanza applicativa (Hamed et alii, 2016; Norris, Aulisio and Norris, 2012; Traverso and Mankaa, 2025), la persistente carenza di dati sociali accessibili, affidabili e comparabili costituisce un vincolo metodologico sostanziale; tale limite incide sia sull'evoluzione teorica della disciplina sia sulla sua implementazione operativa in contesti applicativi concreti (Kühnen and Hahn, 2017; Arvidsson et alii, 2018; Ayassamy and Pellerin, 2023). Tale criticità è in parte attribuibile alla scarsa disponibilità di dati empirici e alla limitata propensione degli stakeholder a condividere informazioni sensibili, ostacolando una lettura contestualizzata e realistica degli impatti (Backes and Traverso, 2023). Gli indicatori sociali riguardano infatti dimensioni complesse quali le condizioni di lavoro, l'accesso alle tutele normative e previdenziali e la sicurezza, rendendo difficile una misurazione sistematica e comparabile.

Rispetto alle più recenti riflessioni sul ruolo del settore edilizio nella transizione ecologica diventa sempre più evidente che la sola decarbonizzazione non sia sufficiente a garantire la sostenibilità complessiva del costruito. Come sottolinea Ness (2024) è necessario affiancare alle strategie low-carbon i principi di sufficienza, valutando anche le dimensioni sociali quali il benessere e la sicurezza dei lavoratori al fine di evitare approcci riduttivi centrati esclusivamente sulla CO_{2eq}. Parallelamente la prospettiva proposta da Sposito e De Giovanni (2023) sottolinea la necessità di affrontare la complessità dei sistemi antropici attraverso l'integrazione di strumenti multidimensionali (che integrino LCA, ERA ed ESA), aprendo la strada a modelli di valutazione capaci di cogliere le interazioni tra impatti ambientali e sociali.

Alla luce delle premesse che inquadrano il tema della sostenibilità ambientale e sociale nel settore edilizio il presente contributo propone un approccio metodologico integrato E-LCA / S-LCA, valido per migliorare il processo decisionale attualmente basato esclusivamente sull'E-LCA (Ayassamy and Pellerin, 2023), applicato al caso studio di un edificio residenziale, di proprietà pubblica nella Regione Toscana, progettato in conformità ai requisiti sismici della zona 3 (bassa sismicità) e alle condizioni previste per la zona climatica D. Un tale approccio metodologico integrato, volto a connettere gli impatti ambientali derivanti dai materiali da costruzione (valutati secondo l'E-LCA) con l'indicatore 'salute e sicurezza dei lavoratori', è in linea con le UNEP Guidelines for S-LCA (UNEP, 2020).

In particolare l'obiettivo è correlare l'indicatore ambientale Global Warming Potential (GWP) con un indicatore sociale relativo a 'salute e sicurezza dei lavoratori', elaborato a partire da dati ufficiali sugli infortuni nel settore edile italiano. Il lavoro si articola in due sezioni principali: la prima è dedicata alla quantificazione degli impatti ambientali associati alla struttura portante dell'edificio, adottando il framework europeo Level(s) come riferimento metodologico; la seconda è focalizzata sull'analisi del rischio lavorativo, con l'obiettivo di proporre un modello valutativo più completo e integrato della sostenibilità, capace di coniugare dimensioni ambientali e sociali sin dalle fasi iniziali del ciclo vita edilizio.

Il contributo si distingue per il suo potenziale impatto positivo sulla comunità scientifica, proponendo una prospettiva multidimensionale e replicabile per l'analisi della sostenibilità nel settore delle costruzioni e al tempo stesso favorendo l'avanzamento di metodologie valutative capaci di integrare dimensioni ambientali e sociali in modo coerente e comparabile.

Modello integrato E-LCA / S-LCA: approccio metodologico applicato all'edilizia | Il presente studio, sviluppato applicando il metodo LCA a un edificio campione, ha portato alla definizione di un modello concettuale volto a integrare l'indicatore GWP, previsto dalla metodologia WLC, con un indicatore sociale relativo alla salute e sicurezza dei lavoratori, espresso come livello di rischio, elaborato a partire da dati ufficiali sugli incidenti sul lavoro nel settore edile italiano. La Figura 1 sintetizza l'approccio metodologico adottato, in cui l'analisi sulla componente sociale si sviluppa a partire dalle fasi a maggior impatto ambientale (GWP).

Sebbene lo studio si configuri come un primo tentativo di coordinare E-LCA e S-LCA, tale coordinamento non implica ancora una fusione quantitativa tra le metriche ambientali e sociali pertanto si è scelto di considerare i due ambiti in modo complementare, sviluppando l'analisi sociale a partire dai processi e dalle fasi che hanno maggiore impatto (hotspot) in termini di GWP nella valutazione ambientale. Questa impostazione rappresenta un primo passo verso un modello valutativo più articolato in cui le relazioni tra impatti ambientali e sociali potranno essere ulteriormente approfondite attraverso criteri condivisi di pesatura e normalizzazione.

Tale orientamento trova riscontro anche in letteratura in cui diversi studi hanno mostrato come un approccio integrato che combina E-LCA e S-LCA consenta di valutare in maniera più completa la sostenibilità, focalizzandosi sugli hotspot del sistema: ad esempio Wang, Su e Wu (2022) hanno analizzato un prodotto di illuminazione industriale a LED, evidenziando come le fasi più impattanti dal punto di vista ambientale coincidano con quelle a maggior rischio sociale; in modo analogo Ghisellini, Passaro e Ulgiati (2023) hanno applicato un approccio integrato al sistema di gestione dei rifiuti elettrici ed elettronici in Italia, mostrando benefici ambientali e sociali ma anche criticità legate a trasporto e condizioni di lavoro. Questi contributi dimostrano che l'analisi congiunta delle due dimensioni, ambientale e sociale, è particolarmente utile per individuare nodi critici e orientare strategie di miglioramento, in linea con quanto sviluppato anche nel nostro lavoro.

Nello specifico la fase di analisi dello studio ha riguardato la quantificazione degli impatti ambientali, espressi in kg CO_{2eq}, associati alla struttura portante di un edificio residenziale multiutenza sviluppato su due livelli. L'edificio (Figg. 2, 3), concepito per ac-

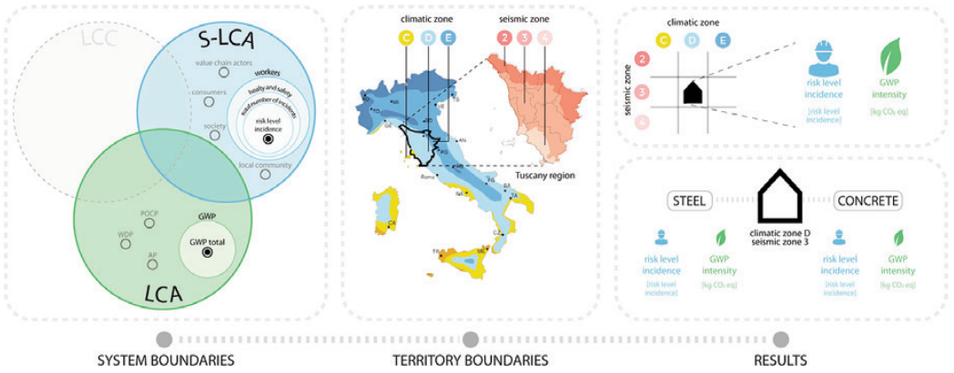


Fig. 1 | Conceptual visualisation of the integrated E-LCA / S-LCA model showing the correlation between environmental impacts (GWP) and social risk (health and safety of workers) in construction (credit: D. De Vito, 2025).

cogliere due tipologie abitative distinte, presenta una configurazione funzionale articolata con al piano terra gli alloggi previsti dal Programma ministeriale 'Dopo di noi', destinati a minori e adulti privi di supporto familiare e ospitati in modo temporaneo o permanente e potenzialmente affetti da disabilità, e al piano superiore trovano otto alloggi sociali rivolti a fasce vulnerabili della popolazione.

Dal punto di vista strutturale, l'edificio si caratterizza per un telaio in acciaio controventato, composto da colonne e travi di piano in profili HEB260 saldati agli elementi verticali; la controventatura orizzontale utilizza profili HEB160 disposti secondo uno schema a triangolo. A sostegno del telaio principale è presente un sistema secondario di irrigidimento verticale in calcestruzzo armato gettato in opera, che aumenta la resistenza complessiva e la capacità di controventatura. Le fondazioni sono a trave rovescia in calcestruzzo armato e i solai sono realizzati con pannelli prefabbricati alleggeriti (predalles) e inserti di polistirene espanso, progettati per assicurare un comportamento rigido da diaframma e distribuire efficacemente i carichi orizzontali.

Lo studio E-LCA adotta come riferimento metodologico il framework Level(s), sviluppato a livello europeo per analizzare e valutare le prestazioni di sostenibilità degli edifici lungo tutto il loro ciclo vita (Dodd et alii, 2017). Nell'ambito dello studio l'analisi si concentra sull'indicatore 1.2 – Potenziale di Riscaldamento Globale nel Ciclo Vita (Life Cycle Global Warming Potential), utilizzando le opzioni semplificate di rendicontazione previste dal sistema Level(s), con un focus esclusivo sulle fasi 'from cradle to gate' (Fig. 4), corrispondenti ai moduli A1 (estrazione e approvvigionamento delle materie prime), A2 (trasporto al sito produttivo) e A3 (processi di produzione). La scelta metodologica è motivata dalla volontà di identificare l'impatto ambientale dei materiali impiegati nella struttura in queste fasi iniziali del ciclo vita, in relazione alla variabilità degli elementi costruttivi adottati e in funzione della zona sismica in cui è situato l'edificio. In tale contesto quindi l'obiettivo principale dell'analisi non è estendere la valutazione agli impatti lungo l'intero ciclo vita, ma valutare le differenze prestazionali e ambientali legate alla progettazione strutturale. Per questo motivo le fasi successive della costruzione (A4-A5), dell'uso (B1-B7) e del fine vita (C1-C4) non sono state incluse nella presente analisi.

La modellazione è stata effettuata con l'ausilio del software One Click LCA, privilegiando valori di impatto di tipo primario, come le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD); inoltre, al fine di comprendere la variabilità degli impatti ambientali e valutare scenari alternativi di decarbonizzazione, oltre allo scenario di progetto ('baseline'), è stato introdotto un secondo scenario ('improved') che prevede la sostituzione dell'acciaio con un materiale dal maggiore contenuto di riciclato e l'impiego di calcestruzzo C30/37, più rappresentativo del contesto produttivo nazionale in quanto comunemente utilizzato per edifici residenziali e commerciali (Coppola et alii, 2023; Tab. 1).

In particolare nella definizione dello scenario migliorativo è stato adottato un criterio di sostituzione dei materiali volto a ridurre il potenziale di riscaldamento globale (GWP), garantendo al contempo la medesima funzione tecnica e la stessa classe prestazionale delle soluzioni originarie. Le alternative selezionate non introducono materiali radicalmente differenti, ma rappresentano varianti a minore impatto rispetto ai prodotti già previsti nello scenario di riferimento. Allo scopo sono state privilegiate due strategie: l'impiego di calcestruzzi con resistenze equivalenti, ma caratterizzati da un minor contenuto di clinker o da un maggiore utilizzo di materiale riciclato, e la sostituzione di acciai e componenti prefabbricati caratterizzati da un più elevato contenuto di riciclato o da processi produttivi più efficienti.

La fattibilità delle sostituzioni è stata verificata rispetto alla reale disponibilità sul mercato nazionale ed europeo e alla conformità alle normative tecniche vigenti, assicurando così la piena compatibilità con le esigenze strutturali e prestazionali dell'edificio. Questo approccio ha consentito di mantenere la coerenza funzionale tra scenario di riferimento e scenario migliorativo, dimostrando come sia possibile conseguire una riduzione degli impatti ambientali attraverso scelte mirate di materiali a più basso GWP senza alterare la tipologia costruttiva né le prestazioni richieste.

A seguito dell'analisi E-LCA è stata avviata la valutazione degli impatti sociali, con particolare riferimento alla categoria 'salute e sicurezza dei lavoratori', considerata prioritaria e di particolare rilevanza nei cantieri edilizi e nelle attività di produzione dei materiali da costruzione. Tra gli indicatori sociali utilizzati per l'analisi si annoverano il tasso di infortuni sul lavoro, la mortalità professionale e la presenza di dispositivi di protezione individuale, elementi fondamentali per la valutazione delle condizioni di rischio e tutela nei contesti produttivi e di cantiere (INAIL, 2023). Un approccio robusto di S-LCA è stato delineato da Mancini et alii (2018) per l'analisi sociale delle catene di approvvigionamento delle materie prime. In questo studio la 'salute e sicurezza dei lavoratori' è descritta in categorie di impatto quali salario equo, orario di lavoro, salute e sicurezza, protezione sociale e libertà di associazione (Fig. 5); questi parametri sono misurati attraverso fonti statistiche internazionali, banche dati sociali e documentazione normativa, con l'obiettivo di garantire trasparenza, comparabilità e rilevanza sociale nell'ambito della valutazione S-LCA.

Per valutare gli impatti sociali sui lavoratori lungo la filiera dei materiali da costruzione, con particolare riferimento a calcestruzzo e acciaio il presente studio impiega un approccio 'operativo'. L'analisi sociale è stata circoscritta ai lavoratori coinvolti nelle fasi di produzione e di costruzione dell'edificio, in coerenza con i confini di sistema adottati per l'E-LCA, limitati ai moduli A1-A3. Tale scelta ha consentito di garantire un allineamento metodologico tra le dimensioni ambientale e sociale, individuando come stakeholder rilevanti esclusivamente le categorie direttamente esposte nelle fasi in esame. La valutazione è stata condotta utilizzando dati primari di tipo statistico provenienti da fonti nazionali[1], così da assicurare robustezza e comparabilità dei risultati, evitando approcci qualitativi meno sistematici. I lavoratori rappresentano infatti la classe sociale per la quale sono disponibili informazioni affidabili e regionalizzate, rendendo possibile una prima applicazione del modello.

Altre categorie di operatori che possano essere coinvolte con impatti negativi lungo l'intero ciclo vita dell'edificio saranno considerate nelle future estensioni della metodologia. In questa fase, seguendo le indicazioni della letteratura internazionale e delle linee guida UNEP (2020), l'analisi si concentra sugli stakeholder più direttamente coinvolti, per valutare in modo mirato gli aspetti di salute e sicurezza nella filiera dei materiali da costruzione.

Oltre alla valutazione dell'incidenza degli infortuni lo studio prende in esame la diffusione e la tipologia di malattie professionali correlate all'ambiente lavorativo, sempre sulla base dei dati INAIL (2025). Ciascun indicatore è stato successivamente valutato attraverso un sistema di punteggio basato sul rischio, in linea con la metodologia proposta da Mancini et alii (2018) che consente di attribuire un livello di criticità sociale alle diverse fasi e materiali della filiera edilizia.

Per la valutazione del rischio legato agli infortuni sono state definite tre soglie di rischio – basso, medio e alto – basate sull'incidenza degli infortuni nei diversi settori. Il calcolo delle soglie è stato effettuato determinando la media del numero di casi di infortunio per settore (Equazione 1) e la relativa deviazione standard (Equazione 2); la media rappresenta una misura di tendenza centrale, mentre la deviazione standard quantifica la dispersione dei dati rispetto a tale valore. La definizione degli intervalli di rischio si basa sullo scostamento dei valori osservati rispetto alla media, consentendo di individuare categorie di rischio (basso, medio, alto) fondate su variazioni significative rispetto al comportamento medio del campione.

Equazione 1) $\bar{x} = \sum xi / n$

Equazione 2) $\sigma = \sqrt{(\sum (xi - \bar{x})^2 / n-1)}$

dove '$\bar{x}$' è il valore medio, 'xi' si riferisce ai singoli valori, 'n' corrisponde al numero di valori nel cam-

pione e 'σ' corrisponde alla deviazione standard. Le soglie di rischio sono state quindi definite come 'basso rischio' (incidenza < media – 0,5 σ), 'medio rischio' (media – 0,5 σ ≤ incidenza ≤ media + 0,5 σ) e 'alto rischio' (incidenza > media + 0,5 σ).

Carbonio incorporato e rischio lavorativo: un approccio integrato alle filiere produttive | Ai fini dello studio l'analisi si è concentrata esclusivamente sugli elementi che costituiscono la struttura portante dell'edificio. Nella composizione della struttura analizzata, riportata in Figura 6, il calcestruzzo è la componente predominante, rappresentando circa il 97% della massa complessiva dell'intera struttura.

L'analisi LCA, focalizzata sulla valutazione del GWP, è stata condotta sia sulla versione 'baseline' dell'edificio sia su una versione ipotetica 'improved', nella quale alcuni materiali – in particolare calcestruzzi e acciaio – sono stati sostituiti con alternative a minore impatto ambientale, grazie a un maggiore impiego di componenti riciclati o a soluzioni di alleggerimento. Tali modifiche hanno determinato una riduzione dell'impatto del 31,3% per le fondazioni, del 42,2% per colonne, pilastri e travi in acciaio, del 25,6% per le sole strutture in acciaio del primo piano e del 16,7% per le controventature in acciaio degli orizzontamenti (Tab. 2). La Figura 7 presenta una panoramica delle emissioni in tonnellate di CO_{2eq} attraverso l'indicatore GWP calcolato per le fasi A1-A3 degli elementi della struttura portante dell'edificio, relativo alla struttura 'baseline' e a quella 'improved'.

Per l'analisi degli impatti sociali sono stati utilizzati i dati ISTAT (2023) relativi al numero di addetti nei settori Ateco 2007 'Estrazione di pietra, sabbia e argilla' [081], 'Trasporto di merci su strada e servizi di trasloco' [494], 'Fabbricazione di elementi da costruzione in metallo' [251] e 'Fabbricazione di prodotti in calcestruzzo, cemento e gesso' [236] e al numero di infortuni sul lavoro, in particolare nella Regione Toscana per una puntuale e specifica analisi territoriale della distribuzione degli eventi infortunistici. L'analisi del ciclo vita è stata condotta considerando le fasi A1-A2-A3 per la produzione del calcestruzzo, mentre per l'acciaio sono state incluse esclusivamente le fasi A2 e A3. Tale scelta metodologica si rende necessaria poiché le attività estrattive primarie della produzione del minerale di ferro non risultano localizzate sul territorio italiano. La caratterizzazione degli addetti è riportata in Tabella 3.

Questa scelta è supportata dal documento ISTAT 'Import-Export materie prime' (Morrone and Lanci, 2020) che evidenzia da un lato la dipendenza strutturale dell'Italia dalle importazioni di materie prime, dall'altro che le attività minerarie associate alla produzione dell'acciaio sono localizzate in diverse aree geografiche del pianeta. A titolo esemplificativo i grandi operatori del settore come ArcelorMittal[2] dichiarano di estrarre le materie prime in Canada, Brasile, Ucraina e Liberia, di conseguenza non è stato possibile includere nella valutazione il contributo occupazionale e infortunistico della fase A1 per l'acciaio, poiché i dati ISTAT utilizzati per l'analisi territoriale non coprono le attività estrattive estere.

I risultati riportati nelle Figure 8 e 9 mostrano il numero degli infortuni totali registrati nell'anno 2023 e la loro incidenza sul numero di addetti documentati in ogni Regione. La media e la deviazione standard sono state quindi calcolate sull'incidenza degli infortuni registrati nel 2023 e i risultati ottenuti hanno consentito di definire le categorie di rischio (Fig. 10).

I dati ISTAT relativi alla Regione Toscana, area di riferimento per il caso studio in esame, hanno evidenziato che nel 2022 la produzione di opere in acciaio per l'edilizia ha un'incidenza media degli infortuni sul lavoro pari a 1,2% per la fase A2 e a 0,5% per la fase A3, mentre la produzione di calcestruzzo ha un'incidenza pari a 2,9% per la fase A1, 1,3% per la fase A2 e 0,6% per la fase A3, per un totale del 4,8% sulle fasi A1-A3: nell'insieme i dati indicano un rischio medio-alto di incidenti sul lavoro nella produzione di acciaio e calcestruzzo per l'edilizia.

Limiti, criticità, replicabilità e trasferibilità dello studio | Il lavoro presenta alcuni limiti che meritano di essere discussi. In primo luogo le dimensioni ambientali e sociali sono state analizzate separatamente: questa scelta deriva dall'assenza, ad oggi, di valori soglia o criteri condivisi che consentano un confronto diretto tra indicatori eterogenei, come l'indicatore GWP e i fattori di rischio infortunistico per i lavoratori. Tale impostazione ha permesso di mantenere rigore metodologico, ma ha inevitabilmente ridotto la possibilità di restituire una visione pienamente integrata della sostenibilità; in prospettiva sarà necessario sviluppare strumenti capaci di mettere in relazione le due dimensioni attraverso criteri di pesatura e normalizzazione condivisi a livello internazionale

Dal punto di vista sociale l'analisi si è concentrata esclusivamente sui lavoratori coinvolti nelle fasi di produzione e costruzione (A1-A3), scelta dettata sia dalla necessità di mantenere coerenza con i confini dell'analisi ambientale sia dalla disponibilità di dati statistici affidabili e comparabili a livello nazionale; ciò da un lato ha rafforzato la solidità dei risultati, dall'altro ha escluso altri stakeholder potenzialmente rilevanti come le comunità locali o gli utenti finali che potranno essere inclusi in futuri sviluppi della metodologia. In sintesi il lavoro ha privilegiato rigore, coerenza e applicabilità immediata a scapito di una visione più ampia e integrata; le criticità individuate non rappresentano limiti insormontabili, ma piuttosto punti di partenza per ulteriori approfondimenti volti a estendere l'analisi a un numero maggiore di attori sociali, a fasi ulteriori del ciclo vita e a scenari progettuali più innovativi.

Tuttavia lo studio presentato si caratterizza per un elevato grado di replicabilità, grazie alla condivisione trasparente delle fonti e delle informazioni utilizzate. Per l'analisi ambientale sono stati resi disponibili i materiali, le quantità e le specifiche relative al software e ai database impiegati, consentendo ad altri ricercatori di riprodurre i risultati o adattarli a contesti differenti. Sul piano sociale l'utilizzo di banche dati pubbliche e liberamente accessibili, come quelle di ISTAT e INAIL, garantisce non solo la verificabilità dei dati ma anche la possibilità di estendere la metodologia ad altri casi studio. L'approccio può inoltre essere trasferito ad altri stakeholders, a condizione che siano disponibili dati strutturati e sistematici in archivi ufficiali, rendendo la metodologia applicabile in contesti territoriali e settoriali diversi.

Riflessioni conclusive | In Italia la presenza di quattro zone sismiche comporta requisiti strutturali specifici che influenzano tanto la scelta dei materiali quanto l'impronta di carbonio degli edifici. Studi recenti evidenziano come nelle aree ad elevata pericolosità sismica l'adozione di rinforzi strutturali possa determinare un aumento del GWP iniziale compreso tra il 10% e il 20% rispetto a edifici situati in zone a bassa sismicità. Alla luce di queste evidenze la valutazione di specifiche filiere produttive diventa cruciale per promuovere una decarbonizzazione efficace lungo l'intero ciclo vita dell'edificio, ma un approccio focalizzato esclusivamente sulla dimensione ambientale della sostenibilità rischia di trascurare aspetti altrettanto rilevanti, come quelli legati al benessere e alla salute dei lavoratori che rappresentano la spina dorsale del settore delle costruzioni.

Durante la fase di analisi è emerso che l'integrazione degli aspetti sociali negli strumenti di valutazione degli impatti ambientali dei prodotti da costruzione è attualmente riferita alle pietre ornamentali, a livello europeo attraverso l'indicatore 2.7 dell'etichettatura Ecolabel per i rivestimenti ornamentali e a livello italiano all'interno dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) relativi all'arredo urbano. Tuttavia non esiste ancora una proposta metodologica strutturata che consenta di integrare in modo coerente gli impatti ambientali (E-LCA) con quelli sociali (S-LCA).

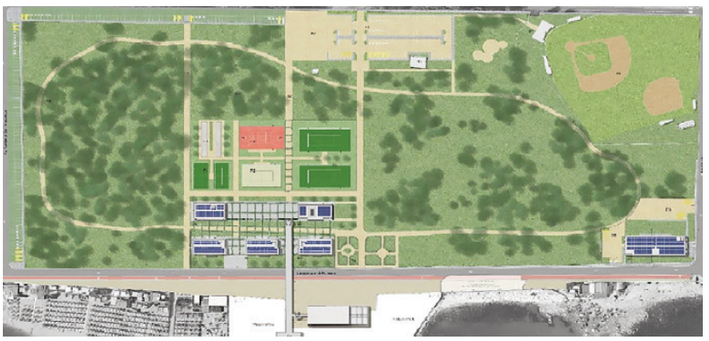


Fig. 2 | Masterplan where the building under analysis is located (credit: StudioInTre, 2025).



Fig. 3 | 3D model of the building (credit: StudioInTre, 2025).

Lo studio qui presentato, pur limitato a un singolo edificio e a un numero contenuto di materiali, si propone come schema metodologico preliminare volto a definire una metrica integrata di valutazione degli impatti ambientali e sociali. Questo approccio, se affinato ed esteso a ulteriori indicatori rilevanti – quali il salario equo e la parità di genere – potrebbe essere integrato nei sistemi di etichettatura, sia a scala di prodotto che a scala edilizia, contribuendo a una lettura più completa e multidimensionale della sostenibilità nel settore delle costruzioni.

L'adozione di approcci di ricerca integrati, come quello proposto, contribuisce direttamente a diversi Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), promuovendo condizioni di lavoro più sicure e dignitose (SDG 8), sostenedo la realizzazione di edifici resilienti e inclusivi (SDG 11), incoraggiando modelli di produzione e consumo più responsabili attraverso l'uso del Life Cycle Thinking (SDG 12) e riducendo le emissioni climalteranti lungo l'intero ciclo vita (SDG 13). Allo stesso tempo l'integrazione tra le dimensioni ambientali e sociali genera sinergie indirette con altri obiettivi chiave: tutela della salute e del benessere (SDG 3), promozione dell'innovazione tecnologica e infrastrutturale (SDG 9), riduzione delle disuguaglianze territoriali (SDG 10).

È necessario riconoscere anche la presenza di potenziali compromessi, ad esempio tra la riduzione delle emissioni e i costi economici (SDG 1 e SDG 8) o tra la sicurezza dei lavoratori e la rapidità dei processi costruttivi. In questo scenario complesso l'approccio integrato E-LCA / S-LCA si propone come uno strumento operativo per bilanciare benefici e compromessi, orientando le decisioni progettuali verso una sostenibilità autenticamente multidimensionale e sistemica.

The construction sector in Italy represents a significant component of the national economy, contributing about 5.4% to the gross domestic product and employing over 1.3 million people, equivalent to about 5% of national employment; in addition to influencing economic and employment dynamics, the building sector affects national greenhouse gas emissions, accounting for an estimated 18%, mainly attributable to energy consumption and the use

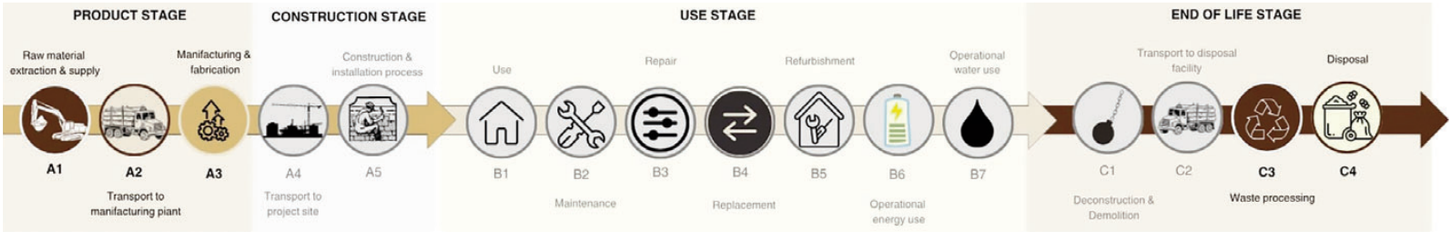


Fig. 4 | System boundaries adopted in the E-LCA (credit: the Authors, 2025).

Classification	Component name	Materials	
		Baseline	Improved
1.1.1.Standard foundations	Concrete layer	Ready mix concrete C12/15	Ready mix concrete C12/15
1.1.1.Standard foundations	Reinforcement steel bars	Hot rolled reinforcement rebars	Reinforcing steel bars
1.1.1.Standard foundations	inverted steel beams	Ready mix concrete C35/45	Ready-mix concrete C30/37
1.1.3.Lowest floor construction	concrete casting for slab (Ground floor)	Ready mix concrete RCK30	Ready-mix concrete Rck30 S5 XC1
1.1.3.Lowest floor construction	reinforcement steel for slab (Ground floor)	electro-welded reinforced steel mesh	Cold rolled electro-welded mesh
1.1.3.Lowest floor construction	Expanded polystyrene layer for slab (Ground floor)	Expanded polystyrene insulation	Expanded polystyrene insulation
1.1.3.Lowest floor construction	concrete layer for slab (Ground floor)	Ready mix concrete RCK30	Slab or pre-slab, aerated concrete
2.2.1.Floors	concrete casting for slab (First floor)	Ready mix concrete RCK30	Ready-mix concrete Rck30 S5 XC1
2.2.1.Floors	reinforcement steel for slab (First floor)	Electro-welded reinforced steel mesh	Cold rolled electro-welded mesh
2.2.1.Floors	Expanded polystyrene layer for slab (First floor)	Expanded polystyrene insulation	Expanded polystyrene insulation
2.2.1.Floors	concrete layer for slab (First floor)	Ready mix concrete RCK30	Slab or pre-slab, aerated concrete
2.3.1.Roof structure	concrete casting for slab (cover)	Ready mix concrete RCK30	Ready-mix concrete Rck30 S5 XC1
2.3.1.Roof structure	reinforcement steel for slab (cover)	Electro-welded reinforced steel mesh	Cold rolled electro-welded mesh
2.3.1.Roof structure	Expanded polystyrene layer for slab (cover)	Expanded polystyrene insulation	Expanded polystyrene insulation
2.3.1.Roof structure	concrete layer for slab (cover)	Ready mix concrete RCK30	Slab or pre-slab, aerated concrete
2.1.1.Steel frames	Reinforcement steel bars for ground floor	Hot rolled reinforcement rebars	Reinforcing steel bars
2.1.3.Concrete casings to steel frames	Concrete casting for ground floor	Ready mix concrete C35/45	Ready-mix concrete Rck30 S5 XC1
2.1.1.Steel frames	Reinforcement steel bars for first floor	Hot rolled reinforcement rebars	Reinforcing steel bars
2.1.3.Concrete casings to steel frames	Concrete casting for first floor	Ready mix concrete C35/45	Ready-mix concrete Rck30 S5 XC1
2.1.1.Steel frames	Steel columns	Structural steel beams	Structural steel sections and merchant bars
2.1.1.Steel frames	Steel beams	Structural steel beams	Structural steel sections and merchant bars
2.1.1.Steel frames	Steel braces	Structural steel beams	Structural steel sections and merchant bars
2.1. Frame	gypsum board	Reinforced gypsum board	Reinforced gypsum board
2.1. Frame	column insulation	Expanded polystyrene insulation	Expanded polystyrene insulation
2.2.1.Floors	cementitious screed	Lightweight ready mix concrete	Lightweight ready mix concrete

Tab. 1 | Materials and components of the building's load-bearing structure, classified according to Level(s) categories, for 'baseline' and 'improved' scenarios (credit: StudioInTre, 2025).

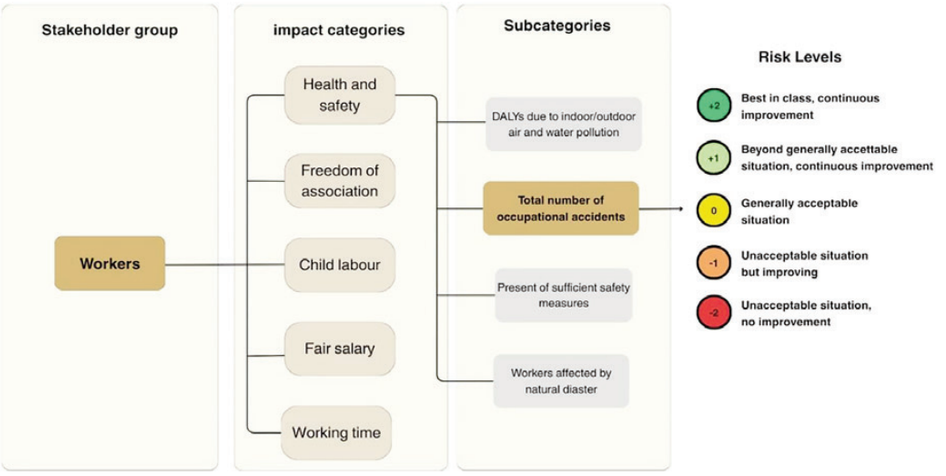


Fig. 5 | Social impact categories associated with workers; the health and safety category, particularly the indicator based on workplace accidents, is highlighted because it is relevant to this study (source: Mancini et alii, 2018).

Tab. 2 | Impact reduction -GWP Intensity kg CO_{2eq} / kg between original and improved building (credit: the Authors, 2025).

Builiding element	Quantity (Kg)	Original	GWP intensity (kg CO_{2eq}/kg)	Improved	GWP intensity (kg CO_{2eq}/kg)	Difference (%)
Foundation	103,766.36	Ready mix concrete C 35/45	0.16	Ready mix concrete C30/37	0.11	-31.3
Slab (ground floor, first floor, roof)	6,661.35	Hot rolled electro-welded steel mesh	0.78	Cold rolled electrowelded steel mesh	0.65	-16.7
First floor steel structure	47,291.98	Reinforcement rebars (85% recycled)	0.78	Reinforce-ment rebars (100% recycled)	0.58	-25.6
Steel columns, beam and braces	115,658.7	Structural steel beams (85% recycled)	0.9	Structural steel beams (100% recycled)	0.52	-42.2

Tab. 3 | Characterisation of workers with ATECO codes divided by phase (credit: the Authors, 2025).

	Concrete	Stone
A1	[081] Quarrying of stone, sand and clay	No data
A2	[494] Road haulage and removal services	[494] Road haulage and removal services
A3	[236] Manufacture of concrete, cement and plaster products	[251] Manufacture of metal construction elements

of high-carbon-intensity materials (Monosilio et al., 2022; Istituto Nazionale di Statistica (lit. National Institute of Statistics) ISTAT, 2024; Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (lit. Higher Institute for Environmental Protection and Research) ISPRA, 2025). The relevance and interconnection of these impacts, which simultaneously involve the environmental, economic, and social dimensions of sustainability, necessitate rethinking conventional building practices (Pradeep, Rismanchi and Ngo, 2025). In this context, the construction sector is also a strategic lever for creating qualified employment and transitioning toward a low-emission economy (Legambiente, 2022). It is essential for the sector to develop a resilient and sustainable workforce, ensuring decent working conditions and high health and safety standards, in line with the principles of social sustainability. The link between climate neutrality and workers' well-being therefore plays an increasingly important role, as indicated by the priorities of the joint roadmap for competitiveness and decarbonisation under the Clean Industrial Deal, a European Commission strategy to decarbonise industry while boosting competitiveness (European Commission, 2020, 2025).

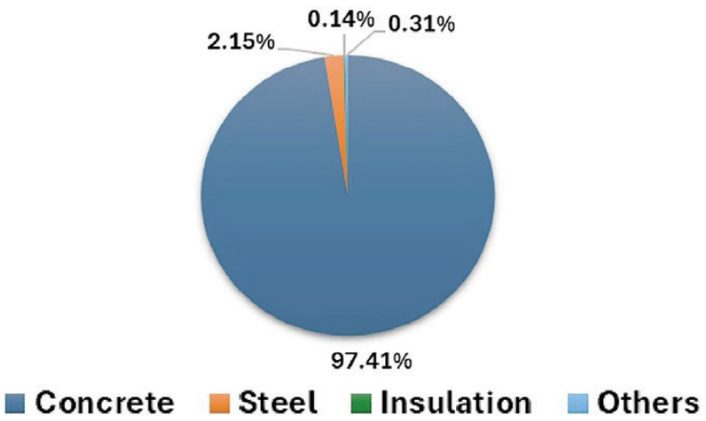
Despite current regulations, the sector continues to record a high incidence of accidents and occupational diseases, with an increase of about 40,000 cases per year compared to the previous five-year period (INAIL, 2023). Addressing this critical issue requires calculation methods based on life cycle thinking (LCT) and complementary recognised approaches, such as environmental life cycle assessment (E-LCA), life cycle costing (LCC), and social life cycle assessment (S-LCA). This allows for structuring approaches that integrate the three dimensions of sustainability and the modelling of alternative scenarios consistent with the local context.

The need for integration has been widely recognised in the literature as a necessary condition for systematically addressing the complexity of sustainability in the construction sector. Larsen et alii (2022), analysing over 40 studies, showed how the application of LCT in buildings is expanding its field of investigation from the use phase to the production, construction, and end-of-life phases. In this framework, the critical environmental impact elements concern the production of materials and the demolition phase, which require robust data and greater methodological standardisation.

The importance of the E-LCA approach is also confirmed in European decarbonisation policies for the building stock, particularly those targeting low-energy buildings and reduced carbon emissions. In this direction, the revised Energy Performance of Buildings Directive (European Parliament and Council of the European Union, 2024), scheduled to enter into force in 2027, introduces the obligation to calculate emissions across all life cycle phases (Whole Life Carbon – WLC). The directive identifies E-LCA as the key tool for quantifying CO_{2eq} emissions. Since its early methodological formulations (Schmidt et alii, 1992), the development of E-LCA has required consideration of health impacts related to the working environment. This need is also explicitly recognised in the United Nations Environment Programme (UNEP, 2009) guidelines for S-LCA, which designate 'health and safety' as a subcategory within the 'workers' stakeholder group.

In the building context, however, while E-LCA and LCC have reached greater methodological maturity, S-LCA remains in the consolidation process. Despite significant recent progress in strengthening analytical robustness and practical relevance (Hamed et alii, 2016; Norris, Aulisio and Norris, 2012; Traverso and Mankaa, 2025), the persistent lack of accessible, reliable, and comparable social data remains a substantial methodological constraint; this limitation affects both the theoretical evolution of the discipline and its operational implementation in practical contexts (Kühnen and Hahn, 2017; Arvidsson et alii, 2018; Ayassamy and Pellerin, 2023). This issue is partly attributable to the scarce availability of empirical data and stakeholders' limited willingness to share sensitive information, hindering a contextualised and realistic assessment of impacts (Backes and Traverso, 2023). Social indicators involve complex dimensions, such as working conditions, access to protective measures, and safety, making systematic and comparable measurement difficult.

Regarding the most recent reflections on the role of the construction sector in the ecological transition, it is increasingly evident that decarbonisation alone is not sufficient to ensure the overall sustainability of the built environment. As Ness (2024) emphasised, integrating low-carbon strategies with principles of sufficiency is necessary; evaluating social dimensions, such as workers' well-being and safety, is also important to avoid reductive approaches focused exclusively on CO_{2eq}. At the same time, the perspective proposed by Sposito and De Giovanni (2023) underlines the need to address the complexity of anthropic systems by integrating multidimensional tools that combine LCA, Environmental Risk Assessment, and Ecosystem Service Assessment. This approach paves the way for evaluation models capable of capturing the interactions between environmental and social impacts.



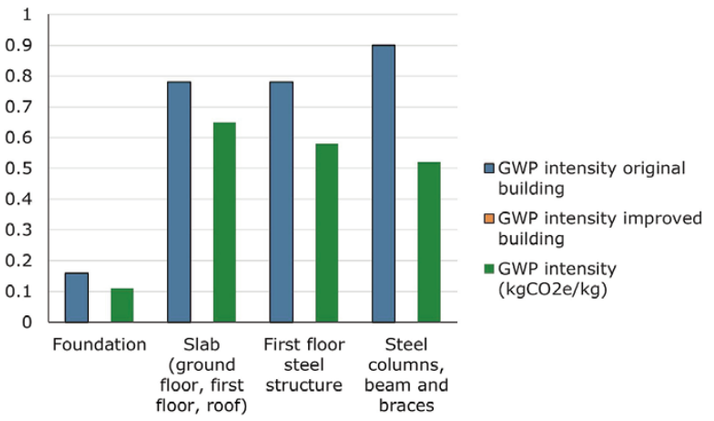


Fig. 6 | Mass composition of the building's structure, broken down by categories of aggregated materials (credit: the Authors, 2025).

Fig. 7 | GWP (in tons of CO_{2eq}) calculated for the A1-A3 phases of the load-bearing elements for both the 'baseline' and 'improved' structures. In the 'improved' structure, steel and concrete were modelled using materials with lower environmental impact (credit: the Authors, 2025).

In light of the premises framing the theme of environmental and social sustainability in the construction sector, this study proposes an integrated E-LCA / S-LCA methodological approach, which has been shown as a positive way forward to enhance decision-making currently based solely on E-LCA (Ayassamy and Pellerin, 2023). It is applied to the case study of a publicly owned residential building in Tuscany (Italy), designed in accordance with the seismic requirements of zone 3 (low seismicity) and the conditions provided for climatic zone D. This integrated methodological approach aims to connect the environmental impacts from the E-LCA assessment of construction materials with the social indicator of 'health and safety of workers', in line with the UNEP Guidelines for S-LCA (UNEP, 2020).

In particular, the objective is to correlate the environmental indicator of global warming potential (GWP) with a social indicator related to 'workers' health and safety', developed based on official accident data in the Italian construction sector. This work is structured into two main sections. The first examines the quantification of environmental impacts associated with the building's load-bearing structure, adopting the European Level(s) framework as the methodological reference. The second section focuses on occupational risk analysis and proposes a comprehensive and integrated sustainability evaluation model that combines environmental and social dimensions from the initial stages of the building life cycle.

This contribution stands out for its potential to have a positive impact on the scientific community. On the one hand, it offers a multidimensional and replicable perspective for the analysis of sustainability in the construction sector. On the other hand, it promotes the adoption of evaluation tools that jointly consider environmental and social aspects from the initial stages of the building life cycle.

Integrated E-LCA / S-LCA methodological approach applied to a building | This study applied the LCA method to a sample building to define a conceptual model integrating GWP from the WLC methodology with a social indicator related to workers' health and safety. The social indicator, expressed as a risk level, was developed based on official data on workplace accidents in the Italian construction sector. Figure 1 summarises the methodological approach adopted, in which social analysis focuses on the phases with the highest environmental impact (GWP). Although this study constitutes an early attempt to integrate E-LCA and S-LCA, it does not imply a quantitative merging of environmental and social metrics. Rather, the choice was made to consider the two domains in a complementary way, developing the social analysis starting from the processes and phases that have the most significant impact (hotspots) in terms of GWP in the environmental assessment. This approach represents the first step toward a more comprehensive evaluation model in which the relationships between environmental and social impacts can be further explored through shared criteria for weighting and normalisation.

This orientation is also reflected in the literature, in which several studies have shown that an integrated approach combining E-LCA and S-LCA enables a more complete assessment of sustainability by focusing on system hotspots. For example, Wang, Su, and Wu (2022) analysed an industrial LED lighting product, highlighting how the phases most impactful from an environmental perspective coincide with those posing the most significant social risk. Similarly, Ghisellini, Passaro, and Ulgiati (2023) applied an integrated approach to the management system of electrical and electronic waste in Italy. They found not only environmental and social benefits but also criticalities related to transportation and working conditions. These contributions demonstrate that the joint analysis of the two environmental and social dimensions helps identify critical nodes and guide improvement strategies, consistent with the approach developed in our work.

Specifically, the analysis phase of the study involved the quantification of environmental impacts, expressed in kg CO_{2eq}, associated with the load-bearing structure of a multi-user residential building developed over two levels. The building (Figg. 2, 3), designed to accommodate two distinct types of housing, presents a functional layout. On the ground floor are the dwellings provided by the ministerial programme 'Dopo di noi', intended for minors and adults without family support, who may be hosted temporarily or permanently, and who could have disabilities. The upper floor contains eight social housing units for vulnerable segments of the population. From a structural point of view, the building is characterised by a braced steel frame composed of columns and floor beams in HEB260 profiles welded to the vertical elements; the horizontal bracing uses HEB160 profiles organised in a triangular scheme. Supporting the main frame is a secondary vertical stiffening system in cast-in-place reinforced concrete, which increases overall strength and bracing capacity. The foundations are inverted beam-reinforced concrete. The floors, made with lightweight prefabricated panels (predalles) and expanded polystyrene inserts, are designed to ensure diaphragm behaviour and effectively distribute horizontal loads.

The E-LCA study adopts the Level(s) framework as a methodological reference, developed at the European level, to analyse and assess the sustainability performance of buildings throughout their entire life cycles (Dodd et alii, 2017). The analysis focuses on indicator 1.2 – Life Cycle Global Warming Potential using the simplified reporting options provided by the Level(s) system. It exclusively examines cradle-to-gate phases (Fig. 4), corresponding to modules A1 (raw material extraction and supply), A2 (transport to the production site), and A3 (production processes).

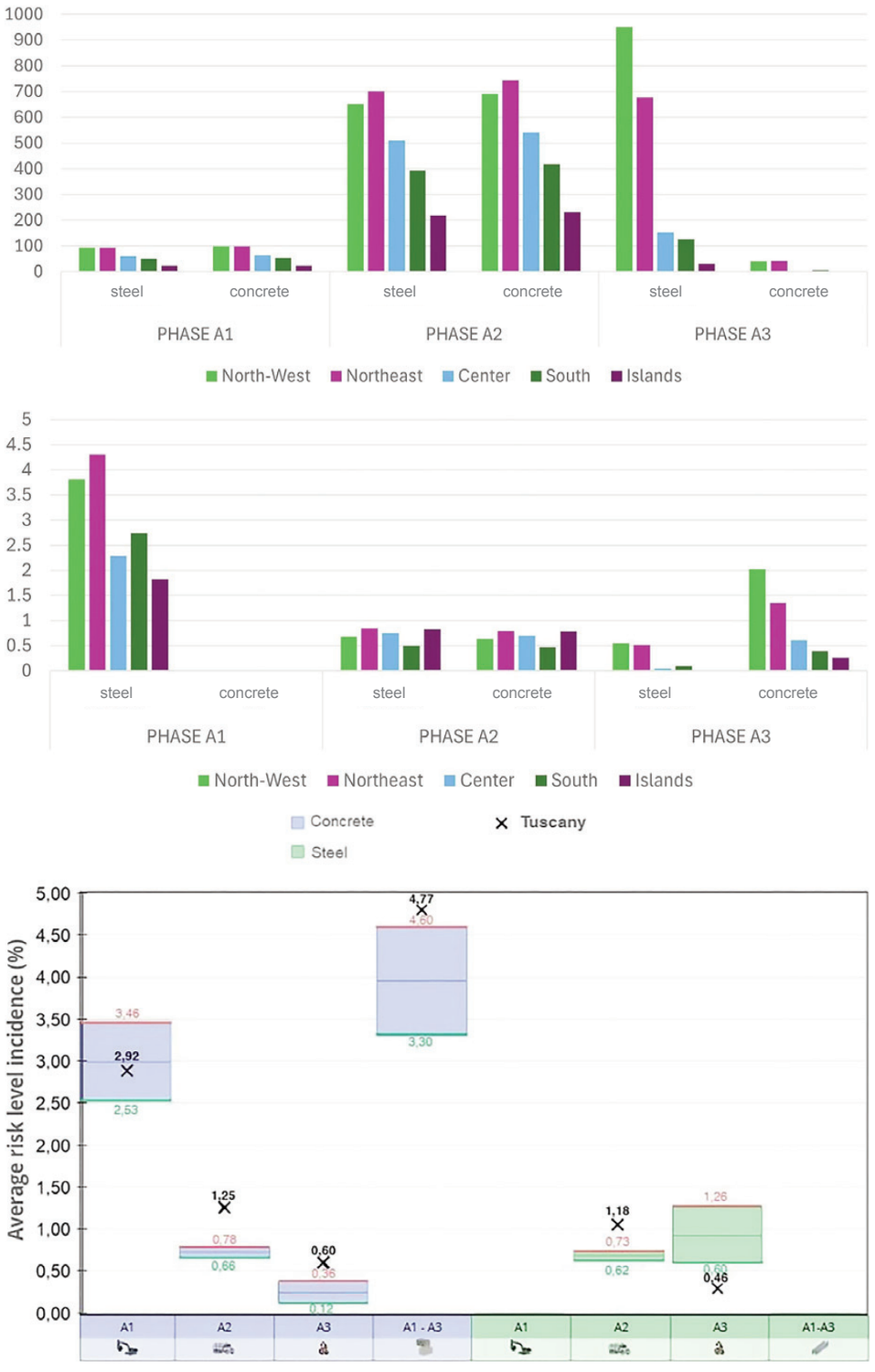
The methodological choice aims to identify the environmental impact of the materials used in the structure during the initial phases of the life cycle. This analysis considers the variability of the construction elements adopted and the seismic zone in which the building is located. In this context, the main objective of the study is therefore not to extend the assessment to impacts throughout the entire life cycle. Rather, it seeks to evaluate performance and environmental differences related to structural design. For this reason, the subsequent phases of construction (A4-A5), use (B1-B7), and end of life (C1-C4) were not included in the analysis.

The modelling was carried out using the One Click LCA software, prioritising primary impact values, such as Environmental Product Declarations (EPDs). Moreover, a second scenario ('improved') was introduced alongside the design scenario ('baseline') to understand the variability of environmental impacts and evaluate alternative decarbonisation scenarios; the improved scenario involves replacing steel with a material having higher recycled content and using C30/37 concrete, which is commonly used for residential and commercial buildings in the national production context (Coppola et alii,

Fig. 8 | Number of accidents in the cement and steel processing sectors (credit: the Authors, 2025).

Fig. 9 | Incidence of accidents in the cement and steel processing sectors, expressed as a percentage (credit: the Authors, 2025).

Fig. 10 | Average level of incidence risk, expressed as a percentage (credit: the Authors, 2025).



2023; Tab. 1). In defining the improved scenario, a material substitution criterion was adopted to reduce the GWP while ensuring the same technical function and performance class as the original solutions. The selected alternatives do not introduce radically different materials, but they represent lower-impact variants compared to the products already planned in the reference scenario. For this purpose, two strategies were applied: (i) the use of concrete with equivalent strength but lower clinker content or higher recycled material content; and (ii) the replacement of steel and prefabricated components with those that have higher recycled content or are produced using more efficient processes.

The feasibility of the substitutions was verified in terms of actual availability in the national and European markets and compliance with current technical standards. This approach ensures full compatibility with the building's structural and performance requirements while maintaining functional consistency between the reference and improved scenarios. It also demonstrates how targeted choices of lower-GWP materials can reduce environmental impacts without altering the construction type or the required performance.

Following the E-LCA analysis, the social impact evaluation focused on the category of 'health and safety of workers'. This is considered a priority in construction sites and in production activities involving construction materials. Among the social indicators used for the analysis are the workplace accident rate, occupational mortality, and the presence of personal protective equipment; these are fundamental elements for assessing risk conditions and protection in production and construction site contexts (INAIL, 2023).

A robust S-LCA approach was outlined by Mancini et alii (2018) for the social analysis of raw material supply chains. In this context, 'workers' health and safety' is described in terms of impact categories, such as fair wages, working hours, health and safety, social protection, and freedom of association (Fig. 5). These parameters are measured using international statistical sources, social databases, and regulatory documentation. The aim is to ensure transparency, comparability, and social relevance within the S-LCA assessment.

To evaluate the social impacts on workers along the supply chains for concrete and steel construction materials, this study employs an operational approach. The social analysis was confined to workers involved in the production and construction phases of the building. This scope aligns with the system boundaries adopted for the E-LCA, which are limited to modules A1-A3. This choice enabled methodological alignment between the environmental and social dimensions by identifying only those stakeholder categories directly exposed to impacts in the phases examined. The assessment was conducted using primary statistical data from national sources[1], ensuring robustness and comparability of the results while avoiding less systematic qualitative approaches. Workers represent the social class for which reliable and region-specific information is available, enabling this initial application of the model.

Other categories of operators that may have negative impacts throughout the entire life cycle of the building will be considered in future extensions of the methodology. At this stage, to evaluate health and safety aspects in the construction material supply chain, the analysis focuses on the stakeholders most directly involved, following international literature and UNEP (2020) guidelines.

In addition to evaluating accident incidence, this study examines the prevalence and types of occupational diseases associated with the work environment, based on INAIL (2025) data. Each indicator was subsequently assessed through a risk-based scoring system, in line with the methodology proposed by Mancini et alii (2018). This method allows the assignment of a level of social criticality to the different phases and materials of the construction supply chain.

For the assessment of accident-related risk, three risk thresholds – low, medium, and high – were defined based on the incidence of accidents across sectors. The thresholds were calculated by determining the mean number of accident cases per sector (Equation 1) and the related standard deviation (Equation 2). The mean represents a measure of central tendency, while the standard deviation quantifies the dispersion of the data with respect to this value. The definition of risk intervals is based on the deviation of the observed values from the mean. This approach enables risk categories (low, medium, and high) to be identified on the basis of significant variations from the average behaviour of the sample.

Equation 1) $\bar{x}=\sum xi / n$

Equation 2) $\sigma = \sqrt{(\sum(xi-\bar{x})\ 2 / n-1)}$

where '$\bar{x}$' is the mean value, 'xi' refers to the individual values, 'n' corresponds to the number of values in the sample, and 'σ' corresponds to the standard deviation. Therefore, the risk thresholds were defined as 'low risk' (incidence < mean – 0.5 σ), 'medium risk' (mean – 0.5 σ ≤ incidence ≤ mean + 0.5 σ), and 'high risk' (incidence > mean + 0.5 σ).

Embedded carbon and occupational risk: an integrated approach to production chains | For the purposes of this study, the analysis focused exclusively on the elements constituting the building's load-bearing structure. In the analysed structure shown in Figure 6, concrete is the predominant component, accounting for about 97% of the total mass.

The LCA analysis, focused on the GWP evaluation, was conducted both on the 'baseline' and the hypothetical 'improved' versions of the building. In the latter, some materials, particularly concrete and steel, were replaced with lower-impact alternatives incorporating more recycled components or lightweighting solutions. These modifications resulted in impact reductions of 31.3% for foundations, 42.2% for steel columns, pillars, and beams, 25.6% for steel structures of the first floor only, and 16.7% for the steel bracing of floor slabs (Tab. 2). Figure 7 provides an overview of emissions in tons of CO_{2eq} through the GWP calculated for the A1-A3 phases of the load-bearing building elements. The data are shown relative to the 'baseline' and 'improved' structures.

For the analysis of social impacts, ISTAT (2023) data were used for the number of employees in the ATECO 2007 sectors of 'Extraction of stone, sand, and clay' [081], 'Road freight transport and moving services' [494], 'Manufacture of metal construction elements' [251], and 'Manufacture of concrete, cement, and plaster products' [236]. Data on workplace accidents, particularly in the Tuscany region, were also used for a precise, specific territorial analysis of accident distribution. The life cycle analysis covered phases A1-A3 for concrete production and A2 and A3 for steel production. This methodological choice is necessary because the primary extractive activities for iron ore production are not located in Italy. The characterisation of the employees is reported in Table 3.

This choice is supported by the ISTAT document Import-Export of Raw Materials (Morrone and Lanci, 2020), which highlights both Italy's structural dependence on raw material imports and the fact that mining activities associated with steel production are located in different geographic areas of the world. For example, major operators in the sector, such as ArcelorMittal[2], declare that they extract raw materials in Canada, Brazil, Ukraine, and Liberia. Consequently, phase A1 employment and accident data for steel could not be included in the assessment, as the ISTAT data used for territorial analysis did not cover foreign extractive activities.

The results shown in Figures 8 and 9 present the total number of accidents recorded in 2023 and their incidence on the number of employees documented in each region. The means and standard deviations were then calculated for the 2023 accident incidence, and the results were used to define risk categories (Fig. 10).

The ISTAT data relating to the Tuscany region, the reference area for the case study under examination, showed that in 2022, the production of steel construction works had average workplace accident rates of 1.2% for phase A2 and 0.5% for phase A3. For concrete production, the incidence was 2.9% for phase A1, 1.3% for phase A2, and 0.6% for phase A3, for a total of 4.8% across phases A1-A3. Overall, the data indicate a medium-high risk of workplace accidents in the production of steel and concrete for construction.

Limitations, replicability, and transferability of the study | This work has some limitations that deserve discussion. First, the environmental and social dimensions were analysed separately. This choice stems from the current absence of threshold values or shared criteria for directly comparing heterogeneous indicators, such as GWP and occupational risk factors. This approach allowed for maintaining methodological rigour but inevitably reduced the possibility of providing a fully integrated view of sustainability. Future work should develop tools that relate the two dimensions using internationally shared weighting and normalisation criteria.

From a social perspective, the analysis focused exclusively on workers involved in the production and construction phases (A1-A3). This choice was influenced by the need to maintain consistency with the boundaries of the environmental analysis and by the availability of reliable and comparable statistical data at the national level. This approach strengthened the robustness of the results but excluded other potentially relevant stakeholders, such as local communities or end users, who could be included in future methodological extensions. In summary, the work prioritised rigour, consistency, and immediate applicability over a broader and more integrated vision. The identified criticalities are insurmountable limits but rather starting points for further investigations. These initiatives could extend the analysis to a greater number of social actors, additional life cycle phases, and more innovative design scenarios.

Nonetheless, this study demonstrates high replicability due to the transparent sharing of the sources and information used. For the environmental analysis, the materials, quantities, and specifications for the software and databases used were made available. This allows other researchers to reproduce the results or adapt them to different contexts. On the social side, the use of publicly available and freely accessible databases, such as those of ISTAT and INAIL, ensures not only data verifiability but also the possibility of extending the methodology to other case studies. The approach can also be applied to other stakeholders, provided structured and systematic data are available in official archives. This makes the methodology applicable in different territorial and sectoral contexts.

Conclusion | In Italy, the presence of four seismic zones entails specific structural requirements that influence both the choice of materials and the carbon footprint of buildings. Recent studies highlight that in areas of high seismic hazard, the adoption of structural reinforcements can increase the initial GWP by 10-20% compared to buildings located in low-seismicity zones. In light of this evidence, the assessment of specific production chains is crucial for promoting effective decarbonisation throughout a building's life cycle. However, an approach focused exclusively on the environmental dimension of sustainability may overlook equally relevant aspects, such as the well-being and health of workers, who comprise the backbone of the construction sector.

The analysis phase revealed the limited integration of social aspects into environmental impact assessment tools for construction products. At the European level, such integration exists for ornamental stones in indicator 2.7 of the Ecolabel for decorative coverings, and at the Italian level, within the minimum environmental criteria related to urban furniture. However, there is still no structured methodological proposal that allows for the coherent integration of environmental (E-LCA) and social (S-LCA) impacts.

The study presented here, although limited to a single building and a small number of materials, proposes a preliminary methodological framework. The approach aims to establish an integrated metric for assessing environmental and social impacts. If refined and extended to include additional relevant indicators, such as fair wages and gender equality, it could be incorporated into labelling systems, both at the product and building scales. This integration would contribute to a more comprehensive and multidimensional understanding of sustainability in the construction sector.

The adoption of integrated research approaches, such as the one proposed, directly contributes to achieving several Sustainable Development Goals (SDGs). It promotes safer and more dignified working conditions (SDG 8), supports the creation of resilient and inclusive buildings (SDG 11), encourages more responsible production and consumption patterns by using life cycle thinking (SDG 12), and reduces climate-altering emissions throughout the life cycle (SDG 13). At the same time, linking the environmental and social dimensions generates indirect synergies with other key goals. These include the protection of health and well-being (SDG 3), the promotion of technological and infrastructural innovation (SDG 9), and the reduction of territorial inequalities (SDG 10).

However, acknowledging potential trade-offs is also necessary, for example, between emissions reduction and economic costs (SDGs 1 and 8) or between worker safety and the speed of construction processes. In this complex scenario, the integrated E-LCA / S-LCA approach is proposed as an operational tool to balance benefits and trade-offs, guiding design decisions toward genuinely multidimensional and systemic sustainability.

Acknowledgements

This research was supported by the Department of Engineering and Applied Sciences, University of Bergamo (Italy), under the project 'Creation of LCA databases for building materials and systems' (Principal Investigator: Prof. E. Palumbo). The Authors gratefully acknowledge Studio INTRE, the civil engineering firm responsible for the design of the analysed building, for their valuable time, availability, and technical expertise.

All the Authors contributed synergistically to the writing of the article; however, E. Palumbo is responsible for conceptualisation, funding acquisition, writing, revision, editing and validation of the paper; both E. Palumbo and I. Mazzei are responsible for the methodology, formal analysis, and investigation; both Mazzei and M. Perpetua are responsible for the visualisation, data curation, and drafting of the paper. All the Authors, responsible for data curation, have read and approved the final version of the manuscript.

Notes

1) For more information, see the webpage: inail.it/portale/it/attivita-e-servizi/dati-e-statistiche/banca-dati-delle-professioni.html [Accessed 30 September 2025].

2) For more information, see the webpage: corporate.arcelormittal.com/industries/tailings-management [Accessed 30 September 2025].

Reference

Arvidsson, R., Hildenbrand, J., Baumann, H., Islam, K. M. N. and Parsmo, R. (2018), "A method for human health impact assessment in social LCA – Lessons from three case studies", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 23, pp. 690-699. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-016-1116-7 [Accessed 30 September 2025].

Ayassamy, P. and Pellerin, R. (2023), "Social life-cycle assessment in the construction industry – A review of characteristics, limitations, and challenges of S-LCA through case studies", in *Sustainability*, vol. 15, issue 19, article 14569, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su151914569 [Accessed 30 September 2025].

Backes, J. G. and Traverso, M. (2023), "Social life cycle assessment in the construction industry – Systematic literature review and identification of relevant social indicators for carbon reinforced concrete", in *Environment, Development and Sustainability*, vol. 26, pp. 7199-7233. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10668-023-03005-6 [Accessed 30 September 2025].

Coppola, L., Palumbo, E., Coffetti, D., Panozzo, C., Rapelli, S., Cellurale, M. and Rinaldi, C. (2023), *Edilizia costruzioni – Studio LCA della filiera del calcestruzzo e degli aggregati riciclati*, ENEA, Milano. [Online] Available at: pubblicazioni.enea.it/download.html?task=download.send&id=744:edilizia-costruzioni-studio-lca-della-filiera-del-calcestruzzo-e-degli-aggregati-riciclati&catid=3 [Accessed 30 September 2025].

Dodd, N., Cordella, M., Traverso, M. and Donatello, S. (2017), *Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings – Parts 1 and 2 – Introduction to Level(s) and how it works (Beta v1.0)*, document EUR 28899 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: doi.org/10.2760/827838 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2025), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The Clean Industrial Deal – A joint roadmap for competitiveness and decarbonisation*, document 52025DC 0085, COM/2025/85 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri= CELEX%3A52025DC0085 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Sustainable Europe Investment Plan European Green Deal Investment Plan*, document 52020DC0021, COM/2020/21 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A52020DC0021 [Accessed 30 September 2025].

European Parliament and Council of the European Union (2024), *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast)*, document 32024L1275. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj [Accessed 30 September 2025].

Ghisellini, P., Passaro, R. and Ulgiati, S. (2023), "Environmental and Social Life Cycle Assessment of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Management in Italy According to EU Directives", in *Environments*, vol. 10, issue 7, article 106, pp. 1-29. [Online] Available at: doi.org/10.3390/environments10070106 [Accessed 30 September 2025].

Hamed, A., Maister, K., Murali, S. H., Radwan, L., Paternostro, A. and Ciroth, A. (2025), *PSILCA – A Product Social Impact – Life Cycle Assessment Database*, version 4.0. [Online] Available at: openlca.org/wp-content/uploads/2025/07/PSILCA_manual_for-v.4_04072025.pdf [Accessed 30 September 2025].

INAIL (2025), *Tabelle nazionali con cadenza mensile – Analisi della numerosità degli infortuni – Dati rilevati al 31 luglio 2025*. [Online] Available at: dati.inail.it/opendata_files/downloads/daticoncadenzamensileinfortuni/Tabelle_nazionali_cadenza_mensile_Lug_2025.pdf [Accessed 30 September 2025].

INAIL (2023), *Relazione annuale 2022*. [Online] Available at: lavorosi.it/fileadmin/user_upload/PRASSI_2023/inail-relazione-annuale-2022.pdf [Accessed 30 September 2025].

ISPRA (2025), *Emissioni di gas serra – Nel 2023 in calo del 26% rispetto al 1990 – Le rinnovabili trainano il miglioramento – Resta critico il settore dei trasporti*, comunicato stampa, 25/03/2025. [Online] Available at: emissioni.sina.isprambiente.it/wp-content/uploads/2025/03/Comunicato-stampa-emissioni-gas-serra_2025.def_.pdf [Accessed 30 September 2025].

ISPRA (2025). *Rapporto Rifiuti Speciali – Edizione 2025*. [Online] Available at: isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/rapporto-rifiuti-speciali-edizione-2025 [Accessed 30 September 2025].

ISTAT (2024), "Conti economici nazionali – Anno 2023", in *istat.it*, 23/09/2024. [Online] Available at: istat.it/comunicato-stampa/conti-economici-nazionali-anno-2023 [Accessed 30 September 2025].

ISTAT (2023), *Occupati e addetti per settore di attività economica (ATECO) – Anno 2023*. [Online] Available at: esploradati.istat.it/databrowser/#/it/dw/categories/IT1,Z0900ENT,1.0/ENT_STRU/DICA_ASIAULP/IT1,183_285_DF_DICA_ASIAULP_3,1.0 [Accessed 30 September 2025].

Kühnen, M. and Hahn, R. (2017), "Indicators in social life cycle assessment – A review of frameworks, theories, and empirical experience", in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 21, issue 6, pp. 1547-1565. [Online] Available at: doi.org/10.1111/jiec.12663 [Accessed 30 September 2025].

Larsen, V. G., Tollin, N., Sattrup, P. A., Birkved, M. and Holmboe, T. (2022), "What are the challenges in assessing Circular Economy for the built environment? – A literature review on integrating LCA, LCC and S-LCA in Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA)", in *Journal of Building Engineering*, vol. 50, article 104203, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104203 [Accessed 30 September 2025].

Legambiente (2022), "Decarbonizzare le costruzioni, la nuova sfida del settore edilizio", in *Legambiente*, 08/11/2022. [Online] Available at: legambiente.it/comunicati-stampa/decarbonizzare-le-costruzioni-la-nuova-sfida-del-settore-edilizio/ [Accessed 30 September 2025].

Mancini, L., Eynard, U., Eisfeldt, F., Ciroth, A., Blengini, G. A. and Pennington, D. (2018), "Social assessment of raw materials supply chains – A life cycle-based approach", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 23, issue 7, pp. 1474-1490. [Online] Available at: op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f29c7adb-1f8a-11e9-8d04-01aa75ed71a1/language-en [Accessed 30 September 2025].

Monosilio, F., Altieri, G., Ricciardelli, E., Fimiani, C. and Forte, A. (eds) (2022), *Il ruolo del settore delle costruzioni nel sistema economico – Struttura, interdipendenze settoriali e crescita*. [Online] Available at: ance.it/wp-content/uploads/allegati/Ricerca_Ance-Istat_Importanza_del_settore_delle_costruzioni_Giugno_2024.pdf [Accessed 30 September 2025].

Morrone, M. and Lanci, C. (eds) (2020), *Import-Export materie prime – La dipendenza dell'Italia dai Paesi esteri (2020)*. [Online] Available at: unmig.mase.gov.it/wp-content/uploads/2020/11/Ecomondo2020-ISTAT.pdf [Accessed 30 September 2025]

Ness, D. (2024), "La decarbonizzazione degli edifici sarà sufficiente? Limitare e ridistribuire l'aumento di superficie costruita | Will decarbonising buildings be enough? Constrain and redistribute growth in floor area", *in Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 84-97. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1562024 [Accessed 30 September 2025].

Norris, C. B., Aulisio, D. and Norris, G. A. (2012), "Working with the Social Hotspots Database – Methodology and findings from 7 social scoping assessments", in Dornfeld, D. A. and Linke, B S. (eds), *Leveraging Technology for a Sustainable World – Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, USA, May 23-25, 2012*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 581-586. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-642-29069-5_98 [Accessed 30 September 2025].

Pradeep, M. S., Rismanchi, B. and Ngo, T. (2025), "Dynamic and Circular Life Cycle Sustainability Assessments (DC-LCSAs) for prefabricated buildings – A systematic review and conceptual model", in *Building and Environment*, vol. 284, article 113396, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113396 [Accessed 30 September 2025].

Schmidt, A., Jelnes, J. E., Hansen, L. E. and Jensen, A. A. (1992), "Health impacts and life-cycle assessment", in Nordic Council of Ministers (ed.), *Product life cycle assessment – Principles and methodology*, Nordic Council of Ministers, Copenhagen, pp. 232-262. [Online] Available at: books.google.it/books?id=6Doxe-YmGYUC&printsec=frontcover&hl=it&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false [Accessed 30 September 2025].

Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), "Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 30 September 2025].

Traverso, M. and Mankaa, R. N. (2025), "The social life cy0developments and implementations", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 30, pp. 1011-1017. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-025-02480-5 [Accessed 30 September 2025].

UNEP – United Nations Environment Programme (2020), *Guidelines for social life cycle assessment of products and organisations 2020*. [Online] Available at: lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2021/01/Guidelines-for-Social-Life-Cycle-Assessment-of-Products-and-Organizations-2020-22.1.21sml.pdf [Accessed 30 September 2025].

UNEP – United Nations Environment Programme (2009), *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*. [Online] Available at: wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7912/-Guidelines%20for%20Social%20Life%20Cycle%20Assessment%20of%20Products-20094102.pdf?sequence=3&amp%3BisAllowed= [Accessed 30 September 2025].

Wang, S., Su, D. and Wu, Y. (2022), "Environmental and Social Life Cycle Assessments of an Industrial LED Lighting Product", in *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 95, article 106804, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106804 [Accessed 30 September 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 304-315
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18182025

ARTICLE INFO

Received 17 September 2025
Revised 19 October 2025
Accepted 21 October 2025
Published 30 December 2025

PAESAGGI PRODUTTIVI IN TRASFORMAZIONE
Sistemi agro-energetici e benefici ambientali

PRODUCTIVE LANDSCAPES IN TRANSFORMATION
Agro-energy systems and environmental benefits

Federica Marandino

ABSTRACT

Nel quadro della transizione ecologica i paesaggi produttivi assumono un ruolo strategico come sistemi dinamici in cui si intrecciano pratiche insediative, cicli ecologici e dispositivi tecnologici. Il contributo propone una scoping review della letteratura sul ruolo delle infrastrutture agro-energetiche nei processi di trasformazione dei paesaggi produttivi, con particolare attenzione ai sistemi agrivoltaici, considerati dispositivi multifunzionali e adattivi. L'analisi individua quattro assi principali: riconfigurazione multifunzionale dei paesaggi produttivi, risposta adattiva e resilienza climatica, produzione di benefici ambientali e potenziamento dei servizi ecosistemici, adozione e implementazione di modelli valutativi e di governance. I risultati evidenziano il potenziale contributo dei sistemi agrivoltaici al raggiungimento di diversi Obiettivi di Sviluppo Sostenibile.

Within the framework of the ecological transition, productive landscapes assume a strategic role as dynamic systems in which settlement practices, ecological cycles, and technological devices intertwine. This paper presents a scoping review of the literature on the role of agro-energy infrastructures in the transformation of productive landscapes, with particular attention to agrivoltaic systems, which are regarded as multifunctional and adaptive devices. The analysis identifies four principal axes: multifunctional reconfiguration of productive landscapes; adaptive response and climate resilience; production of environmental benefits and enhancement of ecosystem services; and adoption and implementation of assessment and governance models. The results highlight the potential contribution of agrivoltaic systems to several Sustainable Development Goals.

KEYWORDS

sistemi agrivoltaici, paesaggi produttivi, gestione delle risorse, servizi ecosistemici, crescita economica

agrivoltaic systems, productive landscapes, resource management, ecosystem services, economic growth



Federica Marandino, Architetto, è Dottoranda presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Napoli 'Federico II' (Italia). Svolge attività di ricerca nell'ambito della Tecnologia dell'Architettura e Progettazione Ambientale con focus sull'applicazione di sistemi integrati per la produzione di energia da fonti rinnovabili in contesto rurale, periurbano e nell'ambiente costruito. E-mail: federica.marandino@unina.it

I paesaggi produttivi, definiti come spazi territoriali trasformati dall'azione antropica finalizzata alla produzione di beni e servizi, sono l'esito di processi evolutivi in cui le tecnologie hanno progressivamente ridefinito i rapporti tra pratiche agricole, sistemi insediativi e risorse naturali (Sereni, 1961). Con la rivoluzione industriale la meccanizzazione ha modificato i cicli colturali e l'organizzazione del lavoro, mentre la selezione genetica ha orientato le produzioni verso varietà ad alta resa e standardizzate (Grigg, 1995): ne è derivato un modello agricolo integrato ai mercati e alle reti globali, accompagnato da una trasformazione radicale degli spazi produttivi (Mazoyer and Roudart, 2006). Questa continuità può essere riletta alla luce del concetto di 'tecnologia appropriata', intesa come mezzo flessibile capace di potenziare la capacità dell'uomo e di produrre condizioni di vita differenziate (Amirante, 1985).

La fase odierna, segnata dalle transizioni ecologica ed energetica, introduce nuove trasformazioni nei paesaggi produttivi in risposta ai cambiamenti climatici, alla gestione sostenibile delle risorse e alla necessità di garantire sicurezza alimentare ed energetica. L'Agenda 2030 delle Nazioni Unite (UN, 2015) e i rapporti IEA (2022) e OECD (2024) sottolineano che la resilienza dei territori dipende dall'integrazione di obiettivi ambientali, energetici e socio-economici; in questo quadro l'agricoltura è oggi affiancata da infrastrutture per la generazione di energia rinnovabile che ridefiniscono gli usi agricoli del suolo e pongono nuove sfide di compatibilità.

All'interno di questo quadro si colloca la diffusione dei sistemi agrivoltaici, promossi dalle misure della Missione 2 del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR; MIMIT, 2023) e della Politica Agricola Comune 2023-2027 (European Parliament and Council, 2024), come dispositivi agro-energetici capaci di integrare produzione agricola ed energetica nello stesso spazio. I benefici che ne derivano interessano i settori produttivi, attraverso il miglioramento della resilienza delle colture agli stress climatici (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2024), l'impiego più efficiente della risorsa idrica e la valorizzazione delle produzioni locali e si estendono al sistema socio-economico, grazie alla diversificazione del reddito agricolo e allo sviluppo di nuove professionalità ibride tra agricoltura ed energia (Fig. 1).

L'insieme di tali dinamiche concorre al rafforzamento della resilienza delle comunità locali, poiché questi sistemi possono attivare processi inclusivi di governance e favorire una distribuzione più equilibrata dei benefici, aspetti riconosciuti come condizioni essenziali per l'accettazione sociale e per l'attivazione di percorsi di sviluppo sostenibile (Torma and Aschemann-Witzel, 2023).

In tale ottica il presente articolo chiarisce come i sistemi agrivoltaici concorrano alla riconfigurazione dei paesaggi produttivi, rafforzando la resilienza climatica e attivando co-benefici ambientali e socio-economici in linea con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG). L'originalità consiste nell'integrare le prospettive tecnologica, agro-ambientale e socio-economica dentro una griglia di lettura comune che guida la codifica delle fonti e la discussione. Il contributo combina la scoping review della letteratura scientifica con la consultazione bibliografica tradizionale, così da includere contributi non sempre indicizzati. Rispetto alle review più recenti, la presente sistematizza le evidenze tramite cluster tematici derivati da mappe di co-occorrenza delle parole chiave (VOSviewer), che rendono leggibili i nuclei concettuali e le loro relazioni, ne mostrano l'evoluzione temporale e mettono in luce lacune e convergenze.

La trattazione si articola come segue: rapporto tra paesaggi produttivi e tecnologia; metodi e criteri di selezione della letteratura sul tema; risultati quantitativi con mappatura dei cluster; analisi dei temi emergenti alla luce delle tre prospettive e della loro coerenza con gli SDG; conclusioni, limiti e direzioni di ricerca che alimentano il dibattito contemporaneo.

Paesaggi produttivi e tecnologia: continuità e trasformazioni | Il paesaggio produttivo può essere interpretato come costruzione storica e culturale oltre che ecologica, risultato dell'azione sistematica che l'uomo imprime al paesaggio naturale attraverso le attività agricole (Sereni, 1961). Ogni rivoluzione agricola ha comportato una riorganizzazione strutturale degli ecosistemi coltivati: dai sistemi idraulici e di terrazzamento alle rotazioni colturali, fino alle enclosure europee e alla meccanizzazione moderna (Mazoyer and Roudart, 2006; Grigg, 1995). Un antecedente di particolare rilievo è la centuriazione romana, dispositivo tecnico-territoriale fondato sulla trama ortogonale di cardines e decumani, che integrava produzione, mobilità e gestione idrica e ha impresso al paesaggio un ordine geometrico durevole (Chevallier, 1961).

Accanto a questa matrice di scala territoriale, le comunità rurali hanno progressivamente elaborato soluzioni riconoscibili come tecnologie adattive, sviluppate per rispondere a condizioni pedoclimatiche e socio-economiche specifiche. I terrazzamenti mediterranei hanno reso coltivabili i versanti acclivi, stabilizzando i suoli e regolando i deflussi idrici; le pergole viticole trentine hanno organizzato lo spazio produttivo in modo da modulare luce e ventilazione, migliorare la qualità delle uve e tutelare il benessere dei lavoratori; i limoneti terrazzati della Costiera sorrentina, con muri a secco e pergolati lignei (Figg. 2-4), hanno coniugato la protezione dalle sollecitazioni climatiche con la sicurezza dei pendii e la continuità delle produzioni (Scaramellini and Varotto, 2008). Questi sistemi, interpretabili come archivi di soluzioni resilienti, anticipano la concezione contemporanea di infrastruttura territoriale (Figg. 5-7; Angelucci, 2015) e riflettono il principio di innovazione localmente appropriata (Scudo, 2017).

Nel Novecento, con la meccanizzazione e le prime infrastrutture energetiche, il paesaggio produttivo assume la configurazione di paesaggio agro-energetico, in cui funzioni agricole ed energetiche convivono (Ginelli and Daglio, 2016). Le ricerche recenti sottolineano la necessità di coniugare produzione e qualità paesaggistica e di adottare una visione transdisciplinare che consideri modelli, densità e servizi ecosistemici nei layout energetici (Scognamiglio, 2016).

In questa prospettiva i sistemi agrivoltaici ereditano la logica delle tecnologie adattive, ponendosi in continuità con i principi di modularità (intesa come organizzazione per campate e file su griglie orientate con parametri controllabili come passo e altezza utile); ombreggiamento controllato (ovvero regolazione selettiva della radiazione attraverso assetti fissi o a inseguimento per mitigare lo stress idrico e termico e ottimizzare la fotosintesi) e multifunzionalità (intesa come produzione congiunta di beni privati – alimenti ed energia – e di beni e servizi ecosistemici con elevata interdipendenza tra gli output che richiede criteri progettuali e strumenti di governance dedicati).

Metodologia, strumenti e criteri di selezione | La ricerca adotta l'approccio della scoping review (Arksey and O'Malley, 2005) con riferimento alla checklist PRISMA-ScR (Peters et alii, 2020), adeguato a un ambito emergente e interdisciplinare per mappare risultati e lacune della letteratura.

Come banca dati di riferimento è stata utilizzata Scopus (Elsevier), interrogata nel campo 'title-abs-key' mediante ricerca avanzata. La scelta di basarsi su Scopus risponde all'esigenza di adottare un repertorio ampio e interdisciplinare, capace di garantire copertura internazionale e comparabilità tra risultati; eventuali lacune sono state compensate con l'integrazione di testi di biblioteca e fonti di letteratura grigia, comprendenti linee guida ministeriali, report di ricerca e documentazione progettuale non sempre indicizzati nelle banche dati digitali (Tab. 1).

La strategia di ricerca è stata costruita in maniera iterativa e ha previsto quattro passaggi successivi: una query iniziale su energie rinnovabili e paesaggi agricoli (16.723 risultati); una restrizione al solare (6.526 risultati); un filtro sugli studi relativi a uso del suolo e pianificazione territoriale (1.498 risultati); infine la focalizzazione sui sistemi agrivoltaici (138 risultati), che costituiscono il corpus finale analizzato. I record sono stati esportati in formato CSV ed esaminati attraverso uno screening su titolo e abstract, seguito da lettura del testo per verificarne l'ammissibilità.

I criteri di selezione hanno seguito lo schema Population / Concept / Context (PCC; Peters et alii, 2020), includendo paesaggi produttivi e agroecosistemi, infrastrutture agro-energetiche e sistemi agrivoltaici in contesti rurali e periurbani. Sono stati ammessi articoli scientifici, atti, linee guida e report, escludendo contributi solo tecnici privi di implicazioni paesaggistiche o socio-ambientali.

L'analisi delle parole chiave è stata realizzata con VOSviewer (van Eck and Waltman, 2010), utilizzando un thesaurus per uniformare varianti e sinonimi. La mappa dei co-occurrence network ha restituito nove cluster tematici, riconducibili a specifici sotto-ambiti di ricerca: agricoltura, energia, paesaggi produttivi, uso del suolo e doppio uso, cambiamenti climatici, biodiversità e servizi ecosistemici, tecnologia e innovazione, governance e contesti geografici. Sebbene distinti, questi cluster presentano una forte interconnessione semantica, riflesso della natura multidimensionale del tema.

Per garantire una lettura integrata, i cluster sono stati ricondotti a quattro assi interpretativi: 1) riconfigurazione multifunzionale dei paesaggi produttivi; 2) risposta adattiva e resilienza climatica; 3) benefici ambientali; 4) modelli valutativi e governance. Questo passaggio ha consentito di trasformare la rete semantica emersa dall'analisi bibliometrica in un framework interpretativo coerente, utilizzato come base per l'organizzazione dei risultati della letteratura.

Tra i limiti emersi vi sono la rapidità di evoluzione della produzione scientifica e il livello di dettaglio dei contributi inclusi che è eterogeneo: alcuni articoli riportano dati sperimentali e metriche misurabili, mentre altri si limitano a descrizioni qualitative, riducendo la possibilità di confronti diretti.

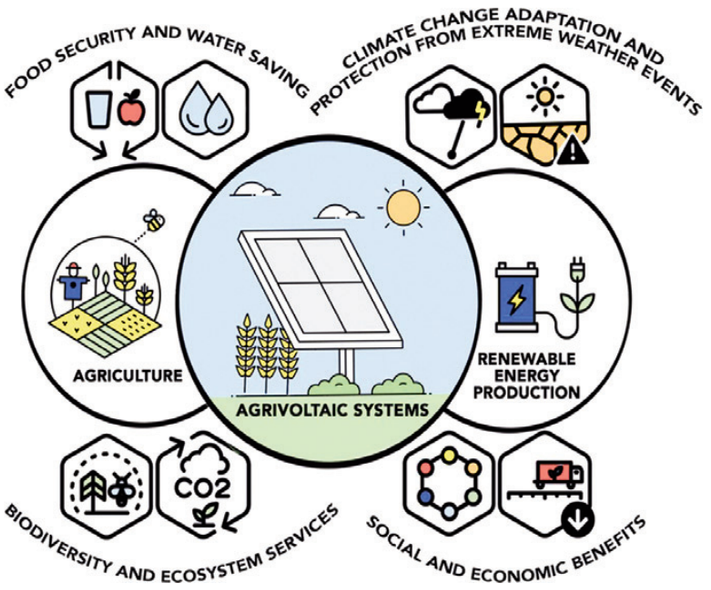


Fig. 1 | Diagram of agrivoltaic systems as an integration between agriculture and renewable energy production, showing benefits for food security and water savings, adaptation to climate change and protection from extreme events, biodiversity and ecosystem services, and socio-economic impacts along the value chain (credit: the Author, 2022).

Risultati quantitativi della review | La ricerca ha restituito un corpus iniziale di 16.723 contributi, progressivamente ridotti attraverso tre fasi di affinamento fino a raggiungere i 138 articoli esplicitamente focalizzati sui sistemi agrivoltaici (Tab. 2). L'analisi quantitativa ha considerato la distribuzione temporale delle pubblicazioni, la provenienza geografica, i settori disciplinari di riferimento, le parole chiave maggiormente ricorrenti e il loro uso in relazione ai cluster tematici individuati (Fig. 8) e all'evoluzione del tema negli anni.

Sul piano temporale si osserva una crescita costante a partire dal 2018, con un incremento marcato nel triennio 2022-2024. Questo andamento riflette l'attenzione crescente della comunità scientifica e la formalizzazione dell'agrivoltaico come tecnologia innovativa nelle strategie europee e nazionali (MASE, 2022). La revisione della Renewable Energy Directive (RED II) e la EU Solar Energy Strategy hanno infatti incluso l'agrivoltaico tra le forme prioritarie di sviluppo del fotovoltaico, mentre in Italia il PNRR (MIMIT, 2023) ha fissato obiettivi espliciti di installazione con procedure semplificate e incentivi dedicati. Geograficamente, emergono Europa (Italia, Germania, Francia, Spagna) e Stati Uniti, con contributi crescenti da India, Brasile, Marocco e Africa subsahariana. Rispetto al passato, il panorama risulta più equilibrato e l'Europa è uno dei principali poli di ricerca.

I contributi appartengono soprattutto ai settori dell'Energia, delle Scienze Ambientali e delle Scienze Agrarie e Biologiche, confermando l'interdisciplinarità del tema. L'analisi delle parole chiave evidenzia nove cluster tematici fortemente interconnessi, riflesso della natura multidimensionale della ricerca. Le connessioni tra cluster mostrano l'elevata interdipendenza semantica tra domini diversi, riflesso della natura multidimensionale della ricerca sull'agrivoltaico.

L'overlay temporale delle keyword (Fig. 9) mostra inoltre un cambiamento tematico: dai primi studi incentrati sull'efficienza energetica e riduzione dei gas climalteranti (2022-2023, giallo chiaro) ai contributi più recenti che esplorano policy, accettazione sociale, governance e innovazione (dal 2024 in avanti, rosso). Questo spostamento testimonia l'evoluzione del dominio da un approccio prevalentemente tecnico-ingegneristico a una prospettiva più ampia, che integra aspetti territoriali e socio-istituzionali. L'analisi complessiva conferma la rapida strutturazione dei sistemi agrivoltaici come campo di ricerca riconoscibile e interdisciplinare. Restano tuttavia alcune criticità: la scarsità di dati longitudinali, misurazioni ripetute nel tempo sugli stessi soggetti / unità di osservazione, l'assenza di protocolli condivisi e di indicatori standardizzati, e soprattutto la forte specificità del sito e del clima dipendente dalle evidenze disponibili, che rende difficile la comparabilità tra casi e limita la possibilità di estrarre modelli e risposte generalizzabili.

Discussione degli esiti | L'analisi conferma che i sistemi agrivoltaici si configurano come dispositivi infrastrutturali capaci di superare la logica monofunzionale, integrando produzione agricola, energetica ed ecosistemica. Ad esempio in Puglia simulazioni indicano che lo 0,25-0,5% della superficie agricola utilizzata può coprire un terzo degli obiettivi rinnovabili al 2030 senza ridurre la produttività (Cammerino et alii, 2025); esperienze in Lazio mostrano la possibilità di utilizzare sistemi agrivoltaici all'interno di strategie di rigenerazione periurbana e smart community (D'Alessandro et alii, 2023). Strumenti che integrano GIS e Analisi Decisionale Multi-Criterio confermano infine l'opportunità di integrare criteri agricoli, ambientali e paesaggistici per il supporto al processo di scelta dei siti idonei e per la valutazione di progetti (Neesham-McTiernan and Barron-Gafford, 2025).

Le evidenze sperimentali emerse dalla review confermano che l'agrivoltaico rafforza la capacità adattiva degli agroecosistemi, contribuendo alla stabilità produttiva in condizioni di stress: in Africa orientale sono stati documentati risparmi idrici e maggiore sopravvivenza delle orticole (Neesham-McTiernan and Barron-Gafford, 2025), mentre in Germania prati permanenti sotto moduli sopraelevati hanno registrato microclimi più freschi e minore erosione eolica (Diekmann et alii, 2025). Dati di monitoraggio pluriennali ripetuti sullo stesso sito in Massachusetts evidenziano rese più stabili negli anni siccitosi rispetto al pieno campo (Doubleday et alii, 2025) e studi in Italia e Stati Uniti confermano benefici analoghi per efficienza idrica, benessere animale e resilienza delle colture.

Le ricadute ambientali riguardano in particolare biodiversità e qualità del suolo: in Germania è stato rilevato un aumento della ricchezza floristica e faunistica negli impianti con interfilari e nei prati permanenti (Diekmann et alii, 2025), mentre in Italia esperienze viticole costiere hanno evidenziato riduzioni della salinizzazione e miglioramenti della fertilità. Altri studi confermano benefici sul contenimento dell'erosione, sulla maggiore capacità di infiltrazione e sugli incrementi nello stoccaggio di carbonio organico, soprattutto se associati a pratiche rigenerative come colture di protezione e rotazioni (Pandey et alii, 2025; Merheb et alii, 2025); restano tuttavia assenti protocolli condivisi che consentano la comparabilità dei dati tra diversi contesti.

La governance emerge come dimensione cruciale per la diffusione e l'accettazione sociale dei sistemi. In Italia studi di scenario e strumenti di supporto alle decisioni confermano l'importanza di criteri integrati e soglie d'uso del suolo (Cammerino et alii, 2025). Le indagini percettive mostrano che l'accettazione sociale cresce quando i benefici sono condivisi e i processi decisionali sono inclusivi (Biró-Varga, Sirnik and Stremke, 2024; Seay-Fleming, Swanson and Gerlak, 2025). Le ricerche comparate evidenziano che modelli di governance inclusiva riducono i conflitti e generano valore economico, occupazionale ed ecologico (Steren et alii, 2025; Merheb et alii, 2025), tuttavia l'integrazione sistematica della dimensione socio-economica nei sistemi di valutazione / monitoraggio rimane minoritaria (circa 42% del corpus analizzato), mentre le menzioni socio-economiche / governance risultano presenti in oltre il 78% dei contributi.

Sistemi agrivoltaici e Obiettivi di Sviluppo Sostenibile | I sistemi agrivoltaici contribuiscono in modo rilevante al raggiungimento degli SDG, a partire dal n. 6, dedicato all'uso efficiente e sostenibile della risorsa idrica. L'ombreggiamento parziale generato dalle strutture fotovoltaiche riduce l'evapotraspirazione e migliora l'infiltrazione del suolo, con risparmi idrici documentati in diversi contesti aridi e

semi-aridi e un incremento complessivo dell'efficienza d'uso dell'acqua (Elamri et alii, 2018; Coluccia et alii, 2025). In Africa orientale sperimentazioni hanno mostrato una maggiore sopravvivenza delle colture orticole e benefici nella gestione del bilancio idrico a conferma della capacità di questi sistemi di rafforzare la resilienza in aree ad alta vulnerabilità climatica (Neesham-McTiernan and Barron-Gafford, 2025).

In relazione alla salute e sicurezza (SDG 3) si osserva una riduzione dei parametri microclimatici sotto le strutture rispetto al pieno sole (Disciglio et alii, 2025) e, in termini di esposizione dei lavoratori, valori WBGT più bassi e minori superamenti della soglia in condizioni d'ombra rispetto al pieno sole (Flunker et alii, 2024).

Il contributo all'SDG 7 (energia pulita e accessibile) riguarda la possibilità di incrementare la produzione da fonti rinnovabili senza sottrarre superficie alla produzione agricola, promuovendo modelli di doppio uso del suolo. Le configurazioni sopraelevate consentono di mantenere la continuità delle colture e raggiungere valori di densità energetica fino a 1 MW per ettaro (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2024), favorendo al tempo stesso la diffusione di Comunità Energetiche e Distretti a Energia Positiva e contribuendo alla riduzione delle emissioni climalteranti.

In questa prospettiva l'agrivoltaico si configura come tecnologia chiave per la transizione energetica, coerente con i percorsi di innovazione tecnologica e culturale evocati nel dibattito più ampio sulla progettazione appropriata e contestuale delle infrastrutture (Vacanti and Leonardi, 2024). La letteratura recente sulla pianificazione del doppio uso del suolo e sulla percezione paesaggistica evidenzia preferenze e sensibilità diverse tra configurazioni sopraelevate e negli spazi interfilari, con ricadute sulla loro integrazione negli strumenti di Piano e sull'accettabilità sociale (Biró-Varga, Sirnik and Stremke, 2024).

Rispetto all'SDG 8 (lavoro dignitoso e crescita economica) l'agrivoltaico si presenta come un'opportunità per diversificare il reddito agricolo, creare nuove professionalità ibride e sostenere la vitalità socio-economica delle aree rurali. Le indagini mostrano che l'accettazione sociale cresce quando i benefici economici e occupazionali sono condivisi e i processi decisionali inclusivi (Seay-Fleming, Swanson and Gerlak, 2025; Steren et alii, 2025), aprendo la strada a microfiliere innovative e a nuove opportunità di sviluppo locale. Tuttavia resta necessaria una più sistematica integrazione della dimensione socio-economica nei modelli di pianificazione e valutazione (Merheb et alii, 2025). Per la quantificazione degli impatti occupazionali si possono utilizzare parametri (tra cui I-JEDI / NREL[1] e IRENA / ILO[2]) per stimare il numero medio di addetti a tempo pieno (FTE) per MW operativo su base annua, sia in fase di costruzione sia in fase di esercizio (Rutovitz et alii, 2025).

Pur incentrando la revisione sugli SDG 6, 7 e 8 i sistemi agrivoltaici producono benefici anche rispetto ad altri obiettivi, in particolare a quelli legati all'azione per il clima e alla tutela della biodiversità, contribuendo a rafforzare la resilienza territoriale e a promuovere pratiche di governance multilivello (Tabb. 3-6).

La diffusione dell'agrivoltaico richiede di affrontare criticità e compromessi progettuali: sul versante tecnico-economico incidono i costi iniziali delle



Figg. 2-4 | Trentino vine pergola over vineyard (Trentino-Alto Adige); Sorrento pergola over lemon grove in Sant'Agnello; Agrivoltaic vineyard, Le Rene site – Community Agrivoltaic Vineyard in Laterza (credits: the Author, 2025).







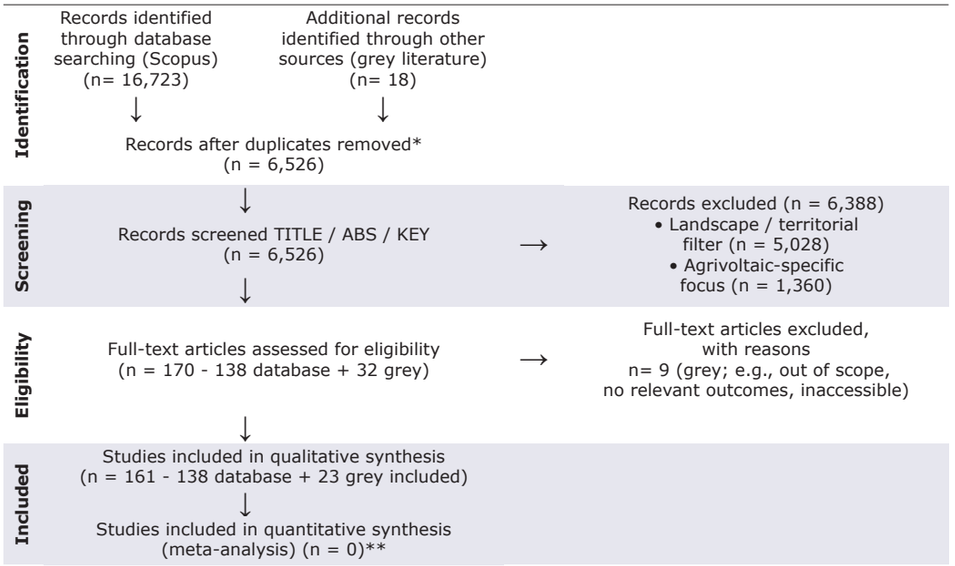
Figg. 5-7 | Protection systems using nets over apple orchards; Agrivoltaic systems on apple orchards with protective nets, SYMBIOSYST project (Ora, BZ); Productive landscape along the Wine Route (Ora, BZ), integrating agrivoltaics and crop protection systems (credits: the Author, 2025).

strutture dedicate e la gestione integrata agro-elettrica, oltre che connessioni di rete e iter autorizzativi eterogenei (IEA, 2025). Dal punto di vista socio-culturale la solidità dei progetti dipende dalla capacità di far dialogare diverse competenze e instaurare processi partecipativi in grado di costruire legittimazione e accettazione sociale (Seay-Fleming, Swanson and Gerlak, 2025). Sul piano ambientale-paesaggistico la qualità degli esiti è funzione della progettazione e della gestione: layout e densità vanno calibrati perché l'incremento della resa energetica non comprometta funzionalità ecosistemiche (Solar Energy UK, 2025; Jarcuška et alii, 2024; Ludzuweit et alii, 2025).

In questa chiave i compromessi possono essere resi espliciti e governati tramite linee guida tipologico-paesaggistiche, indicatori verificabili e accordi di governance che responsabilizzano gli attori locali lungo tutto il ciclo di vita del sito.

Conclusioni | Il contributo ricostruisce lo stato dell'arte sui sistemi agrivoltaici, evidenziandone il ruolo nella riconfigurazione dei paesaggi produttivi, nella

Tab. 1 | PRISMA process of the review: identification of records, screening, and final inclusion (credit: the Author, 2025).



*Refers to the post-deduplication Scopus set with a concurrent thematic restriction to solar / photovoltaics (Step 2 in Tab. 2). Grey literature was handled as a parallel stream and evaluated directly at full-text; therefore, grey sources are counted at the Eligibility and Included stages (32 identified; 23 included), not in the title / abstract screening totals.

**No meta-analysis was conducted because outcomes and study designs were highly heterogeneous and many records were qualitative or grey literature; therefore, quantitative pooling was not appropriate. The review followed PRISMA-ScR guidance and results are presented as a qualitative synthesis.

Tab. 2 | Refinement of advanced search strings on Scopus (credit: the Author, 2025).

Step	Focus	Search string	Result (n)	Rationale for refinement
1°	Broad query	(‘renewable energy’ OR ‘energy infrastructure*’ OR ‘solar farm*’ OR ‘wind farm*’) AND (‘agricultural land’ OR ‘farmland’ OR ‘productive landscape*’ OR ‘rural landscape*’ OR ‘agri-environment*’)	16723	Identification of a general corpus on the effects of renewables in agricultural / productive landscapes; scope too broad and heterogeneous
2°	Solar energy	(‘solar energy’ OR ‘photovoltaic*’ OR ‘solar farm*’) AND (‘agricultural land’ OR ‘farmland’ OR ‘productive landscape*’ OR ‘rural landscape*’ OR ‘agri-environment*’)	6526	Exclude other renewable sources (wind, biomass, hydropower) to keep a solar focus
3°	Landscape / territorial dimension	(‘solar energy’ OR ‘photovoltaic*’) AND (‘agricultural land use’ OR ‘productive landscape*’ OR ‘farmland’) AND (‘landscape’ OR ‘territorial planning’ OR ‘land use change’)	1498	Select studies addressing the relationship between solar energy, land use and landscape; reduce purely technical / agronomic papers
4°	Agrivoltaic systems	TITLE / ABS / KEY (‘agrivoltaic*’ OR ‘agrovoltaic*’ OR ‘agrophotovoltaic*’ OR ‘solar sharing’ OR ‘dual use photovoltaics’) AND TITLE / ABS / KEY (‘landscape*’ OR ‘productive landscape*’ OR ‘agri-environment*’ OR ‘rural’ OR ‘agricultural land use’)	138	Define the final corpus specific to agrivoltaics and the reconfiguration of productive landscapes; used for the qualitative analysis and coding into the four axes

risposta adattiva al cambiamento climatico e nella generazione di benefici ambientali e socio-economici. Dalla rassegna emergono limiti che incidono sulla trasferibilità delle evidenze: la scarsità di dati comparabili, la mancata omogeneità di protocolli e indicatori, con unità e metadati non sempre comparabili, la forte dipendenza dai contesti locali in termini di clima, suoli, sistemi colturali e assetti istituzionali. Le prospettive future riguardano quindi il rafforzamento di comparabilità e robustezza degli studi attraverso l’adozione di descrittori minimi comuni per contesto, configurazione e prestazioni agro-energetiche ed ecologiche, l’ampliamento della copertura geografica verso casi oggi sottorappresentati, l’integrazione, lungo il ciclo di vita, di valutazioni su acqua, suolo, biodiversità, percezione paesaggistica e ricadute socio-economiche, in coerenza con gli obiettivi di riduzione dei gas climalteranti.

Un ulteriore asse di lavoro concerne il rafforzamento della governance attraverso meccanismi di condivisione dei benefici da testare in contesti pilota: comunità energetiche rurali con quote di energia condivisa localmente, fondi dedicati alla qualità paesaggistica e alla gestione del suolo, dividendo di comunità a favore degli attori locali, tariffe incentivanti per l’immissione in rete condizionate a impegni ambientali e sociali, accompagnate da monitoraggi su accettazione ed equità territoriale.

L’approccio interdisciplinare proposto consente di superare letture settoriali e fornisce una cornice critica utile alla comunità scientifica e alle pratiche di progetto e pianificazione, favorendo un lessico condiviso tra ricerca, politiche e attori territoriali. La cornice risulta trasferibile perché distingue ciò che è specifico di un sito da ciò che può essere comparato tra territori, permettendo di operare con strumenti e indicatori comuni, riducendo asimmetrie informative e orientando valutazioni coerenti con la sostenibilità.

In questo quadro i sistemi agrivoltaici si configurano nel dibattito sui paesaggi energetici come processi culturali e territoriali che ridefiniscono le relazioni tra società e ambiente (Peghin, 2024). La traiettoria ricostruita conferma l’esigenza di approcci integrati capaci di tradurre le evidenze in criteri operativi comparabili e sensibili al contesto, a sostegno di politiche e progetti di transizione ecologica radicati nei territori.

Productive landscapes, defined as territorial spaces transformed by human action to produce goods and services, are the outcome of evolutionary processes in which technologies have progressively redefined the relationships among agricultural practices, settlement systems, and natural resources (Sereni, 1961). With the Industrial Revolution, mechanisation altered crop cycles and the organisation of labour, while genetic selection directed production toward high-yield, standardised varieties (Grigg, 1995). The result was an agricultural model integrated into global markets and networks, accompanied by a radical transformation of productive spaces (Mazoyer and Roudart, 2006). This continuity can be reinterpreted in light of the concept of appropriate technology, understood as a flexible means capable of extending human capacity and generating differentiated living conditions (Amirante, 1985).

The current phase, shaped by ecological and energy transitions, introduces new transformations in productive landscapes in response to climate change, sustainable resource management, and the need to ensure both food and energy security. The 2030 Agenda of the United Nations (UN, 2015) and reports by the IEA (2022) and the OECD (2024) emphasise that the resilience of territories depends on integrating environmental, energy, and socio-economic objectives. Within this framework, agriculture is now accompanied by infrastructures for renewable energy generation, which redefine agricultural land uses and pose new compatibility challenges. Within this context emerges the spread of agrivoltaic systems, promoted by the measures of Mission 2 of Italy's National Recovery and Resilience Plan (PNRR; MIMIT, 2023) and by the Common Agricultural Policy 2023-2027 (European Parliament and Council, 2024), as agro-energy devices capable of integrating agricultural and energy production within the same space. The resulting benefits affect productive sectors through improved crop resilience to climatic stress (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2024), more efficient use of water resources, and the valorisation of local products, and extend to the socio-economic system through income diversification for farmers and the development of new hybrid professional profiles between agriculture and energy (Fig. 1). Together, these dynamics strengthen the resilience of local communities, as such systems can activate inclusive governance processes and promote a more balanced distribution of benefits, factors recognised as essential conditions for social acceptance and for triggering sustainable development pathways (Torma and Aschemann-Witzel, 2023).

From this perspective, the present article clarifies how agrivoltaic systems contribute to the reconfiguration of productive landscapes, enhancing climate resilience and generating environmental and socio-economic co-benefits consistent with the Sustainable Development Goals (SDGs). The originality of

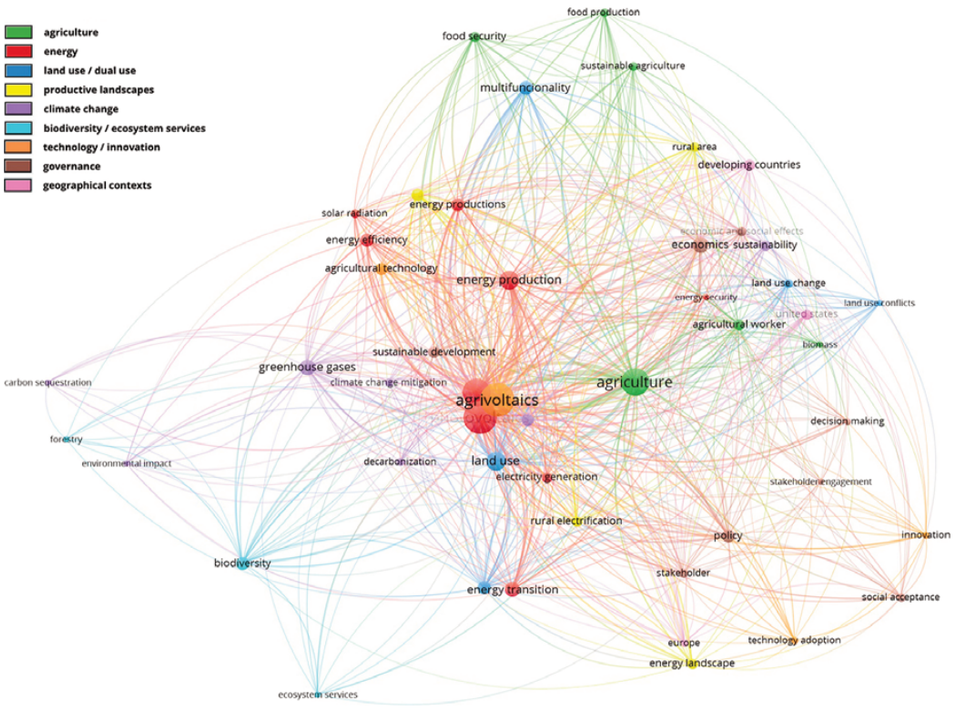


Fig. 8 | Keyword co-occurrence network (VOSviewer): the map highlights the nine thematic clusters emerging from the bibliometric analysis, showing the multidimensionality of the research field and its disciplinary articulation (credit: the Author, 2025).

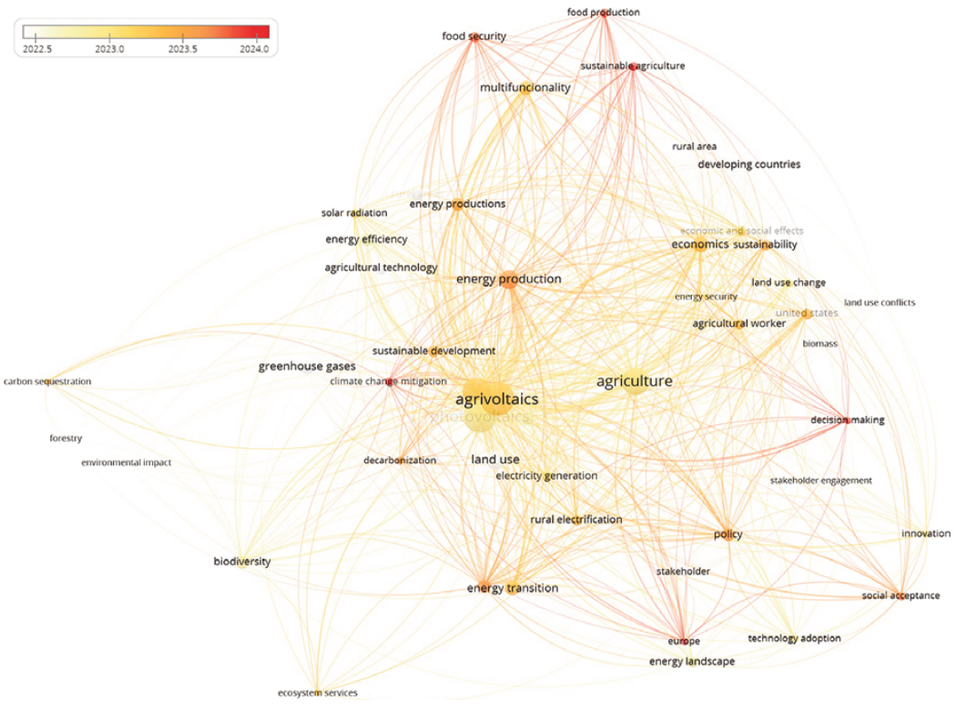


Fig. 9 | Temporal overlay of keywords (VOSviewer): the colour distribution illustrates the evolution of scientific production between 2022 and 2024, showing the shift from technical studies on energy performance to contributions exploring social, economic, and policy dimensions (credit: the Author, 2025).

Next page

Tabb. 3-6 | Thematic axis / SDG matrices: correspondence with the goals identified through literature analysis, relevant indicators and targets from the 2030 Agenda, design metrics, calculation formulas and methods, and primary sources (credits: the Author, 2025).

Thematic axis / SDG matrix (1): Multifunctional Reconfiguration of Productive Landscapes				
UN indicators (target)	2.3; 2.4	7.1; 7.2; 7.a	9.4; 9.5	12.2; 12.3
Project metrics and units	Land Equivalent Ratio (LER), crop yield and stability (LER –; t/ha; CV%)	Renewable electricity from AV per unit land; energy intensity per kg product (MWh/ha·yr)	R&D investments and AV demonstrators; infrastructure efficiency (€; # projects; t CO_{2eq}/unit value added)	Resource efficiency in the agro-energy (kg inputs/MWh; kg N/ha)
Formula / method	LER = (yield under AV / full-sun yield) + (energy yield expressed as LER-energy); track year-to-year yield	Electricity (MWh) = Installed capacity (MW) × equivalent full-load hours; document Wp/ha layout density	R&D as % revenue; operational carbon intensity benchmarking	Reduced irrigation water and fertiliser under controlled shading; track per-unit outputs
Key sources	IEA, 2025; IRENA, 2024; Widmer et alii, 2024			

Thematic axis / SDG matrix (2): Adaptive Response and Climate Resilience				
UN indicators (target)	3.9	6.4; 6.6	11.3	13.2; 13.3
Project metrics and units	Reduced heat exposure for farm workers (°C; hours above threshold)	Irrigation water saved and Water Use Efficiency (WUE) under AV (m³/ha·yr; kg/m³)	Land-use efficiency (dual-use vs ground-mounted) (ha avoided / MW; LSF index)	GHG emissions avoided through AV (t CO_{2eq}/yr)
Formula / method	ΔWBGT measured under AV vs control; track hours above ISO thresholds	Water saved (m³) = baseline irrigation demand × % ET reduction under AV	Land-Sparing Factor (LSF) = energy produced without additional net land take	t CO_{2eq} avoided = annual MWh × grid emission factor (t CO_2/MWh)
Key sources	Ember, 2024; IEA, 2025; Witwit, Al-agele and Higgins, 2025; Disciglio et alii, 2025; Omer et alii, 2025			

Thematic axis / SDG matrix (3): Environmental Benefits and Ecosystem Services				
UN indicators (target)	11.7	12.4; 12.6	–	15.1; 15.5
Project metrics and units	Managed public access and ecological corridors (ha; # visits/yr)	Reduced plant-protection products and inputs (kg a.i./ha; treatments/ha)	Co-benefit: Soil and biomass carbon sequestration (t C/ha·yr)	Species richness, Shannon / Simpson indices, habitat provision (# species; H'; % habitat cover)
Formula / method	Project design and visitor management plans	Compare farm logs and field trials AV vs control	SOC sampling (0-30 cm) and hedgerow/groundcover allometries	Standardised transects / plots under AV; multi-taxa protocols
Key sources	Solar Energy UK, 2025; De Francesco et alii, 2025; Jarčuska et alii, 2024; Ludzweitz et alii, 2025;			

Thematic axis / SDG matrix (4): Evaluation Models and Governance				
UN indicators (target)	8.2; 8.3; 8.4	11.3; 11.b	16.7	17.16; 17.17
Project metrics and units	Jobs created (FTE) per MW and per ha; construction vs O&M – Operations & Maintenance (job-yr/MW; FTE/yr)	Planning instruments and inclusive AV zoning adopted (#instruments)	Inclusive decision-making: stakeholder mapping; social licence (# meetings; % stakeholder categories represented)	PPP agreements and research–industry–public partnerships (#; € co-funded)
Formula / method	FTE= installed MW × employment factor (use I-JEDI/NREL or 2025 factors; separate construction and O&M)	Council resolutions, regulations, SEA / local plans	Participation protocol and issues log	Active MOUs and partnership KPIs
Key sources	European Commission, n.d.; IRENA and ILO, 2024; National Renewable Energy Laboratory, 2025; Seay-Fleming et alii, 2025			

this study lies in integrating technological, agro-environmental, and socio-economic perspectives within a common interpretive framework that guides the coding of sources and the discussion. The paper combines a scoping review of the scientific literature with traditional bibliographic consultation to include contributions that are not always indexed in databases. Compared with more recent reviews, this study systematises evidence through thematic clusters derived from keyword co-occurrence maps (VOSviewer), which make conceptual cores and their relationships visible, show their temporal evolution, and highlight gaps and convergences.

The discussion is structured as follows: the relationship between productive landscapes and technology; methods and criteria for selecting literature on the topic; quantitative results with cluster mapping; analysis of emerging themes in light of the three perspectives and their coherence with the SDGs; conclusions, limitations, and research directions that fuel the contemporary debate.

Productive landscapes and technology: continuity and transformations | The productive landscape can be interpreted as a historical, cultural, and ecological construct, the result of the systematic action humans impose on the natural landscape through agricultural activity (Sereni, 1961). Each agricultural revolution has entailed a structural reorganisation of cultivated ecosystems: from hydraulic and terracing systems to crop rotations, through the European enclosures and modern mechanisation (Mazoyer and Roudart, 2006; Grigg, 1995). A particularly significant precedent is the Roman centuriation, a technical–territorial device based on the orthogonal grid of cardines and decumani, which integrated production, mobility, and water management, imprinting a lasting geometric order upon the landscape (Chevallier, 1961).

Alongside this territorial-scale matrix, rural communities have progressively developed solutions recognisable as adaptive technologies, designed to respond to specific pedoclimatic and socio-economic conditions. Mediterranean terraces made steep slopes cultivable, stabilising soils and regulating runoff; the Trentino vine pergolas organised the productive space to modulate light and ventilation, improve grape quality, and safeguard workers' well-being; the terraced lemon groves of the Sorrento Coast, with dry-stone walls and wooden trellises (Figg. 2-4), combined protection from climatic stresses with slope safety and continuity of production (Scaramellini and Varotto, 2008). These systems, interpretable as archives of resilient solutions, anticipate the contemporary conception of territorial infrastructure (Figg. 5-7; Angelucci, 2015) and reflect the principle of locally appropriate innovation (Scudo, 2017). In the twentieth century, with mechanisation and the emergence of the first energy infrastructures, the productive landscape took on the configuration of an agro-energy landscape, in which agricultural and energy functions coexist (Ginelli and Daglio, 2016). Recent research stresses the need to combine production and landscape quality and to adopt a transdisciplinary vision that considers models, densities, and ecosystem services within energy layouts (Scognamiglio, 2016).

From this standpoint, agrivoltaic systems inherit the logic of adaptive technologies, maintaining continuity with the principles of: Modularity (organisation in spans and rows arranged on grids with controllable parameters such as spacing and proper height); Controlled shading (selective regulation of solar radiation through fixed or tracking layouts to mitigate water and heat stress and optimise photosynthesis); and Multifunctionality (the joint production of private goods, food and energy, and of public goods and ecosystem services, with a high degree of interdependence among outputs, requiring specific design criteria and dedicated governance tools).

Methodology, tools, and selection criteria | The research adopts the scoping review approach (Arksey and O'Malley, 2005) and follows the PRISMA-ScR checklist (Peters et alii, 2020), which is appropriate for an emerging and interdisciplinary field to map advances and gaps in the literature.

The reference database used was Scopus (Elsevier), and the search was conducted across the title, abstract, and keywords fields using an advanced search. The choice of Scopus responds to the need for a broad, interdisciplinary repository that ensures international coverage and the comparability of results. Any gaps were addressed through the integration of library texts and grey literature sources, including ministerial guidelines, research reports, and project documentation that are not always indexed in digital databases (Tab. 1).

The research strategy was built iteratively and included four successive steps: an initial query on renewable energy and agricultural landscapes (16,723 results); a restriction to solar energy (6,526 results); a filter on studies related to land use and spatial planning (1,498 results); finally, the focus on agrivoltaic systems (138 results), which constitute the final corpus analysed. The records were exported in CSV format, screened for titles and abstracts, and then reviewed in full text to verify eligibility.

The selection criteria followed the Population / Concept / Context (PCC) framework (Peters et alii, 2020), including productive landscapes and agroecosystems, agro-energy infrastructures, and agrivoltaic systems in rural and peri-urban contexts. Scientific articles, conference proceedings, guidelines, and reports were included, while purely technical contributions lacking landscape or socio-environmental implications were excluded.

Keyword analysis was conducted using VOSviewer (van Eck and Waltman, 2010), with a thesaurus used to harmonise variants and synonyms. The co-occurrence network map produced nine thematic clusters, corresponding to specific research subfields: agriculture, energy, productive landscapes, land use and dual use, climate change, biodiversity and ecosystem services, technology and innovation, governance, and geographical contexts. Although distinct, these clusters exhibit strong semantic interconnections, reflecting the multidimensional nature of the topic. To ensure an integrated reading, the clusters were grouped into four interpretive axes: 1) multifunctional reconfiguration of productive landscapes; 2) adaptive response and climate resilience; 3) environmental benefits; and 4) evaluation models and governance. This step enabled transforming the semantic network emerging from bibliometric analysis into a coherent interpretive framework, which served as the basis for organising the literature results.

Among the limitations identified are the rapid pace of scientific production and the heterogeneity of detail among the included studies: some papers report experimental data and measurable metrics, while others are limited to qualitative descriptions, reducing the possibility of direct comparison.

Quantitative results of the review | The research produced an initial corpus of 16,723 contributions, progressively reduced through three refinement phases until reaching the 138 articles explicitly focused on agrivoltaic systems (Tab. 2). The quantitative analysis considered the temporal distribution of publications, their geographical origin, the disciplinary sectors involved, the most recurring keywords, and their use in relation to the thematic clusters identified (Fig. 8) as well as to the evolution of the topic over time.

From a temporal standpoint, there has been steady growth since 2018, with a marked increase in the 2022-2024 triennium. This trend reflects the growing attention of the scientific community and the formal recognition of agrivoltaics as an innovative technology in European and national strategies (MASE, 2022). The revision of the Renewable Energy Directive (RED II) and the EU Solar Energy Strategy have included agrivoltaics among the priority forms of photovoltaic development, while in Italy, the PNRR (MIMIT, 2023) established explicit installation targets supported by simplified procedures and dedicated incentives. Geographically, Europe (Italy, Germany, France, Spain) and the United States stand out, with growing contributions from India, Brazil, Morocco, and sub-Saharan Africa. Compared to the past, the landscape now appears more balanced, with Europe among the principal poles of research.

The contributions primarily fall within the fields of Energy, Environmental Sciences, and Agricultural and Biological Sciences, confirming the interdisciplinary nature of the topic. The keyword analysis revealed nine highly interconnected thematic clusters, reflecting the multidimensionality of the research area. The links between clusters demonstrate the strong semantic interdependence among different domains, a clear indicator of the multidimensional character of agrivoltaic research.

The temporal overlay of keywords (Fig. 9) also shows a thematic shift: from the early studies focused on energy efficiency and greenhouse gas reduction (2022-2023, light yellow) to more recent contributions exploring policy, social acceptance, governance, and innovation (from 2024 onwards, red). This shift illustrates the evolution of the field from a primarily technical-engineering approach toward a broader perspective that integrates territorial and socio-institutional aspects.

Overall, the analysis confirms the rapid structuring of agrivoltaic systems as a recognisable and interdisciplinary field of research. However, some criticalities remain: the scarcity of longitudinal data, i.e., repeated measurements over time on the same subjects or observation units; the absence of shared protocols and standardised indicators; and especially, the strong site- and climate-specificity of available evidence, which hampers comparability among case studies and limits the ability to derive generalisable models and responses.

Discussion of the results | The analysis confirms that agrivoltaic systems operate as infrastructural devices that overcome a monofunctional logic by integrating agricultural, energy, and ecosystem production. For instance, in Apulia, simulations indicate that only 0.25-0.5% of the utilised agricultural area could meet one-third of the region's renewable en-



Fig. 10 | Radial diagram synthesising the contribution of agrivoltaic systems to the UN 2030 Agenda Sustainable Development Goals, based on the SDG goals / targets mapping derived from the literature analysis presented in this paper (Tabb. 3–6). For each SDG included, the percentage indicates the share of targets addressed by agrivoltaic systems out of the total targets for that goal (credit: the Author, 2025).

ergy targets for 2030 without reducing agricultural productivity (Cammerino et alii, 2025). Experiments in Lazio demonstrate the potential of using agrivoltaic systems within strategies for peri-urban regeneration and smart communities (D'Alessandro et alii, 2023). Tools integrating GIS and Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) further confirm the feasibility of merging agricultural, environmental, and landscape criteria to support the identification of suitable sites and the assessment of project proposals (Neesham-McTiernan and Barron-Gafford, 2025).

Experimental evidence from the review shows that agrivoltaics enhance the adaptive capacity of agroecosystems, contributing to production stability under stress conditions: in East Africa, water savings and higher survival rates for horticultural crops have been documented (Neesham-McTiernan and Barron-Gafford, 2025), while in Germany, permanent grasslands under elevated panels experienced cooler microclimates and reduced wind erosion (Diekmann et alii, 2025). Long-term monitoring data from a site in Massachusetts showed more stable yields during drought years than in open-field cultivation (Doubleday et alii, 2025), and studies in Italy and the United States confirm similar benefits in water-use efficiency, animal welfare, and crop resilience.

The environmental impacts are particularly relevant to biodiversity and soil quality. In Germany, an increase in floristic and faunal richness was recorded in installations with inter-row spacing and permanent grasslands (Diekmann et alii, 2025), while in coastal Italian vineyards, reductions in soil salinisation and improvements in fertility were observed. Other studies highlight benefits such as erosion control, increased infiltration capacity, and enhanced organic carbon storage, primarily when associated with regenerative practices such as cover crops and crop rotations (Pandey et alii, 2025; Merheb et alii, 2025). However, there is still a lack of shared protocols allowing data comparability across different contexts. Governance emerges as a crucial dimension for the diffusion and social acceptance of these systems. In Italy, scenario studies and decision-support tools confirm the importance of integrated criteria and thresholds for land use (Cammerino et alii, 2025). Perceptual surveys show that social acceptance increases when benefits are shared and decision-making processes are inclusive (Biró-Varga, Sirnik and Stremke, 2024; Seay-Fleming, Swanson and Gerlak, 2025). Comparative research indicates that inclusive governance models reduce conflict and generate economic, occupational, and ecological value (Steren et alii, 2025; Merheb et alii, 2025). However, the systematic integration of the socio-economic dimension into evaluation and monitoring systems remains limited (approximately 42% of the analysed corpus). In contrast, socio-economic or governance-related mentions appear in over 78% of the reviewed contributions.

Agrivoltaic systems and the Sustainable Development Goals | Agrivoltaic systems make a significant contribution to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs), beginning with SDG 6, dedicated to the efficient and sustainable use of water resources. Partial shading from photovoltaic structures reduces evapotranspiration. It improves soil infiltration, leading to documented water savings in various arid and semi-arid contexts, as well as an overall increase in water-use efficiency (Elamri et alii, 2018; Coluccia et alii, 2025). In East Africa, experiments have shown greater survival rates for horticultural crops and benefits in water balance management, confirming these systems' capacity to strengthen resilience in areas of high climatic vulnerability (Neesham-McTiernan and Barron-Gafford, 2025).

Regarding health and safety (SDG 3), a reduction in microclimatic parameters has been observed beneath the structures compared to full-sunlight conditions (Disciglio et alii, 2025). In terms of worker exposure, lower WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) values and fewer threshold exceedances were recorded in shaded conditions compared to full sun (Flunker et alii, 2024).

The contribution to SDG 7 (Affordable and Clean Energy) lies in the ability to increase renewable energy generation without displacing agricultural production, thereby promoting dual land-use models. Elevated configurations enable continuous cultivation and achieve energy densities of up to 1 MW per hectare (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2024), while simultaneously fostering the spread of Energy Communities and Positive Ener-

gy Districts and contributing to reductions in greenhouse gas emissions.

In this perspective, agrivoltaics is emerging as a key technology for the energy transition, consistent with the technological and cultural innovation paths evoked in the broader debate on the appropriate, context-sensitive design of infrastructure (Vacanti and Leonardi, 2024). Recent literature on dual land-use planning and landscape perception highlights different preferences and sensitivities toward elevated configurations and inter-row layouts, with implications for their integration into planning instruments and for social acceptability (Biró-Varga, Sirnik and Stremke, 2024).

Regarding SDG 8 (Decent Work and Economic Growth), agrivoltaics represent an opportunity to diversify agricultural income, create new hybrid professional profiles, and support the socio-economic vitality of rural areas. Studies indicate that social acceptance increases when economic and employment benefits are shared and decision-making processes are inclusive (Seay-Fleming, Swanson and Gerlak, 2025; Steren et alii, 2025), paving the way for innovative micro-supply chains and new opportunities for local development. However, there remains a need for a more systematic integration of the socio-economic dimension into planning and assessment models (Merheb et alii, 2025). For the quantification of employment impacts, parameters such as those provided by I-JEDI/NREL[1] and IRENA/ILO[2] can be used to estimate the average number of full-time equivalent (FTE) jobs per operational MW per year, both during construction and in operation (Rutovitz et alii, 2025). Although this review primarily focuses on SDGs 6, 7, and 8, agrivoltaic systems also deliver benefits linked to other goals, particularly those related to climate action and biodiversity conservation, thereby contributing to territorial resilience and promoting multi-level governance practices (Tabb. 3-6).

The spread of agrivoltaics, however, requires addressing technical, economic, and socio-cultural challenges. On the technical and economic side, factors include the initial costs of dedicated structures, integrated agro-electric management, and heterogeneous grid-connection and permitting procedures (IEA, 2025). From a socio-cultural perspective, the sustainability of projects depends on fostering dialogue across disciplines and establishing participatory processes that build legitimacy and social acceptance (Seay-Fleming, Swanson, and Gerlak, 2025). From an environmental and landscape standpoint, the quality of outcomes depends on design and management: layouts and densities must be calibrated so that the increase in energy yield does not compromise ecosystem functions (Solar Energy UK, 2025; Jarcuška et alii, 2024; Ludzuweit et alii, 2025). In this regard, trade-offs can be made explicit and managed through typological landscape guidelines, verifiable indicators, and governance agreements that hold local stakeholders accountable throughout the site's life cycle.

Conclusions | This paper reconstructs the state of the art on agrivoltaic systems, highlighting their role in reconfiguring productive landscapes, in adaptive responses to climate change, and in generating environmental and socio-economic benefits. The review reveals several limitations affecting the transferability of current evidence: the scarcity of comparable data; the lack of homogeneous protocols and indicators, with units and metadata that are not always consistent; and the strong dependence on local contexts, including climate, soils, cropping systems, and institutional frameworks.

Future perspectives therefore involve strengthening the comparability and robustness of studies through: the adoption of minimum common descriptors for context, configuration, and agro-energy and ecological performance; the expansion of geographical coverage toward underrepresented cases; and the integration, throughout the life cycle, of evaluations on water, soil, biodiversity, landscape perception, and socio-economic impacts, in line with greenhouse gas reduction goals.

Another line of development concerns the enhancement of governance through benefit-sharing mechanisms to be tested in pilot contexts: rural energy communities with locally shared energy quotas; funds dedicated to landscape quality and soil management; community dividends in favour of local stakeholders; incentive tariffs for grid injection conditioned on environmental and social commitments, accompanied by monitoring of social acceptance and territorial equity.

The interdisciplinary approach proposed here enables moving beyond sectoral interpretations. It provides a critical, valuable framework to both the scientific community and design and planning practices, fostering a shared lexicon among research, policy, and territorial actors. The framework is transferable because it distinguishes between what is site-specific and what can be compared across territories, enabling the use of standard tools and indicators, reducing informational asymmetries, and guiding assessments consistent with sustainability principles. Within this perspective, agrivoltaic systems appear in the broader debate on energy landscapes as cultural and territorial processes that redefine the relationship between society and the environment (Peghin, 2024). The trajectory reconstructed here confirms the need for integrated approaches capable of translating empirical evidence into comparable, context-sensitive operational criteria, supporting ecological transition policies and projects rooted in local territories.

Notes

1) For more information on 'I-JEDI – Jobs and Economic Development Impact Models', see the webpage: nrel.gov/analysis/jedi/international [Accessed 10 September 2025].

2) For more information on 'Energy and Jobs – IRENA (series 'Renewable Energy and Jobs', in collaboration with ILO), see the webpage: irena.org/Energy-Transition/Socio-economic-impact/Energy-and-Jobs [Accessed 10 September 2025].

References

Amirante, I. (1985), *Architettura e tecnologia appropriata*, FrancoAngeli, Milano.

Angelucci, F. (2015), "Evolutionary Scenarios for the Design of Infrastructure in the Landscape | Scenari evolutivi per il progetto delle infrastrutture nel paesaggio", in Angelucci, F., Braz Afonso, R., Di Sivo, M. and Ladiana, D. (eds), *The Technological Design of Resilient Landscape | Il progetto tecnologico del paesaggio resiliente*, FrancoAngeli, Milano, pp. 113-146.

Arksey, H. and O'Malley, L. (2005), "Scoping studies – Towards a methodological framework", in *International Journal of Social Research Methodology*, vol. 8, issue 1, pp. 19-32. [Online] Available at: doi.org/10.1080/1364557032000119616 [Accessed 10 September 2025].

Biró-Varga, K., Sirnik, I. and Stremke, S. (2024), "Landscape user experiences of interspace and overhead agrivoltaics – A comparative analysis of two novel types of solar landscapes in the Netherlands", in *Energy Research and Social Science*, vol. 109, article 103408, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.erss.2023.103408 [Accessed 10 September 2025].

Cammerino, A. R. B., Ingaramo, M., Piacquadio, L. and Monteleone, M. (2025), "How Much Longer Can We Tolerate Further Loss of Farmland Without Proper Planning? – The Agrivoltaic Case in the Apulia Region (Italy)", in *Agronomy*, vol. 15, issue 5, article 1177, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.3390/agronomy15051177 [Accessed 10 September 2025].

Chevallier, R. (1961), "La centuriation et les problèmes de la colonisation romaine", in *Études rurales*, vol. 3, pp. 54-80. [Online] Available at: doi.org/10.3406/rural.1961.987 [Accessed 10 September 2025].

Coluccia, S., Ruocco, M., Della Porta, D. and Langella, G. (2025), "Agrivoltaic systems – State of the art and potential field applications", in *Energy Reports*, vol. 14, pp. 1606-1633. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.egyr.2025.07.038 [Accessed 10 September 2025].

D'Alessandro, F., Sevagian, F., Massulli, A. R., Nardecchia, F. and Pompei, L. (2023), "Smart Cities and Communities – A case study of agrovoltaic systems applied to an Italian urban periphery", in *2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I& CPS Europe), Madrid, Spain, June 6-9, 2023*, IEEE, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194641 [Accessed 10 September 2025].

De Francesco, C., Centorame, L., Toscano, G. and Duca, D. (2025), "Opportunities, Technological Challenges and Monitoring Approaches in Agrivoltaic Systems for Sustainable Management", in *Sustainability*, vol. 17, issue 2, article 634, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su17020634 [Accessed 10 September 2025];

Diekmann, L., Zitzmann, F., Schaarschmidt, F. and Reich,

M. (2025), "Habitat use of birds on a high-mounted agrivoltaic trial plot", in *Ecology and Evolution*, vol. 15, issue 8, article e71864, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ece3.71864 [Accessed 10 September 2025].

Disciglio, G., Stasi, A., Tarantino, A. and Frabboni, L. (2025), "Microclimate Modification, Evapotranspiration, Growth and Essential Oil Yield of Six Medicinal Plants Cultivated Beneath a Dynamic Agrivoltaic System in Southern Italy", in *Plants*, vol. 14, issue 15, article 2428, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/plants14152428 [Accessed 10 September 2025].

Doubleday, K., Oleskewicz, K., Ovaitt, S., Hickey, T., Herbert, S. J. and Macknick, J. (2025), "Impacts of year-to-year weather variability and inter-panel spacing on agrivoltaic crop yields in Massachusetts", in *Agroforestry Systems*, vol. 99, article 152, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10457-025-01248-y [Accessed 10 September 2025].

Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Dejean, C. and Belaud, G. (2018), "Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems – Application to irrigated lettuces", in *Agricultural Water Management*, vol. 208, pp. 440-453. [Online] Available at: sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377418309545 [Accessed 10 September 2025].

Ember (2024), *European Electricity Review 2024*. [Online] Available at: ember-climate.org/app/uploads/2024/02/European-Electricity-Review-2024.pdf [Accessed 10 September 2025].

European Commission (n.d.), "Energy communities", in *energy.ec.eu*. [Online] Available at: energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumers-and-prosumers/energy-communities_en [Accessed 10 September 2025].

European Paliament and Council (2024), *Regulation (EU) 2021/2115 of the European Parliament and of the Council of 2 December 2021 establishing rules on support for strategic plans to be drawn up by Member States under the common agricultural policy (CAP Strategic Plans) and financed by the European Agricultural Guarantee Fund (EAGF) and by the European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD) and repealing Regulations (EU) No 1305/2013 and (EU) No 1307/2013*, document 02021R2115-20240525. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/2115/2024-05-25 [Accessed 10 September 2025].

Flunker, J. C., Spector, J. T., Blancas, M., Briggs, N. L., Flores, M., Reeb-Whitaker, C., Schoonover, T. and Cardoso, T. (2024), "Farmworker-Relevant Heat Exposure in Different Crop and Shade Conditions", in *Journal of Agromedicine*, vol. 29, issue 4, pp. 547-560. [Online] Available at: doi.org/10.1080/1059924X.2024.2365647 [Accessed 10 September 2025].

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE (2024), *Agrivoltaics – Opportunities for Agriculture and the Energy Transition – A Guideline for Germany*. [Online] Available at: ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/agrivoltaics-opportunities-for-agriculture-and-the-energy-transition.html [Accessed 10 September 2025].

Ginelli, E. and Daglio, L. (2016), "Le infrastrutture per le energie rinnovabili nel paesaggio – Strumenti di progetto e traiettorie dell'innovazione | Infrastructures for renewable energies in landscape – Design tools and innovation trends", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 11, pp. 162-170. [Online] Available at: doi. org/10.13128/Techne-18410 [Accessed 10 September 2025].

Grigg, D. (1995), *An Introduction to Agricultural Geography*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9780203419274 [Accessed 10 September 2025].

IEA – International Energy Agency (2025), *Dual Land Use for Agriculture and Solar Power Production – Overview and Performance of Agrivoltaic Systems*. [Online] Available at: iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/03/IEA-PVPS-T13-29-2025-REPORT-Dual-Land-Use.pdf [Accessed 10 September 2025].

IEA – International Energy Agency (2022), *World Energy Outlook 2022*. [Online] Available at: iea.org/reports/world-energy-outlook-2022 [Accessed 10 September 2025].

IRENA – International Renewable Energy Agency (2024), *World Energy Transitions Outlook 2024 – 1.5 °C Pathway*. [Online] Available at: irena.org/Publications/2024/Nov/World-Energy-Transitions-Outlook-2024 [Accessed 10 September 2025].

IRENA – International Renewable Energy Agency and ILO – International Labour Organization (2024), *Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2024*. [Online] Available at: irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Oct/IRENA_Renewable_energy_and_jobs_2024.pdf [Accessed 10 September 2025].

Jarčuška, B., Gálffyová, M., Schnürmacher, R., Baláž, M., Mišík, M., Repel, M., Fulín, M., Kerestúr, D., Lackovičová, Z., Mojžiš, M., Zámečník, M., Kaňuch, P. and Krištín, A. (2024), "Solar parks can enhance bird diversity in agricultural landscape", in *Journal of Environmental Management,* vol. 351, article 119902, pp. 1-11. [Online] Available at: sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479723026907 [Accessed 10 September 2025].

Ludzuweit, A., Paterson, J., Wydra, K., Pump, C., Müller, K. and Miller, Y. (2025), "Enhancing ecosystem services and biodiversity in agrivoltaics through habitat-enhancing strategies", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 212, article 115380, pp. 1-17. [Online] Available at: sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403212500053X [Accessed 10 September 2025].

MASE – Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (2022), *Linee Guida in materia di Impianti Agrivoltaici*. [Online] Available at: mase.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/PNRR/linee_guida_impianti_agrivoltaici.pdf [Accessed 10 September 2025].

Mazoyer, M. and Roudart, L. (2006), *A History of World Agriculture – From the Neolithic Age to the Current Crisis*, Routledge, London.

Merheb, C., Macknick, J., Davatzes, N. and Ravi, S. (2025), "Synergies and trade-offs of multi-use solar landscapes", in *Nature Sustainability*, vol. 8, pp. 857-870. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41893-025-01600-1 [Accessed 10 September 2025].

MIMIT – Ministero delle Imprese e del Made in Italy (2023), *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/documenti/PNRR_Aggiornato.pdf [Accessed 10 September 2025].

National Renewable Energy Laboratory (2025), *International Jobs and Economic Development Impacts (I-JEDI) Model*. [Online] Available at: nrel.gov/analysis/jedi/international [Accessed 10 September 2025].

Neesham-McTiernan, T. H. and Barron-Gafford, G. A. (2025), "The long-term suitability of agrivoltaics as a climate adaptation strategy in the southwestern United States", in *Global Environmental Change Advances*, vol. 5, article 100021, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.gecadv.2025.100021 [Accessed 10 September 2025].

OECD (2024), *OECD Economic Outlook*, vol. 2024, issue 2, OECD Publishing, Paris. [Online] Available at: doi.org/10.1787/d8814e8b-en [Accessed 10 September 2025].

Omer, A. A. A., Li, M., Zhang, F., Hassaan, M. M. E., El Kolaly, W., Zhang, X., Lan, H., Liu, J. and Liu, W. (2025), "Impacts of agrivoltaic systems on microclimate, water use efficiency, and crop yield – A systematic review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 221, article 115930, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2025.115930 [Accessed 10 September 2025].

Pandey, R., Lyden, S., Franklin, E., Millar, B. and Harrison, M. T. (2025), "A systematic review of agrivoltaics – Productivity, profitability, and environmental co-benefits", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 56, pp. 13-36. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2025.03.006 [Accessed 10 September 2025].

Peghin, G. (2024), "Verso una transizione culturale dei paesaggi energetici – Tra responsabilità e necessità | Towards a cultural transition of energy landscapes – Between responsibility and necessity", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 18-29. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1512024 [Accessed 10 September 2025].

Peters, M. D. J., Godfrey, C., McInerney, P., Munn, Z., Tricco, A. C. and Khalil, H. (2020), "Chapter 11 – Scoping Reviews", in Aromataris, E. and Munn, Z. (eds), *JBI Manual for Evidence Synthesis*, pp. 407-452. [Online] Available at: doi.org/10.46658/JBIMES-20-12 [Accessed 10 September 2025].

Rutovitz, J., Langdon, R., Briggs, C., Mey, F., Dominish, E. and Nagrath, K. (2025), "Updated Employment Factors and Occupational Shares for the Energy Transition", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 212, article 115339, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2025.115339 [Accessed 10 September 2025].

Scaramellini, G. and Varotto, M. (eds) (2008), *Paesaggi terrazzati dell'arco alpino – Atlante*, Marsilio, Venezia.

Scognamiglio, A. (2016), "Photovoltaic Landscapes – Design and assessment – A critical review for a new transdisciplinary design vision", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 629-661. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.072 [Accessed 10 September 2025].

Scudo, G. (ed.) (2017), *Architetture e paesaggi – Rigenerazione di sistemi agricoli locali*, Mimesis Edizioni, Milano.

Seay-Fleming, C., Swanson, T. and Gerlak, A. (2025), "For what and for whom? A political ecology of agrivoltaics in the Southwestern United States", in *Sustainability Science*, vol. 20, pp. 1467-1481. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11625-025-01653-3 [Accessed 10 September 2025].

Seay-Fleming, C., Swanson, T., Gerlak, A. K., Pavao-Zuckerman, M. A., Andrews, H., Moore, K. and Barron-Gafford, G. A. (2025), "Cultivating engagement – Public participation in agrivoltaics planning and design", in *Energy Research & Social Science*, vol. 127, article 104273, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.erss.2025.104273 [Accessed 10 September 2025].

Sereni, E. (1961), *Storia del Paesaggio Agrario italiano*, Laterza, Bari.

Solar Energy UK (2025), *Solar Habitat 2025 – Ecological trends on solar farms in the UK*. [Online] Available at: solarenergyuk.org/wp-content/uploads/2025/04/SEUK-Solar-Habitat-2025-3.pdf / [Accessed 10 September 2025]

Steren, A., Slater, Y., Rubin, O. D., Fleischer, A. and Kan, I. (2025), "Toward sustainable practices in photovoltaic and agricultural greenhouse systems – An ecosystem services framework", in *Energy Economics*, vol. 144, article 108364, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108364 [Accessed 10 September 2025].

Torma, G. and Aschemann-Witzel, J. (2023), "Social acceptance of dual land use approaches – Stakeholders' perceptions of the drivers and barriers confronting agrivoltaics diffusion", in *Journal of Rural Studies*, vol. 97, pp. 610-625. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.01.014 [Accessed 10 September 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development – A/RES/70/1*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 10 September 2025].

Vacanti, A. and Leonardi, C. (2024), "Tecnologia, energia e tempo – Percorsi sperimentali per il design di tecnologie appropriate | Technology, energy, and time – Experimental paths for the design of appropriate technology", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 316-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15262024 [Accessed 10 September 2025].

van Eck, N. J. and Waltman, L. (2010), "Software survey – VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping", in *Scientometrics*, vol. 84, issue 2, pp. 523-538. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3 [Accessed 10 September 2025].

Widmer, J., Christ, B., Grenz, J. and Norgrove, L. (2024), "Agrivoltaics, a promising new tool for electricity and food production – A systematic review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 192, article 114277, pp. 1-24. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rser.2023.114277 [Accessed 10 September 2025].

Witwit, I. M. T., Al-agele, H. A. and Higgins, C. W. (2025), "The effect of agrivoltaic system on nutrient content, yield, and water productivity of potatoes", in *Frontiers in Horticulture*, vol. 4, article 1624013, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fhort.2025.1624013 [Accessed 10 September 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 316-331
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18192025

Article Info

Received	11 September 2025
Revised	22 October 2025
Accepted	23 October 2025
Published	30 December 2025

FIBRE NATURALI E CIRCOLARITÀ IN ARCHITETTURA
Sostenibilità ambientale, economica e sociale

NATURAL FIBRES AND CIRCULARITY IN ARCHITECTURE
Environmental, economic, and social sustainability

Francesca Thiébat, Alice Masoero, Fiamma Morselli, Elena Fregonara, Chiara Senatore, Mónica A. Muñoz Veloza, Roberto Giordano

Abstract

Nel quadro di riferimento nazionale e internazionale le fibre vegetali presentano notevoli potenzialità di integrazione nel settore edilizio. L'adozione di materiali a base biologica si allinea agli SDG dell'Agenda 2030, in quanto incide sul consumo di risorse idriche, sull'energia e sul carbonio incorporati e sulla promozione di filiere sostenibili. Una review sistematica esamina l'interazione tra due settori economici strategici, quello agricolo e quello delle costruzioni, con lo scopo di individuare potenzialità e limiti nel raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità. I risultati evidenziano che la sostenibilità ambientale delle fibre naturali nel settore delle costruzioni è un tema ampiamente presente in letteratura e sottolineano la necessità di promuovere l'integrazione tra strumenti di valutazione del ciclo vita per coniugare qualità ambientale, responsabilità sociale e impatto economico, contribuendo a un modello produttivo coerente con l'SDG 8.

~~Plant-based~~ fibres demonstrate substantial potential for integration within the construction sector in both national and international contexts. The use of bio-based materials aligns with the Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda, influencing water consumption, embodied energy and carbon, and the establishment of sustainable supply chains. This systematic review investigates the relationship between two strategic economic sectors, agriculture and construction, with the aim of identifying their respective opportunities and constraints in advancing sustainability objectives. The findings reveal that the environmental sustainability of natural fibres in construction is extensively addressed in the existing literature. Yet, they also highlight the need to strengthen the integration of life-cycle assessment tools. Such integration is essential to balancing environmental quality, social responsibility, and economic performance, thereby supporting a production model consistent with the principles of SDG 8.

Keywords

fibre naturali, architettura sostenibile, valutazione del ciclo vita, analisi dei costi del ciclo vita, valutazione del ciclo vita sociale

natural fibres, sustainable architecture, life cycle assessment, life cycle costing, social life cycle assessment

Francesca Thiébat, Architect and PhD, is an Associate Professor of Architectural Technology and Environmental Design, Politecnico di Torino (Italy). E-mail: francesca.thiebat@polito.it

Alice Masoero, Architect and Researcher at the Department of Architecture and Design, Politecnico di Torino (Italy). E-mail: alice.masoero@polito.it

Fiamma Morselli, PhD Candidate in Design and Technology – People, Environment, Systems at the Politecnico di Torino (Italy). E-mail: fiamma.morselli@polito.it

Elena Fregonara, PhD, is a Full Professor of Economic Evaluation at the Politecnico di Torino (Italy). E-mail: elena.fregonara@polito.it

Chiara Senatore, Architect and PhD Candidate in Design and Technology – People, Environment, Systems, Politecnico di Torino (Italy). E-mail: chiara.senatore@polito.it

Mónica Alexandra Muñoz Veloza, Architect and PhD, is a Postdoctoral Research Fellow at the Politecnico di Torino (Italy). E-mail: monica.munozveloza@polito.it

Roberto Giordano, Architect and PhD, is a Full Professor at the Department of Architecture and Design, Politecnico di Torino (Italy). E-mail: roberto.giordano@polito.it



Negli ultimi anni l'importanza attribuita agli impatti ambientali e socioeconomici nei settori dell'architettura e del design ha alimentato l'interesse verso materiali a base biologica. In questo contesto le fibre vegetali presentano notevoli potenzialità nell'integrazione in prodotti e processi edilizi, sia perché rinnovabili sia perché solitamente caratterizzate da una limitata impronta ecologica (Carcassi et alii, 2022). Tali tematiche si inseriscono in modo coerente nel quadro degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) dell'Agenda 2030 in particolare per raggiungere l'SDG 6 (Acqua pulita e servizi igienico-sanitari), l'SDG 7 (Energia pulita e accessibile) e l'SDG 13 (Lotta al cambiamento climatico), così come l'SDG 8 (Lavoro dignitoso e crescita economica), in quanto l'adozione di tali materiali implica aspetti legati al consumo di risorse idriche, all'energia e al carbonio incorporati nel ciclo vita e alla promozione di filiere sostenibili (Schroeder, Anggraeni and Weber, 2019; Cosentino, Fernandes and Mateus, 2024; Morpurgo, 2024). In particolare l'SDG 8 invita a migliorare l'efficienza nell'impiego delle risorse a livello mondiale e mira al disaccoppiamento tra crescita economica e degrado ambientale (UN, 2015).

Nel settore edilizio, per tentare il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità, occorre ripensare il processo produttivo e parallelamente quello progettuale e costruttivo, attraverso una visione sistemica che si basi sulle tre dimensioni della sostenibilità e sui principi dell'economia circolare (Le et alii, 2025; Kayaçetin, Piccardo and Versele, 2023). Tale obiettivo è anche alla base del progetto 'Circular Design For Natural Fibres' del PNRR MICS (Made in Italy – Circolare e Sostenibile) che mira alla valorizzazione delle fibre naturali recuperate o sottoutilizzate, anche in collaborazione con le comunità locali, per creare catene produttive più resilienti e sostenibili. Nell'ambito del progetto l'articolo si propone di restituire lo stato dell'arte della letteratura scientifica analizzando due settori economici strategici per l'Europa, quello agricolo e quello delle costruzioni, al fine di esplorare le interazioni, le potenzialità e i limiti nel raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità.

In particolare la revisione sistematica (Page et alii, 2021; Littell, Corcoran and Pillai, 2008) si focalizza sulle seguenti domande di ricerca: qual è lo stato dell'arte dei metodi di valutazione della sostenibilità ambientale, sociale ed economica in relazione alle fibre naturali? gli approcci di valutazione della sostenibilità Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Costing (LCC), Social Life Cycle Assessment (S-LCA) possono favorire lo sviluppo di processi produttivi circolari tra il settore agricolo e quello edilizio? quali indicatori di impatto risultano maggiormente rilevanti nella valutazione delle fibre naturali per stimolare nuove filiere produttive che rispondano agli SDG?

A partire da un inquadramento scientifico dei temi trattati l'articolo si struttura nei seguenti paragrafi: metodologia e limiti della ricerca, principali risultati della revisione sistematica, tre paragrafi di approfondimento critico sulle tematiche individuate nelle domande di ricerca e conclusioni. Il presente studio è finalizzato alla definizione di un quadro di riferimento indirizzato alla comunità scientifica sul tema della valutazione della sostenibilità nell'ambito delle fibre naturali per l'architettura e il design. In particolare l'analisi sistematica restituisce una revisione strutturata della letteratura esistente che mira a sintetizzare le migliori evidenze disponibili per rispondere a una specifica domanda di ricerca e agevolare una vasta diffusione dei risultati (Zumsteg, Cooper and Noon, 2012).

Gli esiti della revisione indicano che tra i numerosi casi studio individuati l'LCA è l'approccio più diffuso, l'LCC è in genere associato all'LCA e il S-LCA è scarsamente applicato, mentre le fibre più indagate sono gli scarti delle coltivazioni del riso nei bio-cementi, della canapa nell'involucro termo-isolante e del mais nei biocombustibili. Le conclusioni sottolineano l'importanza di promuovere l'integrazione tra strumenti di valutazione basati sul ciclo vita (Dace et alii, 2024) per coniugare qualità ambientale, equità e responsabilità sociale e impatto economico nell'ambito delle costruzioni, contribuendo al raggiungimento di un modello produttivo circolare e coerente con l'obiettivo SDG 8.

Inquadramento scientifico e originalità del contributo | Negli ultimi cinquant'anni l'estrazione mondiale di materiali è più che triplicata, superando i 100 miliardi di tonnellate annue (Circle Economy, 2025), di cui il 60% è destinato all'ingegneria civile e all'edilizia (Zabalza Bribiàn, Valero Capilla and Aranda Usón, 2011). L'estrazione e l'uso dei materiali sono infatti responsabili di circa due terzi delle emissioni globali di gas serra e di oltre il 90% della perdita di biodiversità e dello stress idrico (International Resource Panel, 2024). La produzione di materiali da costruzione contribuisce inoltre per oltre l'80% al consumo energetico complessivo del processo edilizio (Zhang et alii, 2019), determinando un rilevante impatto in termini di energia incorporata ed emissioni (Piccardo et alii, 2020).

Le scelte progettuali si configurano quindi come momenti critici nei quali vengono determinati non solo gli aspetti estetico-funzionali, ma anche gli impatti ambientali, sociali ed economici di un manufatto lungo il suo intero ciclo vita (Mesa, Esparragoza and Maury, 2018; Singh and Ordoñez, 2016). In questo contesto l'Economia Circolare rappresenta il paradigma di riferimento per ridurre la dipendenza da risorse primarie e promuovere modelli rigenerativi, essendo basata su principi di prevenzione dei rifiuti, simbiosi industriale e 'design out waste' (McDonough and Braungart, 2002; Bocken et alii, 2016; Ferrara and Squatrito, 2022).

L'Economia Circolare è stata istituzionalizzata a livello europeo attraverso il Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020), il Green Deal (European Commission, 2019) e il New European Bauhaus (European Commission, 2021, 2023) che riconoscono il settore edilizio come uno degli ambiti prioritari di intervento. Queste strategie sono supportate dal quadro metodologico consolidato della LCA, definito nel 2006 dalle UNI EN ISO 14040 e 14044 e aggiornate nel 2021 e poi dalle UNI EN 15978:2011 e UNI EN 15804:2021, che permettono di valutare gli impatti ambientali di prodotti e servizi e di verificare l'efficacia delle iniziative di contrasto proposte dall'Agenda 2030 e integrate nei Piani europei (Backes and Traverso, 2022; Giordano and Andreotti, 2023).

A supporto del Life Cycle Assessment diversi autori riconoscono la necessità di integrare il Life Cycle Costing (ISO 15686:2017), che consente una valutazione dei costi lungo il ciclo vita e il Social Life Cycle Assessment (Fig. 1), sviluppato secondo le linee guida UNEP / SETAC (2009) e quelle della UNEP (2020). L'integrazione delle tre metodologie nella Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) è al centro di molti programmi europei come Level(s) e Orienting (2020-2024) che supportano lo sviluppo di metodologie e indicatori al fine di agevolarne l'applicazione da parte di aziende, organizzazioni e ricercatori, con particolare attenzione alle PMI operanti in diversi settori.

In tale cornice assumono rilievo i materiali a base biologica, definiti dalla norma UNI EN 16575:2014 come 'materiali interamente o parzialmente derivati da biomassa, ossia materie di origine biologica, escluse le fonti fossili contenute nella geosfera' (EN 16575:2014, punto 2.1). All'interno di questa categoria le fibre naturali rappresentano una risorsa strategica per l'architettura sostenibile (Thiébat and Morselli, 2025), includendo materiali di origine vegetale caratterizzati da cicli di crescita brevi, disponibilità diffusa e capacità di sequestro del carbonio.

Oltre alla riduzione dell'energia incorporata e delle emissioni le fibre naturali si distinguono per la loro idoneità a processi di circolarità intersettoriale, in cui scarti agricoli o sottoprodotti agroalimentari possono essere riconvertiti in isolanti, pannelli o componenti edilizi a carbonio neutro e negativo (Göswein et alii, 2022). Inoltre ricerche recenti confermano che la progettazione con fibre naturali non risponde soltanto a criteri prestazionali, ma integra valutazioni ambientali, economiche e sociali, ampliando le opportunità applicative in architettura e design (Violano, Cannaviello and Del Prete, 2021; Sposito and Scalisi, 2023; Mouton, Allacker and Röck, 2023).

Le review che affrontano il tema delle tre dimensioni della sostenibilità e della circolarità dei biomateriali per l'edilizia non sono numerose. Tra queste Le, Salomone e Nguyen (2024) esaminano criticamente i metodi utilizzati per valutare le dimensioni di sostenibilità di soluzioni edilizie basate su materiali biogenici, mentre l'analisi dello stato dell'arte condotta da Rigillo et alii (2023) mette in evidenza come il rapporto tra strumenti digitali e circolarità sia ancora poco indagato nell'Unione Europea, soprattutto nelle discipline dell'Architettura. In tale contesto l'originalità del presente contributo consiste nella definizione di un quadro di riferimento aggiornato sull'uso delle fibre naturali nel settore delle costruzioni mettendo in relazione filiere e processi produttivi circolari con gli approcci sul ciclo vita e analizzando le connessioni con gli SDG.

Metodologia adottata e limiti della ricerca | La revisione della letteratura è stata condotta seguendo il metodo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), sviluppato da Moher et alii nel 2009 e aggiornato nel 2021 (Page et alii, 2021) che si articola in quattro fasi e include una check list per l'identificazione degli studi rilevanti per la review e uno schema denominato 'flow diagram'. La review è stata quindi condotta sulla base delle fasi che si riportano a seguire.

Fase 1) Formulazione delle domande di ricerca e definizione delle query di ricerca: la prima fase si è basata sugli obiettivi e sulle domande, descritti nell'introduzione, per l'identificazione delle parole chiave di ricerca. La query (Fig. 2) si è concentrata su tre raggruppamenti di parole chiave che riguardano i seguenti ambiti: fibre naturali, con un focus sulle fibre vergini o di scarto coltivate in Italia; approcci di valutazione in ottica ciclo vita che considerano le tre dimensioni della sostenibilità; filiere e processi produttivi circolari. Una seconda query ha circoscritto la ricerca precedente ai settori dell'architettura e del design; gli operatori booleani 'AND' e 'OR' sono stati impiegati per affinare la ricerca.

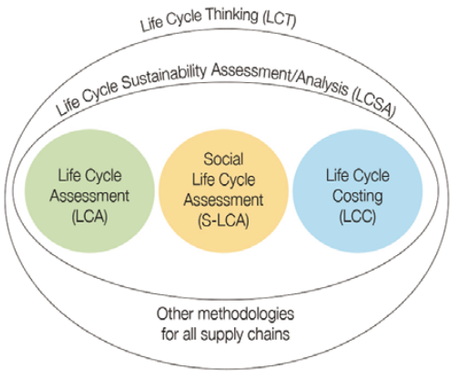


Fig. 1 | Life Cycle approaches in the context of Life Cycle Sustainability Assessment and Life Cycle Thinking (source: Caldeira et alii, 2022).

Fase 2) Procedure di campionamento: la seconda fase ha riguardato la selezione degli studi sulla base di criteri di inclusione e esclusione sul database Scopus; è stata condotta in data 18 aprile 2025 e nuovamente l'8 agosto 2025 per la verifica e l'aggiornamento dei risultati; sono state escluse risorse non facilmente consultabili online (libri e capitoli di libri) e/o non in lingua inglese.

Fase 3) Raccolta, analisi e sintesi dei dati: in questa fase sono stati estratti i dati dagli studi selezionati, poi analizzati e sintetizzati in modo sistematico. I contenuti sono stati approfonditi attraverso un'analisi qualitativa delle risorse bibliografiche, sulla base delle informazioni contenute nel titolo, abstract e keywords. Sono stati esclusi gli articoli di review e altre risorse non accessibili e per ciascun articolo selezionato sono stati estratti ed elaborati su fogli di calcolo i seguenti elementi: tipo di risorsa bibliografica, anno di pubblicazione, approccio ciclo vita (LCA, LCC, S-LCA, LCSA), filiera di riferimento, oggetto dello studio, tipologia di fibra naturale, origine della fibra (vergine o sotto-prodotto / rifiuto).

Fase 4) Interpretazione dei risultati: l'ultima fase ha approfondito criticamente i temi individuati nelle domande di ricerca.

Uno dei limiti della ricerca consiste nella rapidità con cui i risultati della review possono variare. L'attuale interesse per le tematiche legate alla sostenibilità si collega a un rapido aumento della produzione scientifica, tuttavia l'adozione di un approccio sistematico consente di ripetere e aggiornare nel tempo la ricerca, superando tale criticità. In Figura 2 sono riportati i valori più recenti tra parentesi. Un altro limite è legato all'accessibilità delle risorse bibliografiche: la ricerca potrebbe infatti risultare parziale in quanto libri e altre risorse non open access sono stati esclusi in quanto spesso non consultabili. Infine un ulteriore vincolo può essere la mancanza di una nomenclatura standardizzata che potrebbe aver portato a una ricerca parziale per parole chiave. Lo stesso limite è emerso nell'interpretazione dei risultati in cui acronimi e indicatori di impatto simili possono creare ambiguità nella lettura degli esiti.

Risultati | Dalla prima query sono stati individuati 785 articoli nell'arco temporale dal 2005 al 2025 (Fig. 3) e in seguito alla fase di screening sono stati selezionati 108 risultati che includono articoli e atti di convegno (Fig. 4). Si evidenzia una tendenza crescente del numero di pubblicazioni a partire dal 2009 con un aumento significativo a partire dal 2020 e una prevalenza di pubblicazioni nel contesto italiano (Fig. 5); il dato conferma l'interesse verso i temi della sostenibilità e della decarbonizzazione introdotti dall'Agenda 2030 e dal Green Deal europeo.

Tuttavia sul totale di 108 solo 4 studi considerano tutte e tre le dimensioni della sostenibilità, 18 studi affrontano congiuntamente gli aspetti ambientali ed economici e tra gli articoli che considerano una sola dimensione (Tab. 1), predominano 102 studi LCA rispetto a uno studio LCC e uno studio S-LCA (Fig. 6). Dalle query di ricerca emerge che i paper più citati su Scopus sono quelli di Gursel, Maryman and Ostertag (2016), Belaud et alii (2019), Yu, Tan e Ruan (2011) e Buratti et alii (2018), che valutano prevalentemente la dimensione ambientale, e di Fernando et alii (2021) che tratta in maniera congiunta le dimensioni ambientale ed economica.

Inoltre, sulla base delle informazioni contenute nel titolo, abstract e keywords è stata condotta un'analisi qualitativa sui risultati in cui emerge che gli approcci LCA, LCC e S-LCA applicati al settore delle costruzioni hanno ricadute su diversi ambiti produttivi, quali l'edilizia e l'ingegneria civile per il 45%, l'energia (bio-carburanti) per il 22%, l'agro-alimentare per il 13.8%, la chimica per il 9%, il design per il 4.6%, l'automotive per il 2.8% e abbigliamento per il 2.8% (Fig. 7). Per facilitare la lettura dei risultati è stata eseguita un'elaborazione grafica attraverso il software VOSviewer, sviluppato dalla Leiden University, su 108 articoli come illustrato nella Figura 8.

Analizzando la tipologia e l'origine delle fibre naturali oggetto degli articoli si riscontra una predominanza di residui della filiera del riso (18%), seguita da canapa (12 %) e mais (8%) e da altre fibre con valori intorno al 4 %, tra cui bambù, scarti del legno e lana di pecora (Fig. 9). Dai risultati si evince che gli scarti delle coltivazioni del riso e del mais, tra le più presenti nel settore alimentare a livello mondiale, sono ampiamente analizzati, soprattutto nel settore dei bio-carburanti (tutolo di mais) e dei prodotti per l'edilizia (lolla e paglia di riso).

Un successivo approfondimento su 43 casi studio selezionati nell'ambito dell'edilizia, dell'ingegneria civile e del design (Tab. 2) ha permesso di individuare le fibre naturali maggiormente diffuse e le relative applicazioni in edilizia, quali ad esempio materiali bio-compositi, materiali per l'imballaggio, prodotti cementizi, elementi di muratura e pannelli di involucro (Fig. 10). Le fibre maggiormente indagate sono i residui della coltivazione del riso, impiegati soprattutto in prodotti cementizi e materiali isolanti; la canapa, in bio-compositi, elementi di muratura e pannelli termoisolanti; il bambù, alla scala di edificio e nel packaging.

Dall'analisi della letteratura emerge che gli indicatori di valutazione della sostenibilità delle fibre naturali (Tab. 3) sono principalmente concentrati sul calcolo della CO_{2eq} (GWP, EC, CF, GHG, CO_2) e sul consumo energetico cumulativo (CED, OE, EE, OC), sul consumo idrico, sul potenziale di acidificazione, sul potenziale di eutrofizzazione, sul consumo di suolo, sulla tossicità per l'uomo e infine sul calcolo di assorbimento e stoccaggio di CO_2. Tra gli indicatori economici si citano il 'payback period' e il 'net present value', mentre per gli indicatori sociali viene presa come riferimento la banca dati PSILCA che ne include 34.

Dai risultati sono emersi tre principali ambiti di discussione connessi alle domande di ricerca: l'integrazione tra approcci ciclo vita, la relazione tra filiere e processi produttivi circolari e le connessioni con gli SDGs.

Potenzialità e limiti dell'integrazione tra approcci LCA, LCC, S-LCA | La scarsa presenza delle dimensioni sociale ed economica riscontrata nei risultati può essere attribuibile al fatto che la maggior parte degli studi si concentra sull'uso delle fibre naturali a livello sperimentale. Gli studi che affrontano l'integrazione degli approcci ciclo vita presentano due orientamenti metodologici: la combinazione delle dimensioni della sostenibilità in un unico framework analitico e lo sviluppo indipendente delle valutazioni con successivo confronto dei risultati.

Gli approcci combinati (Kristianto and Zhu, 2017; Hartini et alii, 2023; Arias et alii, 2024; Alderkamp et alii, 2025; Garkoti and Thengane, 2025; Komkova and Habert, 2023; Sifuentes-Nieves et alii, 2023; García-Velásquez, Leduc and van der Meer, 2022) evidenziano le relazioni critiche tra risultati economici e impatti ambientali, fornendo un contributo utile alla definizione di politiche e alla pianificazione sostenibile delle filiere produttive. Tali contributi rimangono tuttavia per lo più limitati ad analisi teoriche o basate su modelli di simulazione, prevalentemente dei settori alimentare, biocarburanti e costruzioni, non integrano in maniera sistematica le dimensioni economica e ambientale e non includono la dimensione sociale.

Gli approcci sviluppati in maniera parallela (Bartocci et alii, 2020; Cortés-Peña et alii, 2020; Pinelli et alii, 2020; Schonhoff et alii, 2023; Fernando et alii, 2021; Martínez and Miller, 2025; Paul, Islam and Elahi, 2023; Khan and Ali, 2019; Garas, Sayed and Bakhoum, 2021; Ondova, Stevulova and Meciarova, 2013; Gounni et alii, 2019) risultano prevalentemente applicati al settore delle costruzioni. In questi studi LCA e LCC sono condotte separatamente e messe a confronto, con il vantaggio di una maggiore chiarezza metodologica. Gli studi mostrano spesso benefici ambientali in termini di riduzione delle emissioni di CO_2 e mettono in evidenza alcuni limiti come i costi elevati, la dipendenza da disponibilità locali delle risorse e la limitata analisi di impatti diversi dal cambiamento climatico (Bartocci et alii, 2020; Paul, Islam and Elahi, 202; Khan and Ali, 2019).

Un contributo da considerare a parte è quello di Mancini et alii (2023) che affrontano esclusivamente la S-LCA e propongono una valutazione degli impatti sociali di 44 prodotti alimentari rappresentativi nel contesto europeo: a differenza degli impatti ambientali, i rischi sociali risultano elevati per frutta, verdure e riso. Sebbene lo studio sia rilevante in ottica di policy, non integra le dimensioni ambientali ed economiche limitandone l'applicabilità.

Gli studi LCA nel settore delle costruzioni si basano principalmente su valutazioni comparative per lo sviluppo di nuovi materiali non convenzionali, con risultati che solitamente non includono gli impatti ambientali durante l'uso e a fine vita del prodotto. Alcuni autori tentano di includere la fase d'uso normalizzando i risultati ambientali alle prestazioni meccaniche (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016; Isopescu et alii, 2024; Sprenger et alii, 2025; Sinka et alii, 2020), igrotermiche (Aversa et alii, 2019; Dotelli et alii, 2020) e fisico-tecniche (Buratti et alii, 2018; Ricciardi et alii, 2021) o comparando le miscele a parità di prestazioni meccaniche (Soleimani and Shahandashti, 2017; Martínez and Miller, 2025; Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024). Solo alcuni studi ampliano il confine del sistema a tutto

il ciclo vita, 'dalla culla alla tomba' (Seyedabadi, Abolhassani and Eicker, 2023; Keena et alii, 2022; Ramos et alii, 2021; Giuffrida et alii, 2024) o 'dalla culla alla culla' (Salzer et alii, 2017), mettendo in evidenza le potenzialità e i limiti dell'uso di scarti agro-alimentari in edilizia e design. In altre ricerche emerge la capacità delle fibre di assorbire carbonio durante la fase di crescita delle piante (Giuffrida et alii, 2024) e pertanto di agire come serbatoio di stoccaggio della CO_2 durante la fase d'uso.

Tuttavia gli studi LCA individuati sono di tipo statico e non tengono conto delle dinamiche temporali legate ai diversi tassi di assorbimento ed emissione del carbonio né degli effetti legati ai ritardi tra sequestro e rilascio (Keena et alii, 2022). Alcuni autori sottolineano che, nonostante i biomateriali rappresentino un'alternativa rinnovabile ai materiali convenzionali, il loro impiego comporta alcuni rischi intrinseci: ad esempio possibili modifiche nell'uso del suolo potrebbero tradursi in fenomeni di deforestazione e perdita di biodiversità locale (Keena et alii, 2022).

Nella valutazione della sostenibilità dei materiali di scarto il contributo legato all'impatto dei trasporti costituisce un fattore di grande importanza: in aree geografiche come Stati Uniti (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016), Canada (Keena et alii, 2022), Sud-Est Asiatico (Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024) ed Europa (Cucchiella et alii, 2024) in cui le distanze su gomma sono notevoli, i trasporti contribuiscono in larga parte alle emissioni e per questo motivo l'uso di materiali disponibili localmente rimane la scelta più sostenibile (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016). Su tale ambito alcuni studi hanno svolto un'analisi di sensibilità per valutare le differenze dei risultati ambientali aumentando e riducendo i chilometri attribuiti (Soleimani and Shahandashti, 2017; Araujo et alii, 2022).

Analogamente la trasformazione dello scarto agricolo comporta spesso lavorazioni che richiedono un'elevata quantità di energia, come ad esempio la macinazione (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016; Martínez and Miller, 2025) e l'estrusione (Cucchiella et alii, 2024). Inoltre l'uso di fibre vegetali, quali canapa, paglia, nocciolino di oliva, per la produzione di mattoni, cementi o intonaci, generalmente riduce l'impatto ambientale, ma compromette anche le proprietà meccaniche, in particolare la resistenza a compressione e la durabilità (Vilaboa Diaz, López and Bugallo, 2022). L'analisi di inventario (LCI) è stata condotta da alcuni autori sulla base di dati primari (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016; Soleimani and Shahandashti, 2017), mentre da altri su dati tratti da letteratura e database (Onyelowe et alii, 2022; Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024; Martínez and Miller, 2025) o da Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD; Aversa et alii, 2019; Dotelli et alii, 2020), tralasciando informazioni come la provenienza delle fibre naturali e del processo di incenerimento, i trasporti e l'energy mix nazionale di riferimento.

Interazioni tra agricoltura, architettura e design in ottica circolare | I risultati confermano il forte interesse verso l'attivazione di sinergie con il settore agricolo e industriale per favorire la transizione verso l'economia circolare e la decarbonizzazione dell'ambiente costruito. In merito agli scarti del riso, sebbene pochi studi mettano in evidenza informazioni sulla reperibilità della fibra vegetale, secondo i dati della FAO il riso è il terzo prodotto alimentare coltivato con 740 milioni di tonnellate per anno (Buratti et alii, 2018) e a livello mondiale 156 milioni di tonnellate di lolla di riso vengono smaltite annualmente (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016). In India, seconda nazione al mondo per la produzione di riso, i residui della coltivazione vengono in genere bruciati contribuendo all'innalzamento critico delle emissioni di PM2.5 e solo l'1% di ceneri di lolla di riso (RHA) viene utilizzato, mentre milioni di tonnellate vengono conferite in discarica (Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024).

In ambito edilizio e civile è sempre più diffuso l'uso di materiali cementizi supplementari (SCM) all'interno delle miscele di calcestruzzo e cementizie per ridurre o eliminare il clinker (Martínez and Miller, 2025). Tra gli SCM è sempre più diffuso l'impiego di ceneri da termovalorizzazione di scarti agricoli, in particolare del RHA, per la produzione di biocementi, poiché migliora le proprietà ambientali, meccaniche e di durabilità del calcestruzzo e consente di sostituire fino al 30-40% di cemento Portland (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016).

Gli studi LCA analizzati si concentrano principalmente sugli impatti di trasporti (sostanze inquinanti), sulle emissioni in fase di cottura del cemento e di incenerimento della frazione vegetale (gas a effetto serra e sostanze inquinanti), sull'energia primaria per le lavorazioni e sul consumo di acqua per le operazioni di cava. I risultati della fase di analisi di valutazione degli impatti (Fase LCIA – Life Cycle Impact Assessment, secondo la norma ISO 14040:

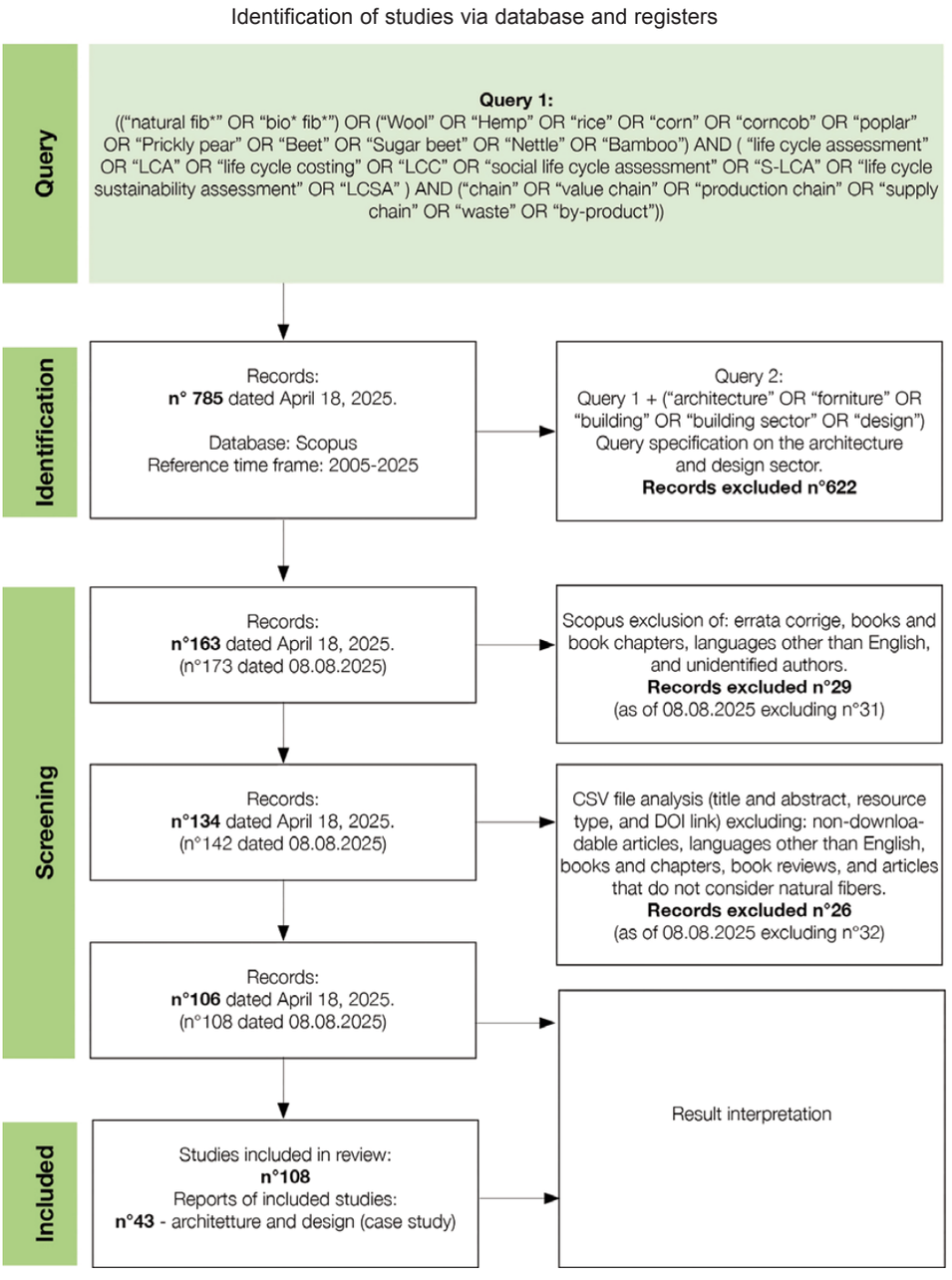


Fig. 2 | Flow diagram systematic review according to the PRISMA methodology (credit: the Authors, 2025).

2021) evidenziano la maggiore sostenibilità dei biocementi a base di RHA, anche in combinazione con altri SCM: l'indicatore GWP-GHG si attesta tra 284 e 329 kg CO_2/mc per miscele con RHA e scende fino a 194 kg CO_2/mc con RHA e geo-polimeri, a fronte dei 369-544 kg CO_2/mc del cemento convenzionale (Martínez and Miller, 2025).

Oltre che nei leganti i residui della coltivazione del riso, in particolare lolla e paglia, sono utilizzati per pannelli termo-isolanti, anche in combinazione con altre fibre (Quintana-Gallardo et alii, 2021); in particolare sulla base di dati primari Buratti et alii (2018) e Ricciardi et alii (2021) hanno confrontato le prestazioni ambientali, termiche e acustiche di campioni di isolanti a base di lolla di riso e altri materiali biogenici e di scarto, mostrando con un approccio LCA 'cradle to gate' i valori di emissione più bassi per pannelli in lolla di riso (1,11 kg CO_{2eq}/mq), in pula di caffè (0.56 kg CO_{2eq}/mq) e in miscela lolla 20% – sughero riciclato 60% – pula di caffè 20% (1,83 kg CO_{2eq}/mq). Va tuttavia rilevato che tali valori non includono la fase di coltivazione e trasformazione del riso, a differenza di studi (Scrucca et alii, 2020) che applicano una quota allocata al sottoprodotto. Infine Quintana-Gallardo et alii (2021), in uno studio LCA comparativo, hanno mostrato che l'impiego della paglia di riso in materiali da costruzione evita 40 kg CO_{2eq} rispetto all'incenerimento e 94,21 kg CO_{2eq} rispetto al suo abbandono in campo.

La fibra tecnica di canapa e il canapulo (parte legnosa della canapa) sono diffusi a tutte le scale edilizie, dai bio-compositi ai componenti di involucro (Tab. 2). Sprenger et alii (2025) integrano un'analisi LCA comparativa condotta su fibre di canapa, kenaf, lino e sisal con una valutazione delle prestazioni meccaniche delle quattro tipologie di fibra. Tuttavia lo studio comparativo 'cradle to gate' mostra che le fibre di lino derivanti dalla stoppa, sottoprodotto della produzione tessile, presentano il minor impatto ambientale e contemporaneamente elevate prestazioni meccaniche, rendendole particolarmente adatte alla produzione di compositi stampati a iniezione.

Aversa et alii (2019) e Dotelli et alii (2020) hanno condotto una LCA comparativa 'cradle to gate' su quattro sistemi di muratura non portanti, ciascuno caratterizzato da una differente stratigrafia: calce e canapulo, calcestruzzo aerato autoclavato, argilla espansa e laterizio. I risultati evidenziano che la parete in calce e canapulo presenta un impatto ambientale inferiore in termini di potenziale di acidificazione, di uso del suolo e di acqua, GWP, potenziale esaurimento abiotico (fossile e non fossile) e potenziale di formazione di smog fotochimico. Giuffrida et alii (2024) confrontano una parete in terra cruda isolata con materiali a base biologica (canapa, sughero e paglia) con alcuni benchmark di riferimento.

L'analisi LCA di tipo 'dalla culla alla tomba' simula l'intero ciclo vita di 100 anni di un metro quadro di parete e considera diversi indicatori di prestazione termica, energetica e ambientale. Gli autori hanno condotto un'analisi di sensibilità per valutare fibre vegetali vergini diverse aggiunte alla miscela in terra al fine di valutare con più attenzione gli indicatori di impronta di carbonio e di cattura di carbonio. Dai risultati le stabilizzazioni con paglia e con canapa rappresentano buone alternative in quanto richiedono poca irrigazione rispetto a juta e lino.

Il bambù, a differenza di molte altre fibre naturali, si distingue per l'elevata resistenza strutturale e costituisce quindi una risorsa di particolare interesse per le applicazioni in architettura sostenibile, con il potenziale di ridurre gli impatti ambientali legati alle strutture rispetto a materiali da costruzione convenzionali, e in particolare al calcestruzzo. Lo studio di Yu, Tan e Ruan (2011) dimostra infatti che un prototipo di abitazione in bambù in Cina comporta una riduzione significativa sia dell'energia incorporata sia delle emissioni di CO_{2eq} lungo il ciclo vita rispetto a edifici in cemento e laterizio.

Risultati analoghi emergono da Salzer et alii (2017) che includono il bambù tra le soluzioni costruttive a minore impatto ambientale nel contesto del social housing. Sebbene riferito a un diverso settore applicativo, lo studio di Chen et alii (2023) conferma tali evidenze mostrando come la fibra di bambù consenta una riduzione dei consumi energetici e delle emissioni anche nella produzione di imballaggi alimentari, rispetto a materiali plastici convenzionali. Araujo et alii (2022) sottolineano inoltre la necessità di approfondire aspetti di natura socio-economica legati allo sviluppo di filiere locali e alla creazione di occupazione nei Paesi emergenti.

Tra i materiali a base biologica innovativi che hanno suscitato un crescente interesse da parte della comunità scientifica vi sono i compositi termoisolanti a base di micelio con scarti agricoli (es. canapa, lino, legno; Babenko et alii, 2025) e a base di lana (Quintana-Guallardo et alii, 2020; Pennacchio et alii, 2017). Un aspetto rilevante in merito al micelio riguarda il fatto che la selezione e grandezza delle fibre naturali utilizzate nel substrato, la tipologia fungina, il processo produttivo e il periodo di incubazione influenzano in modo sostanziale le proprietà meccaniche dei componenti (Babenko et alii, 2025).

Sebbene la valutazione degli impatti ambientali non rappresenti il tema centrale degli studi sul micelio, essa sta acquisendo crescente rilevanza e studi come quello di Babenko et alii (2025) mostrano risultati promettenti in termini di sostenibilità di questi compositi. In particolare, gli autori conducono uno studio LCA 'dalla culla al cancello' che confronta gli impatti ambientali di due processi produttivi di compositi a base di micelio: un primo sviluppato a temperatura ambiente e un secondo in condizioni controllate all'interno di una camera climatica che presenta valori più elevati di emissioni GHG, uso di risorse, GWP, potenziale di acidificazione e potenziale di tossicità per l'uomo.

Per quanto riguarda la lana di pecora di scarto, proveniente dalla filiera zootecnica o da filiera tessile di abbigliamento e arredo, diversi autori hanno dimostrato la sua capacità di soddisfare prestazioni acustiche e termiche con valori equivalenti a prodotti isolanti convenzionali, quali ad esempio lane minerali e schiume polimeriche; la lana garantisce inoltre ottime capacità di resistenza al fuoco dovute alla proprietà ignifughe del materiale (Gounni et alii, 2019).

Pennacchio et alii (2017) e Quintana-Guallardo et alii (2020) hanno condotto analisi LCA per confrontare prodotti isolanti presenti sul mercato europeo con altri sperimentali in lana e canapa, in fibra di cellulosa e in lana di scarto e PET. L'uso della lana di scarto per l'isolamento termico è stato analizzato anche dal punto di vista dei costi da Gounni et alii (2019): l'analisi LCC ha tenuto conto dei costi iniziali e dei costi energetici in fase d'uso per definire il vantaggio economico nell'impiego dei materiali biogenici rispetto a EPS e lana di roccia.

Numerosi studi analizzano l'impiego di materiali e fibre naturali in edilizia non solo singolarmente, ma anche attraverso combinazioni o confronti tra alternative. Le ricerche riguardano componenti e materiali edilizi (Babenko et alii, 2025; Seyedabadi, Abolhassani and Eicker, 2023; Vilaboa Dìaz, López and Bugallo, 2022; Safaripour et alii, 2021; Gounni et alii, 2019; Boškovic and Radivojevi, 2023) e il confronto tra componenti (Babenko et alii, 2025; Keena et alii, 2022; Quintana-Gallardo et alii, 2021; Pittau et alii, 2020; Essaghouri, Mao and Li, 2023) o interi edifici (Chipade et alii, 2025; Salzer et alii, 2017),

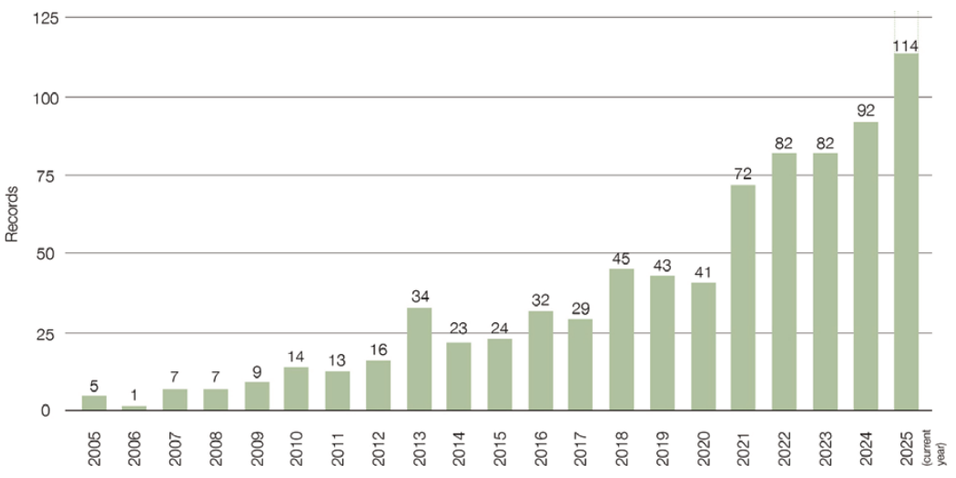


Fig. 3 | Records by year related to the first identification; n. 785 records found on 8/8/2025 (credit: the Authors, 2025).

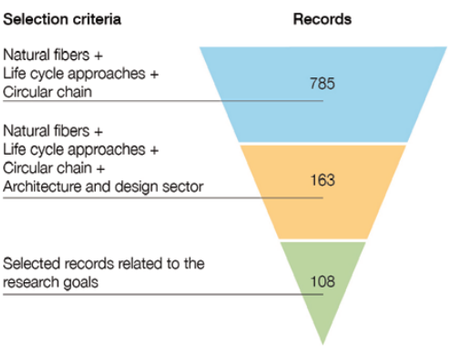


Fig. 4 | Records and criteria keywords related to the three selection filters (credit: the Authors, 2025).

con l'obiettivo di valutare i vantaggi e le riduzioni degli impatti lungo il ciclo vita. Altri studi comparativi (Salzer et alii, 2017; Keena et alii, 2022) mostrano come sistemi costruttivi basati su materiali naturali quali legno, bambù e fibra di cocco possano ridurre l'impatto ambientale dal 35% all'83% rispetto alle soluzioni tradizionali.

Life Cycle Thinking, Economia Circolare ed SDG | I risultati della presente review sono stati analizzati criticamente in relazione agli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs). Nell'ambito del Life Cycle Thinking, l'Economia Circolare può essere considerata una traiettoria promettente per guidare le transizioni verso il raggiungimento degli SDG (Schroeder, Anggraeni and Weber, 2019). Tale prospettiva è principalmente attribuibile al suo notevole richiamo da parte dei decisori politici e degli attori industriali. Il forte legame tra gli scarti del settore agricolo e altre filiere produttive che emerge dall'analisi della letteratura condotta, ha un impatto diretto sull'SDG 8, in quanto mira a promuovere la creazione di nuove filiere, posti di lavoro e una crescita economica sostenibile. La circolarità ha inoltre un ruolo importante nel promuovere pratiche come la riparazione, la rigenerazione, il retrofit, il riciclo, la simbiosi industriale e le filiere a ciclo chiuso, che sono fondamentali per potenziare l'efficienza delle risorse (Schroeder, Anggraeni and Weber, 2019), così come indicato nel Target 8.4 'migliorare progressivamente, fino al 2030, l'efficienza delle risorse globali nel consumo e nella produzione nel tentativo di scindere la crescita economica dal degrado ambientale, in conformità con il quadro decennale di programmi sul consumo e la produzione sostenibili, con i paesi sviluppati che prendono l'iniziativa'.

L'impiego di fibre naturali nel settore dell'architettura e del design in ottica circolare è inoltre in sinergia con altri SDG, tra cui il 6 (Acqua), 7 (Energia), 12 (Consumo e produzione responsabili), 13 (Cambiamento climatico) e 15 (Vita sulla Terra). Nello studio di Parvathy et alii (2025) gli SDG 8 e 12 emergono come obiettivi chiave per il settore edilizio e riflettono un interesse crescente per le tecniche costruttive e i materiali sostenibili. Sull'esempio di Belmonte-Ureña et alii (2021) e UNEP (2020) sono stati classificati gli indicatori LCA, LCC e S-LCA rispetto agli SDG coerenti con il tema delle fibre naturali in architettura (Tab. 3). In base a tale classificazione, gli SDG selezionati sono stati raggruppati (Fig. 11) secondo una dimensione ambientale (SDG 3, 6, 7, 11, 12, 13, 14 e 15), una dimensione economica (SDG 8) e una dimensione sociale (SDG 1, 2, 3, 8, 11 e 12).

Conclusioni | Questo studio si è focalizzato sull'analisi dello stato dell'arte dei metodi di valutazione della sostenibilità ambientale, economica e sociale applicati alle fibre naturali, esaminando in particolare la potenzialità degli approcci LCA, LCC e S-LCA come strumenti per promuovere processi produttivi circolari tra il settore agricolo e quello edilizio. I risultati della revisione sistematica condotta hanno evidenziato che la valutazione della sostenibilità delle fibre naturali nel settore delle costruzioni è un tema ampiamente presente in letteratura e in linea con gli obiettivi europei. Riprendendo le domande di ricerca alla base dello studio si possono tuttavia evidenziare alcuni limiti al potenziale raggiungimento di alcuni SDG dell'Agenda 2030. Il primo riguarda l'applicazione dei metodi di valutazione della sostenibilità ambientale, sociale ed economica: nonostante le tre dimensioni della sostenibilità rientrino tra le priorità delle politiche nazionali e internazionali, spesso non si riscontra un effettivo allineamento con metriche e strumenti normativi; inoltre emerge come la maggior parte degli studi si concentri principalmente sulla dimensione ambientale, mentre solo una parte integra analisi di tipo economico e un numero ancora più limitato considera anche la dimensione sociale (Martínez and Miller, 2025).

Un secondo limite è legato alla scarsa considerazione degli aspetti relativi al reperimento delle fibre naturali e al loro smaltimento a fine vita. Gli studi di LCA presi in esame sono prevalentemente 'dalla culla al cancello' e non considerano tutte le fasi del ciclo vita, in particolare quelle relative alla coltivazione delle piante e allo smaltimento dei materiali, che risultano invece rilevanti per i materiali biogenici in relazione all'assorbimento di anidride carbonica, alle emissioni dei trasporti e al successivo rilascio di CO_2 e di altre sostanze incorporate nelle fibre.

Dall'analisi complessiva emergono tre elementi principali che evidenziano come l'applicazione delle metodologie basate sul ciclo vita possa favorire lo sviluppo di processi produttivi circolari tra il settore agricolo e quello edilizio.

In primo luogo l'interesse della comunità scientifica si sta orientando sempre di più verso la valutazione dell'impiego degli scarti del riso (18%) e del mais (8%) – tra le colture più diffuse in Italia e a livello globale – insieme a canapa (12%), bambù (4%) e altre fibre naturali per applicazioni nel settore delle costruzioni. Tale orientamento riflette una crescente sinergia tra i settori dell'agricoltura e dell'architettura, con potenziali benefici per le filiere agricole locali e prospettive di sviluppo in ambito europeo, in coerenza con gli obiettivi del progetto PNRR MICS (Made in Italy Circolare e Sostenibile).

In secondo luogo l'impiego di fibre naturali in edilizia, in particolare nei prodotti cementizi e nei materiali per l'isolamento termo-acustico, assume un ruolo strategico nel raggiungimento degli obiettivi europei di decarbonizzazione e sostenibilità (Mouton, Allacker and Röck, 2023). Tale approccio è rappresentato da alcuni elementi chiave, tra cui: la riduzione dello smaltimento dei rifiuti agricoli, spesso bruciati o abbandonati in campo; la diminuzione degli impatti ambientali nella fase di produzione dei materiali da costruzione e di conseguenza della domanda di nuove materie prime da estrarre; la riduzione delle emissioni di gas climalteranti durante la fase d'uso degli edifici grazie al miglioramento dell'isolamento termico dell'involucro; la possibilità di stoccare CO_2 all'interno delle costruzioni per periodi prolungati (30-50 anni) attraverso l'impiego di materiali edilizi di origine biogenica.

In ultimo l'integrazione tra metodi di valutazione complessi (Sposito and De Giovanni 2023) e la correlazione tra indicatori di sostenibilità in ottica di ciclo vita ed SDG (Backes and Traverso, 2022) risulta rilevante in particolare per gli indicatori di impatto ambientale, in stretta sinergia con gli obiettivi 6, 7, 12 e 13 e per gli indicatori di impatto sociale con forti connessioni con 14 SDG su 17. La ricerca evidenzia benefici concreti in termini di riduzione dell'impatto ambientale e di valorizzazione delle risorse locali in termini economico-finanziari, ma anche potenziali compromessi, ad esempio tra SDG 8 (Crescita economica) e SDG 13 (Azione per il clima).

L'implementazione di studi integrati in ottica Life Cycle Thinking (LCA, LCC, S-LCA e LCSA) potrebbe contribuire in modo sostanziale al raggiungimento dei target dell'Agenda 2030, consentendo di quantificare e misurare il grado di sostenibilità di un materiale, di un processo o di un edificio nel suo complesso. In conclusione si invita la comunità scientifica a promuovere e incentivare approcci interdisciplinari, a condividere banche dati aperte e a validare metriche e strumenti normativi comuni per la valutazione integrata della sostenibilità dei materiali biogenici o a base biologica, in quanto tali azioni risultano fondamentali per consolidare un linguaggio condiviso tra discipline e accelerare la transizione verso sistemi produttivi circolari e sostenibili, nei quali lo scarto di una filiera può acquisire valore ambientale, economico e sociale per altre.

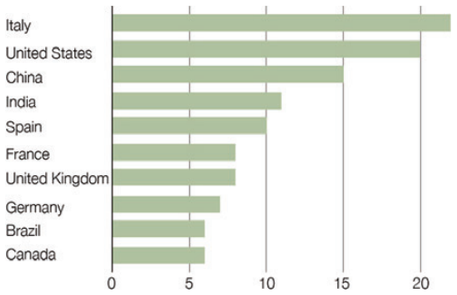


Fig. 5 | Records by country related to the screening phase; n. 142 records found on 8/8/2025 (credit: the Authors, 2025).

In recent years, the increasing recognition of environmental and socio-economic impacts within architecture and design has intensified scholarly and professional interest in bio-based materials. Within this framework, plant fibres exhibit considerable potential for incorporation into construction products and processes, owing to their renewable nature and generally limited ecological footprint (Carcassi et alii, 2022). These considerations closely align with the Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda, specifically SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 7 (Affordable and Clean Energy), SDG 13 (Climate Action), and SDG 8 (Decent Work and Economic Growth). The adoption of bio-based materials entails implications for water resource consumption, embodied energy and carbon across the life cycle of these materials, as well as for advancing sustainable supply chains (Schroeder, Anggraeni and Weber, 2019; Cosentino, Fernandes and Mateus, 2024; Morpurgo, 2024). SDG 8, in particular, calls for enhanced efficiency in the global use of resources and seeks to decouple economic growth from environmental degradation (UN, 2015).

In the construction sector, achieving sustainability objectives requires rethinking production, design, and construction processes, as well as adopting a systemic approach grounded in the three dimensions of sustainability and the principles of the circular economy (Le et alii, 2025; Kayaçetin, Piccardo and Versele, 2023). This aim also underpins the 'Circular Design for Natural Fibres' project within PNRR MICS (Made in Italy – Circolare e Sostenibile), which seeks to valorise recovered or underused natural fibres, also in collaboration with local communities, in order to create more resilient and sustainable supply chains. Within this project, the article presents the state of the art in the scientific lit-

erature by examining two strategic economic sectors for Europe, agriculture and construction, to explore their interactions, potential, and limitations in meeting sustainability goals.

In particular, the systematic review (Page et alii, 2021; Littell, Corcoran and Pillai, 2008) addresses the following research questions: What is the state of the art in methods for assessing environmental, social and economic sustainability in relation to natural fibres? Can life-cycle-based sustainability approaches – Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Costing (LCC) and Social Life Cycle Assessment (S-LCA) – support the development of circular production processes in both the agricultural and construction sectors? Which impact indicators are most relevant for evaluating natural fibres so as to stimulate new production chains aligned with the SDGs?

Building on a scientific framing of the topic, the article is organised as follows: it sets out the methodology adopted and the limitations of the study; presents the main results of the systematic review; offers three critical discussion sections on the themes identified in the research questions; and concludes with a final section. The aim is to provide a reference framework for the scientific community on sustainability assessment in relation to natural fibres for architecture and design. The systematic analysis constitutes a structured review of the existing literature that seeks to synthesise the best available evidence to answer a specific research question and facilitate broad dissemination of the results (Zumsteg, Cooper and Noon, 2012).

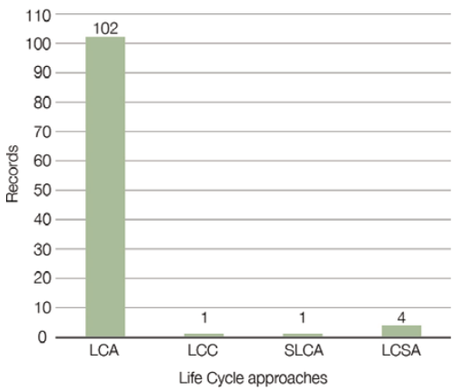
The findings indicate that, among the numerous case studies identified, LCA is the most widely used approach, LCC is generally coupled with LCA, and S-LCA is only rarely applied. The most frequently investigated fibres are rice-cultivation residues in biocements, hemp in thermal-insulating envelopes, and corncob in biofuels. The conclusions underline the importance of promoting integration among life-cycle-based assessment tools (Dace et alii, 2024) to reconcile environmental quality, social equity and responsibility, and economic impact in the construction sector, thereby contributing to a circular production model consistent with SDG 8.

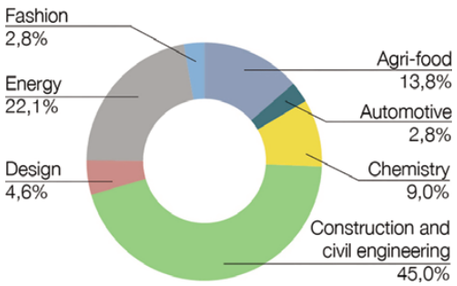
Scientific background and contribution originality | Over the past fifty years, global material extraction has more than tripled, surpassing 100 billion tonnes per year (Circle Economy, 2025), of which 60% is destined for civil engineering and construction (Zabalza Bribiàn, Valero Capilla and Aranda Usón, 2011). The extraction of materials and their subsequent use are responsible for roughly two-thirds of global greenhouse gas emissions and over 90% of biodiversity loss and water stress (International Resource Panel, 2024). The production of construction materials also accounts for more than 80% of the total energy consumption of the building process (Zhang et alii, 2019), with a substantial impact on embodied energy and emissions (Piccardo et alii, 2020). Design choices, therefore, constitute critical junctures at which not only aesthetic and functional qualities are determined, but also the environmental, social and economic impacts of an artefact across its entire life cycle (Mesa, Esparragoza and Maury, 2018; Singh and Ordoñez, 2016). In this context, the circular economy, being grounded in principles of waste prevention, industrial symbiosis, and designing out waste, provides the guiding paradigm for reducing dependence on primary resources and promoting regenerative models (McDonough and Braungart, 2002; Bocken et alii, 2016; Ferrara and Squatrito, 2022).

The circular economy has been institutionalised at the European level through the Circular Economy Action Plan (European Commission, 2020), the Green Deal (European Commission, 2019), and the New European Bauhaus (European Commission, 2021, 2023), which identify the construction sector as a priority area for intervention. The consolidated methodological framework of LCA supports these strategies, codified in 2006 by UNI EN ISO 14040 and 14044 and updated in 2021, and complemented by UNI EN 15978:2011 and UNI EN 15804:2021. Together, these standards enable the assessment of the environmental impacts of products and services and the verification of the effectiveness of the measures proposed by the 2030 Agenda and incorporated into European plans (Backes and Traverso, 2022; Giordano and Andreotti, 2023).

To support Life Cycle Assessment, various authors recognise the need to integrate Life Cycle Costing (ISO 15686:2017) for life-cycle cost evaluation, and Social Life Cycle Assessment, developed according to the UNEP / SETAC (2009) and UNEP (2020) guidelines (Fig. 1). The integration of these three methodologies within Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) is central to several European programmes, such as Level(s) and Orienting (2020-2024), which foster the development of methods and indicators to facilitate adoption by companies, or-

Social, Economic and Environmental	**Construction** Garas et alii, 2021	**Chemistry** Schonhoff et alii, 2021	**Fuel** Kristianto and Zhu, 2018; Kristianto, 2017
Economic and Environmental	**Construction** Chipade et alii, 2025; Khan and Ali, 2020; Fernando et alii,2021; Komkova and Habert, 2023; Martínez and Miller, 2025; Ondova et alii, 2013; Paul et alii, 2023; Poolsawad et alii, 2023;	**Chemistry** Schonhoff et alii, 2023 **Food** Arias et alii, 2023; Hartini et alii, 2023 **Agriculture** Alderkamp et alii, 2025; Pinelli et alii, 2020	**Fuel** Bartocci, 2020; Cortes-Peña, 2020; Garkoti and Thengane, 2025 **Design** García-Velásquez, 2022; Sifuentes-Nieves, 2023
Social	**Food** Mancini et alii, 2023;		
Economic	**Construction** Gounni et alii, 2019		
Environmental	**Construction** Araujo et alii, 2022; Aversa et alii, 2019; Babenko et alii, 2025; Baul et alii, 2024; Béjat et alii, 2025; Bošković and Radivojević, 2023; Botejara-Antúnez et alii, 2023; Buratti et alii, 2018; Caldarelli et alii, 2022; Cucchiella et alii, 2024; Dotelli et alii, 2020; Essaghouri et alii, 2023; Giuffrida et alii, 2024; Gursel et alii, 2016; Isopescu et alii, 2024; Kena et alii, 2022; Komkova and Habert, 2023; Liikanen et alii; 2017; Mendes Moraesa et alii, 2010; Pennacchio et alii, 2017; Pittau et alii, 2021; Quintana-Galardo et alii, 2021; Ricciardi et alii 2021; Salzer et alii, 2017; Seyedabadi et alii, 2023; Sinka et alii, 2020; Sprenger et alii, 2025; Yu et alii, 2011; Nishioka et alii, 2005; Oneylowe et alii, 2022; Quintana-Gallardo et alii, 2020; Romos et alii, 2021; Sheshadri et alii, 2024; Soleimani et alii, 2017; Vilaboa Dìaz, 2022; Wener et alii 2005; Yang et alii, 2024	**Chemistry** Bose et alii, 2020; Lammens et alii, 2011; Loya.Gonzàles et alii, 2019; Miller et alii, 2013; Nadeem et alii, 2024; Nascimento et alii, 2016; Samanta and Chakraborty, 2023; Sendão et alii, 2025 **Food** Arias et alii, 2021; Costa et alii, 2024; Hatcho et alii, 2012; Le Rose et alii, 2025; Jesewani et alii, 2015; Safaripour et alii, 2021; Sulistyo et alii, 2024 **Fashion** Duranti et alii, 2024; Hilderbrandt et alii, 2021; Yavuzkasap Ayakta et alii, 2024 **Design** Chen et alii, 2023; Enarevba et alii, 2023; Mirabella et alii, 2013	**Fuel** Akbarian-Saravi et alii, 2025; Belaud et alii, 2019; Càrdenas-Fernàndez et alii, 2017; Chum et alii, 2014; Gerrior et alii, 2022; Karlsdòttir et alii, 2015; Kowalski et alii, 2011; McKechnie et alii, 2015; Nguyen et alii, 2019; Oradhan et alii, 2022; Rashif et alii, 2025; Rathnayake et alii, 2018; Samanta and Chakraborty, 2024; Schoen and Bagley, 2012; Sengupta et alii, 2025; Sharara et alii, 2020; Sperandio et alii, 2021; Suhartono et alii, 2018; Urban Cordeiro et alii, 2024 **Agriculture** Frischknecht et alii 2016; Prioux et alii, 2023; Scrucca et alii, 2020





Tab. 1 | Classification of selected studies by Life Cycle approach and application sector related to screening phase (credit: the Authors, 2025).

Fig. 6 | Distribution of selected studies by Life Cycle approaches related to n. 108 records found on 8/8/2025 (credit: the Authors, 2025).

Fig. 7 | Distribution of selected studies by sector related to n. 108 records found on 8/8/2025 (credit: the Authors, 2025).

ganisations and researchers, with particular attention to SMEs operating across different sectors.

Within this framework, bio-based materials are defined in UNI EN 16575:2014 as 'materials wholly or partly derived from biomass, i.e., material of biological origin, excluding fossil sources contained in the geosphere' (EN 16575:2014 point 2.1) and assume particular relevance. Within this category, natural fibres constitute a strategic resource for sustainable architecture (Thiébat and Morselli, 2025), encompassing plant-derived materials characterised by short growth cycles, wide availability and carbon-sequestration capacity.

Beyond reducing embodied energy and emissions, natural fibres are notable for their suitability for inter-sectoral circularity processes, in which agricultural residues or agri-food by-products can be converted into panels or building components with neutral or negative carbon balances (Göswein et alii, 2022). Recent research further indicates that designing with natural fibres addresses not only performance criteria but also integrates environmental, economic and social assessments, thereby broadening application opportunities in architecture and design (Violano, Cannaviello and Del Prete, 2021; Sposito and Scalisi, 2023; Mouton, Allacker and Röck, 2023).

Reviews addressing the three dimensions of sustainability and the circularity of bio-materials for construction remain relatively limited. Among them, Le, Salomone and Nguyen (2024) critically examine the methods used to evaluate the sustainability dimensions of building solutions based on biogenic materials, while the state-of-the-art analysis conducted by Rigillo et alii (2023) highlights how the relationship between digital tools and circularity is still underexplored within the European Union, particularly in the disciplines of Architecture. In this context, the originality of the present contribution lies in providing an up-to-date framework on the use of natural fibres in the construction sector, relating circular supply chains and production processes to life-cycle approaches and analysing their connections with the SDGs.

Methodology and research limitations | The literature review was conducted following the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) guidelines, developed by Moher et alii in 2009 and updated in 2021 (Page et alii, 2021). PRISMA comprises four phases and includes a checklist for identifying relevant studies, along with a 'flow diagram'. The review was therefore carried out in accordance with the phases outlined below.

Phase 1) Formulation of the research questions and definition of the search queries. The first phase drew on the objectives and questions set out in the introduction to identify the search keywords. The query (Fig. 2) focused on three groups of keywords relating to: natural fibres, with an emphasis on virgin or waste fibres cultivated in Italy; life-cycle-oriented assessment approaches that address the three dimensions of sustainability; and circular supply chains and production processes. A second query narrowed the previous search to the fields of architecture and design. Boolean operators 'AND' and 'OR' were used to refine the search.

Phase 2) Sampling procedures. The second phase involved selecting studies based on inclusion and exclusion criteria applied to the Scopus database; it was conducted on 18 April 2025 and repeated on 8 August 2025 to verify and update the results. Resources that were not readily accessible online (books and book chapters) and/or not in English were excluded.

Phase 3) Data collection, analysis and synthesis. In this phase, data were extracted from the selected studies, then analysed and synthesised systematically. The content was examined through a qualitative analysis of the bibliographic sources, based on information contained in the title, abstract and keywords. Review articles and other inaccessible resources were excluded. For each selected article, the following elements were extracted and processed in spreadsheets: type of bibliographic resource; year of publication; life-cycle approach (LCA, LCC, S-LCA, LCSA); reference supply chain; object of study; type of natural fibre; and origin of the fibre (virgin or by-product / waste).

Phase 4) Interpretation of results. The final phase offered a critical examination of the themes identified in the research questions.

One limitation of the study lies in the rate at which review results may change. Current interest in sustainability topics is associated with a rapid increase in scientific output. However, adopting a systematic approach enables the review to be replicated and updated over time, thereby mitigating this issue. In Figure 2, the most recent values are shown in parentheses. A further limitation concerns access to bibliographic resources: the review may be partial because books and other non-open-access ma-

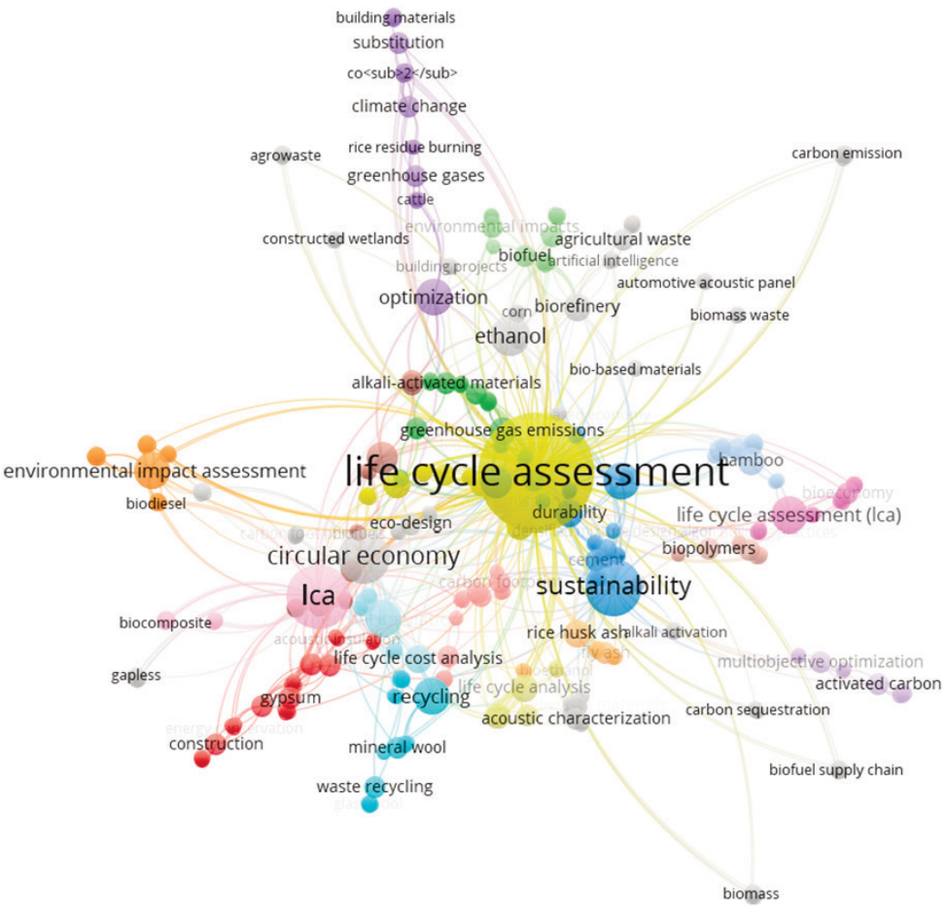


Fig. 8 | Keywords mapping performed by VOSviewer version 1.6.20 developed by Leiden University and related to 108 records found on 8/8/2025 (credit: the Authors, 2025).



Fig. 9 | Analysis of natural fibres by types and origins related to n. 108 records found on 8/8/2025: percentages relating to the most investigated fibres in applications in the energy and construction sectors (credit: the Authors, 2025).

	Composite materials	Concrete / mortar & plaster	Mansonery	Panels	Other construction materials	Packaging product
Bamboo		Araujo et alii, 2022			Yu et alii, 2011; Yang et alii, 2024; Salzer et alii, 2017; Chipade et alii, 2025	Chen et alii, 2023
Bio-fibers mix				Quintana-Gallardo et alii, 2020	Keena et alii, 2022; Seyedabadi et alii, 2023	Sifuentes-Nieves et alii, 2023
Coconut					Salzer et alii, 2017	
Coffee chaff				Ricciardi et alii, 2021; Buratti et alii, 2018		
Cork				Giuffrida et alii, 2024; Ricciardi et alii, 2021; Buratti et alii, 2018		
Corncob				Ramos et alii, 2021		
Flax	Sprenger et alii, 2025					
Hemp	Sinka et alii, 2020; Sprenger et alii, 2025	Bošković and Radivojević, 2023	Aversa et alii, 2019; Isopescu et alii, 2024; Dotelli et alii, 2020; Vilaboa Díaz et alii, 2022	Cucchiella et alii, 2024; Essaghouri et alii, 2023; Pittau et alii, 2020; Pennacchio et alii, 2017; Giuffrida et alii, 2024	Scrucca et alii, 2020; Chipade et alii, 2025	
Kenaf	Sprenger et alii, 2025					
Mycelium				Babenko et alii, 2025	Chipade et alii, 2025	
Rice husk		Khan and Ali, 2020		Ricciardi et alii, 2021; Buratti et alii, 2018		
Rice husk ash		Fernando et alii,2021; Garas et alii, 2021; Gursel et alii, 2016; Martínez and Miller, 2025; Mendes Moraesa et alii, 2010; Onyelowe et alii, 2022; Paul et alii, 2023; Sheshadri et alii, 2024; Soleimani et alii, 2017				
Rice straw				Quintana-Gallardo et alii, 2021		
Sheep wool				Pennacchio et alii, 2017; Quintana-Gallardo et alii, 2020		
Sisal	Sprenger et alii, 2025					
Sugar beet						García-Velásquez et alii, 2022
Sugar cane		Khan and Ali, 2020				
Textile waste				Gounni et alii, 2019		
Wheat straw			Vilaboa Díaz et alii, 2022			García-Velásquez et alii, 2022
Wheat bran				Safaripour et alii, 2021		
Wood waste					Poolsawad et alii, 2023	

Tab. 2 | Analysis of natural fibres by types and origins related to n. 43 records found on 8/8/2025: most investigated fibres in energy and construction applications (credit: the Authors, 2025).

terials were excluded, as they are often not readily consultable. Finally, a further constraint may be the lack of standardised nomenclature, which could have led to a partial keyword search. The same issue emerged in interpreting the results, where similar acronyms and impact indicators can create ambiguity in reading the findings.

Results | From the initial query, 785 publications were identified for the period 2005-2025 (Fig. 3). Following the screening phase, 108 records were retained, comprising journal articles and conference proceedings (Fig. 4). A rising trend in publication volume is evident from 2009, with a marked increase from 2020 and a predominance of contributions from the Italian context (Fig. 5). These findings confirm growing interest in sustainability and decarbonisation, catalysed by Agenda 2030 and the European Green Deal. However, out of the 108 studies, only 4 consider all three dimensions of sustainability; 18 address both environmental and economic aspects. Among the articles that focus on a single dimension (Tab. 1), 102 LCA studies dominate in comparison to an LCC study and an S-LCA study (Fig. 6). The search queries indicate that the most-cited papers on Scopus are those by Gursel, Maryman and Ostertag (2016), Belaud et alii (2019), Yu, Tan and Ruan (2011), and Buratti et alii (2018), which primarily assess the environmental dimension, and Fernando et alii (2021), which jointly addresses environmental and economic dimensions.

Additionally, based on information in the titles, abstracts and keywords, a qualitative analysis indicates that the LCA, LCC and S-LCA approaches applied to the construction sector have repercussions across several production domains, such as building and civil engineering for 45%, energy (biofuels) for 22%, agri-food for 13.8%, chemicals for 9%, design for 4.6%, automotive for 2.8% and clothing for 2.8% (Fig. 7). To facilitate the interpretation of the results, a graphical analysis was performed using the VOSviewer software, developed by Leiden University, on 108 articles, as illustrated in Figure 8.

Examining the type and origin of the natural fibres discussed in the articles reveals a predominance of residues from the rice value chain (18%), followed by hemp (12%) and corn (8%), and other fibres at around 4%, including bamboo, wood waste and sheep wool (Fig. 9). The results suggest that residues from the cultivation of rice and corn, which are among the most widespread crops globally, are widely analysed, particularly for biofuels (corncob) and construction products (rice husk and rice straw).

A subsequent in-depth review of 43 case studies in the fields of building, civil engineering and design (Tab. 2) identified the most widespread natural fibres and their applications in construction, such as bio-composites, packaging materials, cement-based products, masonry elements and envelope panels (Fig. 10). The most extensively analysed fibres are residues from rice cultivation, used mainly in cementitious products and insulating materials; hemp, used in bio-composites, masonry components and thermal insulation panels; and bamboo, at building scale and in packaging.

The literature review shows that sustainability assessment indicators for natural fibres (Tab. 3) focus primarily on CO_{2eq}-related metrics (GWP, EC, CF, GHG, CO_2), cumulative energy demand (CED, OE, EE, OC), water use (i.e., WF, water consumption / use), acidification potential, eutrophication potential, land use, human toxicity, and, finally, CO_2 uptake and storage. Economic indicators include 'payback period' and 'net present value', while the PSILCA database, comprising 34 indicators, was used as a reference for social indicators.

From the results, three main areas of discussion emerged regarding the research questions: the integration of life-cycle approaches; the relationship between supply chains and circular production processes; and connections to the SDGs.

Potential and limitations of integrating LCA, LCC and S-LCA approaches | The limited presence of the social and economic dimensions observed in the results may be attributable to the fact that most studies focus on the experimental use of natural fibres. Studies that address the integration of life-cycle approaches exhibit two methodological orientations: integrating sustainability dimensions within a single analytical framework, and developing assessments independently, followed by a comparison of results.

Combined approaches (Kristianto and Zhu, 2017; Hartini et alii, 2023; Arias et alii, 2024; Alderkamp et alii, 2025; Garkoti and Thengane, 2025; Komkova and Habert, 2023; Sifuentes-Nieves et alii, 2023; García-Velásquez, Leduc and van der Meer, 2022) show critical relationships between economic outcomes and environmental impacts, thereby offering a valuable contribution to policy-making and to the sustainable planning of production supply chains. However, these contributions remain confined mainly to theoretical analyses or simulation-based models predominantly in the food, biofuel and construction sectors, and do not systematically integrate the economic and environmental dimensions, nor do they include the social dimension.

Parallel approaches (Bartocci et alii, 2020; Cortés-Peña et alii, 2020; Pinelli et alii, 2020; Schonhoff et alii, 2023; Fernando et alii, 2021; Martínez and Miller, 2025; Paul, Islam and Elahi, 2023; Khan and Ali, 2019; Garas, Sayed and Bakhoum, 2021; Ondova, Stevulova and Meciarova, 2013; Gounni et alii, 2019) are applied predominantly to the construction sector. In these studies, LCA and LCC are conducted separately and subsequently compared, with the advantage of greater methodological clarity. The studies frequently report environmental benefits in terms of reduced CO_2 emissions, while highlighting limitations such as high costs, dependence on local resource availability, and the restricted consideration of impacts other than climate change (Bartocci et alii, 2020; Paul, Islam and Elahi, 202; Khan and Ali, 2019).

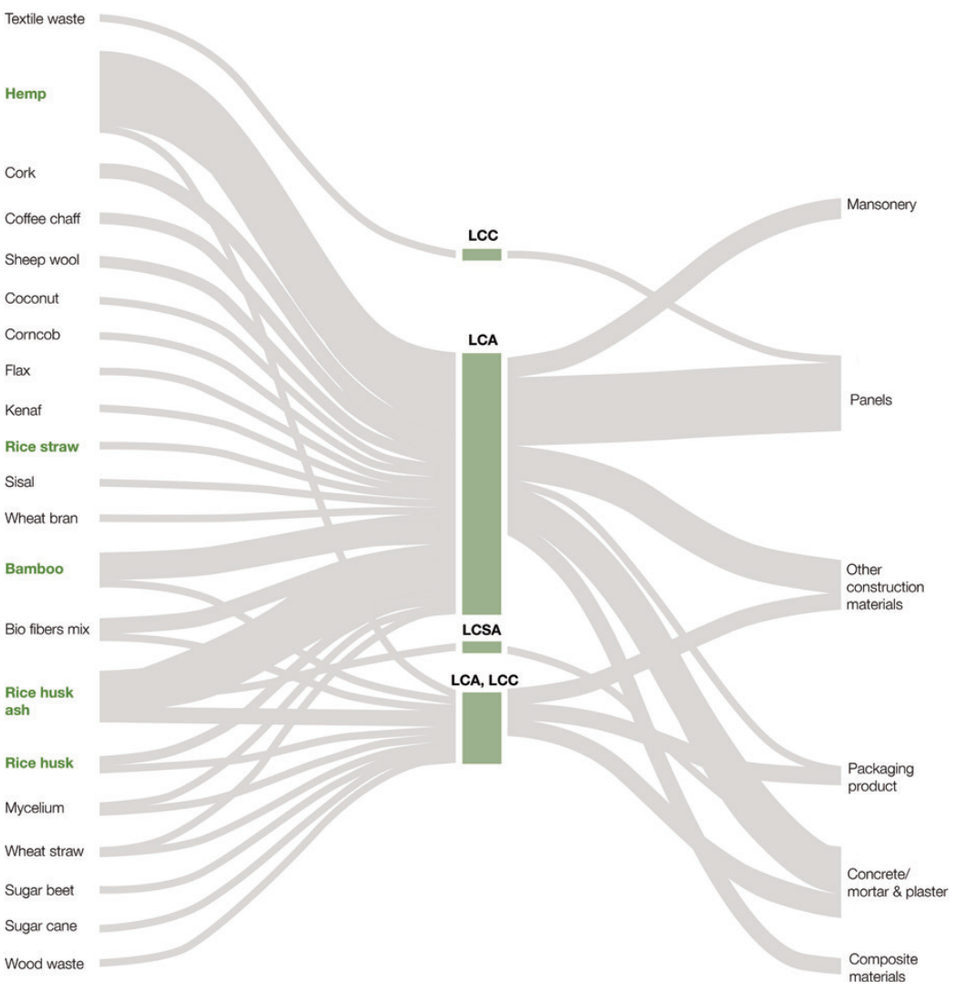


Fig. 10 | Analysis of natural fibres by types and origins related to n. 43 records found on 8/8/2025: most investigated fibres in energy and construction applications using life-cycle approaches (credit: the Authors, 2025).

Another contribution is that of Mancini et alii (2023), which addresses S-LCA exclusively and proposes an assessment of the social impacts of 44 representative food products in the European context: unlike environmental impacts, social risks are high in fruit, vegetable, and rice cultivation. Although the study is relevant from a policy perspective, it does not integrate the environmental and economic dimensions, thus limiting its applicability.

LCA studies in the construction sector primarily focus on comparative assessments to develop new, non-conventional materials, with results that generally do not include environmental impacts during use and at the end of life. Some authors attempt to incorporate the use phase by normalising environmental results to mechanical performance (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016; Isopescu et alii, 2024; Sprenger et alii, 2025; Sinka et alii, 2020), hygrothermal performance (Aversa et alii, 2019; Dotelli et alii, 2020) and physico-technical performance (Buratti et alii, 2018; Ricciardi et alii, 2021), or by comparing mixtures at equal mechanical performance (Soleimani and Shahandashti, 2017; Martìnez and Miller, 2025; Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024).

Only a subset of studies expands the system boundary to the entire life cycle, 'cradle-to-grave' (Seyedabadi, Abolhassani and Eicker, 2023; Keena et alii, 2022; Ramos et alii, 2021; Giuffrida et alii, 2024) or 'cradle-to-cradle' (Salzer et alii, 2017), thereby highlighting the potential and limitations of using agri-food residues in construction and design. Other research identifies the capacity of fibres to absorb carbon during plant growth (Giuffrida et alii, 2024) and thus to act as a CO_2 storage pool during the use phase.

However, the identified LCA studies are static and do not account for temporal dynamics associated with differing carbon uptake and release rates, nor for effects linked to the lag between sequestration and emission (Keena et alii, 2022). Some authors emphasise that, although biomaterials constitute a renewable alternative to conventional materials, their use entails inherent risks; for example, changes in land use may lead to deforestation and the loss of local biodiversity (Keena et alii, 2017).

In the sustainability assessment of waste-derived materials, the contribution is linked to transport impacts, which are of considerable importance. In geographical areas such as the United States (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016), Canada (Keena et alii, 2022), South-East Asia (Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024) and Europe (Cucchiella et alii, 2024), where road distances are substantial, transport constitutes a significant share of emissions; for this reason, the use of locally available materials remains the most sustainable option (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016). In this regard, some studies have undertaken sensitivity analyses to evaluate differences in environmental results by increasing and decreasing the kilometres attributed (Soleimani and Shahandashti, 2017; Araujo et alii, 2022).

Similarly, the transformation of agricultural residues often entails processes that require high energy inputs, such as grinding (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016; Martìnez and Miller, 2025) and extrusion (Cucchiella et alii, 2024). Moreover, the use of plant fibres, such as hemp, straw and olive stone, for the production of bricks, cementitious products or plasters, generally reduces environmental impacts but also compromises their mechanical properties, particularly compressive strength and durability (Vilaboa Dìaz, López and Bugallo, 2022). Some

Authors	Indicators	SDGs	Methods	Tools
Quintana-Guallardo et alii,2020; Salzer et alii, 2017; Buratti et alii, 2018; Keena et alii, 2017; Salzer et alii, 2022; Vilaboa Dìaz et alii, 2022; Sprenger et alii, 2025; Buratti et alii, 2018; Sinka et alii, 2020; Giuffrida et alii, 2024; Cucchiella et alii, 2024; Essaghouri et alii, 2023; Yu et alii, 2011; Kristianto e Zhu, 2018; Khan e Ali, 2019; Bartocci et alii, 2020; Pinelli et alii, 2020; Garas et alii, 2021; Ramos et alii, 2021; Ricciardi et alii, 2021; Araujo et alii, 2022; García-Velásquez et alii, 2022; Onyelowe et alii, 2022; Hartini et alii, 2023; Komkova and Habert, 2023; Paul et alii, 2023; Schonhoff et alii, 2023; Schonhoff et alii, 2023; Seyedabadi et alii, 2023; Sifuentes-Nieves et alii, 2023; Baul et alii, 2024; Sheshadri et alii, 2024; Babenko et alii, 2025; Garkoti and Thengane, 2025; Martínez and Miller, 2025; Yang et alii, 2024; Arias et alii, 2024	CO_2 emissions; GWP; GWP100; Climate change; GHG emissions; Carbon footprint; CO_{2eq} [Kg CO_{2eq}]	7, 11, 12, 13,15	IPCC CML-IA ReCiPe 2016 (midponit) ILCD 2011 (midpoint) MCDA N/a	SimaPro 8 Gabi SimaPro 9.3 SimaPro 9.2.0.2 Open LCA
Giuffrida et alii, 2024; Araujo et alii, 2022	CO_2 UPTAKE Carbon storage	13, 15	CML-IA	SimaPro 9.3
Pennacchio et alii 2017; Salzer et alii, 2017; Buratti et alii, 2018; Keena et alii, 2017; Salzer et alii, 2022; Vilaboa Dìaz et alii, 2022; Buratti et alii, 2018; Giuffrida et alii, 2024; Yu et alii, 2011; Kristianto and Zhu, 2018; Sheshadri et alii, 2024; Babenko et alii, 2025; Chipade et alii, 2025; Ricciardi et alii, 2021; Yang et alii, 2024; Cucchiella et alii, 2024; Essaghouri et alii, 2023; Seyedabadi et alii,2023	Cumulative Energy Demand; EE and OE [MJ/UF]	7, 11, 12, 13	CED EN 15804 + A2 N/a	SimaPro 8 SimaPro 9.3 SimaPro 9.2.0.2
Pennacchio et alii 2017; Vilaboa Dìaz et alii, 2022; Sprenger et alii, 2025; Keena et alii 2022	Non-renewable Energy [MJ/UF]	7, 12	N/a	N/a
Keena et alii, 2022; Sprenger et alii, 2025, Babenko et alii, 2025; Safaripour et alii, 2021	Acidification potential	6, 13	N/a	
Keena et alii, 2022; Sprenger et alii, 2025; Safaripour et alii, 2021; Chen et alii, 2023	Eutrophication potential	6, 13	N/a	
Keena et alii, 2022; Sprenger et alii, 2025; Sifuentes-Nieves et alii, 2023	Land use	12, 13, 15	N/a	
Sprenger et alii, 2025	Photochemical ozone formation	13	N/a	
Sifuentes-Nieves et alii, 2023; Safaripour et alii, 2021; Chen et alii, 2023	Ozone depletion	12, 13	N/a	
Soleimani and Shahandashti, 2017; Vilaboa Dìaz et alii, 2022; Sprenger et alii, 2025; Sifuentes-Nieves et alii, 2023	Water consumption	6	TRACI	Gabi
Giuffrida et alii, 2024	Water footprint	6	TRACI	AWARE
Babenko et alii, 2025; Chen et alii, 2023	Human toxicity	3		
Chen at alii, 2023	Marine aquatic ecotoxicity	6, 14	Eco indicator 99, CML	SimaPro 9.0, Gabi
Gounni et alii, 2019; Arias et alii, 2024; Garkoti e Thengane, 2025	Pay Back Period, Net Present Value	8		GaBi 10.7.0.183
Schonhoff et alii, 2023; Mancini et alii, 2023	Gender wage gap; 14 impact subcategories (34 PSILCA indicators)	1, 2, 3, 8, 11, 12	PSILCA	

Tab. 3 | Classification of selected SDGs according to environmental, economic, and social dimensions and correlation between sustainability Life Cycle indicators (credit: the Authors, 2025).

authors have conducted the Life-Cycle Inventory (LCI) based on primary data (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016; Soleimani and Shahandashti, 2017), while others rely on data drawn from the literature and databases (Onyelowe et alii, 2022; Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024; Martínez and Miller, 2025) or from Environmental Product Declarations (EPD; Aversa et alii, 2019; Dotelli et alii, 2020), omitting information such as the provenance of the natural fibres and of the incineration process, transport, and the national reference energy mix.

Interactions between agriculture, architecture and design from a circular perspective | The results confirm strong interest in promoting synergies with the agricultural and industrial sectors to support the transition towards a circular economy and the decarbonisation of the built environment.

With regard to rice residues, although few studies report information on the availability of the plant fibre, FAO data indicate that rice is the third most cultivated food product, at 740 million tonnes per annum (Buratti et alii, 2018), and that, worldwide, 156 million tonnes of rice husk are disposed of annually (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016). In India, the second-largest rice producer globally, cultivation residues are typically burned, contributing to critically high PM2.5 emissions; only 1% of rice husk ash (RHA) is utilised, while millions of tonnes are landfilled (Sheshadri, Marathe and Sadowski, 2024).

In building and civil engineering applications, the use of supplementary cementitious materials (SCMs) in concrete and cement mixes is becoming increasingly widespread to reduce or eliminate clinker (Martínez and Miller, 2025). Among SCMs, ashes from the energy recovery of agricultural residues, particularly RHA, are increasingly used to produce bio-cements, as they enhance the environmental, mechanical, and durability properties of concrete and allow up to 30-40% substitution for Portland cement (Gursel, Maryman and Ostertag, 2016).

The LCA studies reviewed focus primarily on the impacts of transport (pollutants), emissions during cement firing and incineration of the plant fraction (greenhouse gases and pollutants), primary energy for processing, and water consumption for quarrying operations. The results of the Life Cycle Impact Assessment phase (LCIA; ISO 14040:2021) indicate the greater sustainability of RHA-based bio-cements, including when combined with other SCMs: the GWP and GHG indicator ranges from 284 to 329 kg CO_2 per cubic metre for mixes with RHA. It falls to 194 kg CO_2 per cubic metre for RHA with geopolymers, compared with 369-544 kg CO_2 per cubic metre for conventional cement (Martínez and Miller, 2025).

Beyond binders, residues from rice cultivation, particularly husk and straw, are used to produce thermal insulation panels, also in combination with other fibres (Quintana-Gallardo et alii, 2021). On the basis of primary data, Buratti et alii (2018) and Ricciardi et alii (2021) compared the environmental, thermal and acoustic performance of insulation samples made from rice husk, other biogenic resources and waste materials. Using a 'cradle to gate' LCA approach, they reported the lowest emission values for rice husk panels (1.11 kg CO_{2eq} per square metre), coffee chaff panels (0.56 kg CO_{2eq} per square metre), and a mix of 20% husk, 60% recycled cork and 20% coffee chaff (1.83 kg CO_{2eq} per square metre). It should be noted, however, that these values exclude the cultivation and processing phases of rice, unlike studies (Scrucca et alii, 2020) that allocate a proportion of impacts to the by-product.



Fig. 11 | Classification of selected SDGs according to environmental, economic, and social dimensions (credit: the Authors, 2025).

Finally, in a comparative LCA, Quintana-Gallardo et alii (2021) showed that using rice straw in construction materials avoids 40 kg CO_{2eq} relative to incineration and 94.21 kg CO_{2eq} relative to leaving the straw in the field. Technical hemp fibre and shiv (the woody core) are used at all building scales, from bio composites to envelope components (Tab. 2). Sprenger et alii (2025) combine a comparative LCA of hemp, kenaf, flax and sisal fibres with an assessment of the mechanical performance of the four fibre types. However, the 'cradle-to-gate' comparison shows that flax fibres derived from tow, a by-product of textile production, exhibit the lowest environmental impact while simultaneously achieving high mechanical performance, making them particularly suitable for the injection-printed composites.

Aversa et alii (2019) and Dotelli et alii (2020) conducted a comparative 'cradle-to-gate' LCA on four non-load-bearing masonry systems, each with a different build-up: lime and hemp shiv, autoclaved aerated concrete, expanded clay, and clay brick. The results show that the lime and hemp shiv wall has a lower environmental impact in terms of acidification potential, land and water use, GWP, abiotic depletion potential (fossil and non-fossil), and photochem-

ical smog formation potential. Giuffrida et alii (2024) compare a raw earth wall insulated with bio-based materials (hemp, cork and straw) against benchmark solutions.

The 'cradle-to-grave' LCA simulates a 100-year life cycle for one square metre of wall and considers multiple indicators of thermal, energy and environmental performance. The authors conducted a sensitivity analysis to evaluate different virgin plant fibres added to the earth mix, with closer attention to carbon footprint and carbon capture indicators. The results indicate that stabilisation with straw and with hemp are good alternatives, as they require less irrigation than jute and flax.

Unlike many other natural fibres, bamboo is distinguished by high structural strength and is therefore of particular interest for sustainable architectural applications, with the potential to reduce structural impacts relative to conventional construction materials, especially concrete. Yu, Tan and Ruan (2011) demonstrate that a bamboo housing prototype in China achieves a significant reduction in both embodied energy and CO_{2eq} emissions across the life cycle compared with concrete and brick buildings.

Similar findings are reported by Salzer et alii (2017), who include bamboo among the lowest impact construction solutions in the context of social housing. Although in a different application sector, Chen et alii (2023) confirm this evidence by showing that bamboo fibre also reduces energy use and emissions in food packaging production compared with conventional plastics. Araujo et alii (2022) further emphasise the need to investigate socio-economic aspects related to the development of local value chains and job creation in emerging countries.

Among innovative bio-based materials that have gained increasing scientific interest are thermal insulations based from mycelium composites with agricultural residues, such as hemp, flax, and wood (Babenko et alii, 2025), as well as those based on wool (Quintana-Guallardo et alii, 2020; Pennacchio et alii, 2017). An important aspect regarding mycelium is that the selection and size of the natural fibres used in the substrate, the fungal species, the production process, and the incubation period substantially influence the mechanical properties of the components (Babenko et alii, 2025).

Although the assessment of environmental impacts is not the central theme of mycelium studies, it is gaining importance, and studies such as Babenko et alii (2025) show promising sustainability outcomes for these composites. In particular, the authors conduct a 'cradle-to-gate' LCA comparing the environmental impacts of two mycelium composite manufacturing processes: one developed at room temperature and one under controlled conditions in a climatic chamber, the latter exhibiting higher values for GHG emissions, resource use, GWP, acidification potential and human toxicity potential.

As for waste sheep wool, sourced from livestock systems or from textile and furniture supply chains, several authors have demonstrated its ability to achieve acoustic and thermal performance equivalent to conventional insulation products, such as mineral wools and polymer foams; wool also offers excellent fire resistance owing to its intrinsic flame-retardant properties (Gounni et alii, 2019).

Pennacchio et alii (2017) and Quintana-Guallardo et alii (2020) conducted LCA analyses comparing insulation products available on the European market with experimental alternatives in wool and hemp, cellulose fibre, and waste wool with PET. The use of waste wool for thermal insulation has also been analysed from a cost perspective by Gounni et alii (2019): the LCC considered upfront and in-use energy costs to define the economic advantage of biogenic materials over EPS and rock wool.

Numerous studies analyse the use of natural materials and fibres in construction not only individually, but also through combinations or comparisons between alternatives. The research spans building components and materials (Babenko et alii, 2025; Seyedabadi, Abolhassani and Eicker, 2023; Vilaboa Dìaz, López and Bugallo, 2022; Safaripour et alii, 2021; Gounni et alii, 2019; Boškovic and Radivojevic, 2023) and comparisons between components (Babenko et alii, 2025; Keena et alii, 2022; Quintana-Gallardo et alii, 2021; Pittau et alii, 2020; Essaghouri, Mao and Li, 2023) or whole buildings (Chipade et alii, 2025; Salzer et alii, 2017), to evaluate life cycle benefits and impact reductions. Other comparative studies (Salzer et alii, 2017; Keena et alii, 2022) show that construction systems based on natural materials such as timber, bamboo and coconut fibre can reduce environmental impact by 35% to 83% compared with traditional solutions.

Life Cycle Thinking, Circular Economy and SDG | The findings of this review have been critically examined in relation to the Sustainable Development Goals (SDGs). Within the Life Cycle Thinking framework, the Circular Economy can be regarded as a promising pathway to steer transitions towards achieving the SDGs (Schroeder, Anggraeni and Weber, 2019). This perspective is mainly attributable to its strong appeal among policymakers and industrial stakeholders. The close linkage between agricultural residues and other production sectors, as revealed by the literature analysis, directly impacts SDG 8, which aims to foster the creation of new value chains, jobs, and sustainable economic growth.

Circularity also plays an important role in promoting practices such as repair, regeneration, retrofitting, recycling, industrial symbiosis, and closed-loop supply chains, which are fundamental to enhancing resource efficiency (Schroeder, Anggraeni, and Weber, 2019). This aligns with Target 8.4, which aims to progressively improve global resource efficiency in consumption and production by 2030. With developed countries taking the lead, the objective is to decouple economic growth from environmental degradation, in line with the ten-year framework of programmes on sustainable consumption and production.

The use of natural fibres in architecture and design from a circular perspective also aligns with other SDGs, including 6 (Water), 7 (Energy), 12 (Responsible consumption and production), 13 (Climate action) and 15 (Life on land). In the study by Parvathy et alii (2025), SDGs 8 and 12 emerge as key objectives for the building sector and reflect growing interest in sustainable construction techniques and materials.

Following the examples of Belmonte-Ureña et alii (2021) and UNEP (2020), LCA, LCC and S-LCA indicators were classified against the SDGs, consistent with the theme of natural fibres in architecture (Tab. 3). Based on this classification, the selected SDGs were grouped (Fig. 11) into an environmental dimension (SDGs 3, 6, 7, 11, 12, 13, 14 and 15), an economic dimension (SDG 8) and a social dimension (SDGs 1, 2, 3, 8, 11 and 12).

Conclusions | This study focused on analysing the state of the art of environmental, economic, and social sustainability assessment methods applied to natural fibres, examining in particular the potential of LCA, LCC, and S-LCA as tools to promote circular production processes in both the agricultural and construction sectors. The results of the systematic review show that the sustainability assessment of natural fibres in the construction sector is widely addressed in the literature and aligns with European objectives.

Several limitations affect the potential attainment of specific Agenda 2030 goals, and these can be addressed by revising the research questions that support the study. The first concerns the application of environmental, social and economic sustainability assessment methods. Although the three dimensions of sustainability are priorities in national and international policies, there is often no effective alignment with metrics and regulatory instruments. Moreover, most studies focus primarily on the environmental dimension, while only a subset integrates economic analysis, and even fewer consider the social dimension (Martínez and Miller, 2025).

A second limitation concerns the limited consideration of sourcing issues for natural fibres and their end-of-life. The LCA studies examined are predominantly 'cradle to gate' and do not cover all life cycle stages, in particular those relating to plant cultivation and material disposal, which are in fact relevant to biogenic materials in relation to carbon dioxide uptake, transport emissions and the subsequent release of CO_2 and other substances embedded in the fibres.

From the overall analysis, however, three main elements emerge that highlight how the application of life-cycle methodologies can promote the development of circular production processes between the agricultural and construction sectors.

Firstly, the interest of the scientific community is increasingly focusing on the utilisation of rice husks (18%) and corn residues (8%) – among the most widespread crops in Italy and globally – together with hemp (12%), bamboo (4%), and other natural fibres for applications in the construction sector. This trend reflects a growing synergy between the agriculture and architecture sectors, with potential benefits for local agricultural supply chains and development prospects within Europe, in line with the objectives of the PNRR MICS (Made in Italy Circular and Sustainable) project.

Secondly, the use of natural fibres in construction, particularly in cement-based products and thermal acoustic insulation materials, plays a strategic role in achieving European decarbonisation and sustainability targets (Mouton, Allacker and Röck, 2023). This approach is reflected in several key elements, including: a reduction in the disposal of agricultural waste, which is often burned or left in the field; a decrease in environmental impacts during the production of construction materials and, consequently, in the demand for virgin raw materials; a reduction in greenhouse gas emissions during the use phase of buildings through improved thermal insulation of the envelope; and, finally, the possibility of storing CO_2 in buildings for extended periods of time, 30 to 50 years, through the use of construction materials of biogenic origin.

Finally, the integration of complex assessment methods (Sposito and De Giovanni 2023) and the correlation between life cycle sustainability indica-

tors and the Sustainable Development Goals (Backes and Traverso, 2022) is particularly relevant for environmental impact indicators, in close synergy with Goals 6, 7, 12 and 13, and for social impact indicators with strong connections to 14 out of 17 Goals. The research highlights tangible benefits in reducing environmental impact and valorising local resources, including economic and financial aspects, but also potential trade-offs – for example, between Goal 8 (Economic growth) and Goal 13 (Climate action).

Implementing integrated studies within a Life Cycle Thinking perspective, including LCA, LCC, S-LCA and LCSA, could contribute to achieving the targets of Agenda 2030 by enabling the quantification and measurement of the sustainability of a material, a process or a whole building. In conclusion, the scientific community is encouraged to promote and support interdisciplinary approaches, to share open databases, and to validate standard metrics and regulatory instruments for the integrated assessment of the sustainability of biogenic or bio-based materials. These actions are essential to consolidate a shared language across disciplines and to accelerate the transition towards circular and sustainable production systems, in which the waste of one value chain can acquire environmental, economic and social value for others.

Acknowledgements

The contribution is the result of a joint reflection by the authors. Nonetheless, the data collection and analysis phases were carried out by A. Masoero and F. Thiébat; the phases of preparation, methodology definition, analysis, and critical re-elaboration of the systematic review are attributable to F. Thiébat, A. Masoero, F. Morselli, C. Senatore and M. A. Muñoz Veloza. Validation of the results and supervision of the study are the responsibility of E. Fregonara, R. Giordano, and F. Thiébat. All the Authors have read and approved the final version of the manuscript.

The study was conducted within the framework of the MICS (lit. Made in Italy Circolare e Sostenibile) Extended Partnership funded by the European Union, NextGeneration EU, National Recovery and Resilience Plan, PNRR, Mission 4, Component 2, Investment 1.3, D.D. 1551.11-10-2022, PE00000004. The views and opinions expressed are solely those of the Authors and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. For the co-Author F. Morselli, this publication was produced within the PNRR NGEU project funded by the Italian Ministry of Universities and Research through Ministerial Decree 118/2023.

References

Alderkamp, L. M., Klootwijk, C. W., Schut, A. G. T., van der Linden, A., van Middelaar, C. E. and Taube, F. (2025), "Integrating crop and dairy production systems – Exploring different strategies to achieve environmental targets", in *Science of The Total Environment*, vol. 958, article 177990, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177990 [Accessed 30 September 2025].

Araujo, A., da Silva, N., Sá, T., Caldas, L. and Toledo Filho, R. (2022), "Potential of Earth-Based Bamboo Bio-Concrete in the Search for Circular and Net-Zero Carbon Solutions to Construction Industry", in *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 1122, issue 1, article 012043, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/1122/1/012043 [Accessed 30 September 2025].

Arias, A., Torres, E., García-Zamora, J. L., Pacheco-Aguirre, F. M., Feijoo, G. and Moreira, M. T. (2024), "Environmental prospective of valorizing corn processing effluent to produce ferulic acid grafted chitosan polymer", in *Journal of Environmental Management*, vol. 360, article 121210, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121210 [Accessed 30 September 2025].

Aversa, P., Daniotti, B., Dotelli, G., Marzo, A., Tripepi, C., Sabbadini, S., Lauriola, P. and Luprano, V. A. M. (2019), "Thermo-hygrometric behavior of hempcrete walls for sustainable building construction in the Mediterranean area", in *IOP Conference Series | Earth and Environmental Science*, vol. 296, issue 1, article 012020, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1755-1315/296/1/012020 [Accessed 30 September 2025].

Babenko, M., Klitou, T., Klumbyte, E. and Fokaides, P. A. (2025), "Environmental assessment of mycelium based straw insulation composite – A sustainability analysis at building material level", in *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, article e04572, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04572 [Accessed 30 September 2025].

Backes, J. G. and Traverso, M. (2022), "Life cycle sustainability assessment as a metrics towards SDGs Agenda 2030", in *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 38, article 100683, pp. 1-7. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100683 [Accessed 30 September 2025].

Bartocci, P., Zampilli, M., Liberti, F., Pistolesi, V., Massoli, S., Bidini, G. and Fantozzi, F. (2020), "LCA analysis of food waste co-digestion", in *Science of The Total Environment*, vol. 709, article 136187, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136187 [Accessed 30 September 2025].

Belaud, J.-P., Prioux, N., Vialle, C. and Sablayrolles, C. (2019), "Big data for agri-food 4.0 – Application to sustainability management for by-products supply chain", in *Computers in Industry*, vol. 111, pp. 41-50. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.compind.2019.06.006 [Accessed 30 September 2025].

Belmonte-Ureña, L. J., Plaza-Úbeda, J. A., Vazquez-Brust, D. and Yakovleva, N. (2021), "Circular economy, degrowth and green growth as pathways for research on sustainable development goals – A global analysis and future agenda", in *Ecological Economics*, vol. 185, article 107050, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ecolecon.2021.107050 [Accessed 30 September 2025].

Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C. and van der Grinten, B. (2016), "Product design and business models strategies for a circular economy", in *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 33, issue 5, pp. 308-320. [Online] Available at: doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124 [Accessed 30 September 2025].

Bošković, I. and Radivojević, A. (2023), "Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime concrete wall constructions in Serbia – The impact of carbon sequestration, transport, waste production and end of life biogenic carbon emission", in *Journal of Building Engineering*, vol. 66, article 105908, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105908 [Accessed 30 September 2025].

McDonough, W. and Braungart, M. (2002), *Cradle to Cradle – Remarking the Way We Make Things,* North Point Press, New York.

Buratti, C., Belloni, E., Lascaro, E., Merli, F. and Ricciardi, P. (2018), "Rice husk panels for building applications – Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials", in *Construction and Building Materials*, vol. 171, pp. 338-349. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.089 [Accessed 30 September 2025].

Caldeira, C., Farcal, F., Moretti, C., Mancini, L., Rauscher, H., Rasmussen, K., Riego Sintes, J. and Sala, S. (2022), *Safe and Sustainable by Design chemicals and materials – Review of safety and sustainability dimensions, aspects, methods, indicators, and tools*, EUR 30991 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC127109. [Online] Available at: publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC127109 [Accessed 15 October 2025].

Carcassi, O. B., Habert, G., Malighetti, L. E. and Pittau, F. (2022), "Material diets for climate-neutral construction", in *Environmental Science and Technology*, vol. 56, issue 8, pp. 5213-5223. [Online] Available at: doi.org/10.1021/acs.est.1c05895 [Accessed 30 September 2025].

Chen, X., Chen, F., Yang, Q., Gong, W., Wang, J., Li, Y. and Wang, G. (2023), "An environmental food packaging material part I – A case study of Life-Cycle Assessment (LCA) for bamboo fiber environmental tableware", in *Industrial Crops and Products*, vol. 194, article 116279, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116279 [Accessed 30 September 2025].

Chipade, A. M., Vispute, P. P., Sonawane, S. K., Sasane, N. B., Jadhav, M. and Nerlekar, T. (2025), "Construction Materials for Sustainable Environment in Residential Buildings", in *Journal of Mines, Metals and Fuels*, vol. 73, issue 1, pp. 173-188. [Online] Available at: doi.org/10.18311/JMMF/2025/46248 [Accessed 30 September 2025].

Circle Economy (2025), *Circularity Gap Report 2025 – A circular economy to live within the safe limits of the planet*. [Online] Available at: circularity-gap.world/2025 [Accessed 30 September 2025].

Cortés-Peña, Y., Kumar, D., Singh, V. and Guest, J. S. (2020), "BioSTEAM – A Fast and Flexible Platform for the Design, Simulation, and Techno-Economic Analysis of Biorefineries under Uncertainty", in *ACS | Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 8, issue 8, pp. 3308-3310. [Online] Available at: doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07040 [Accessed 30 September 2025].

Cosentino, L., Fernandes, J. and Mateus, R. (2024), "Fast-Growing Bio-Based Construction Materials as an Approach to Accelerate United Nations Sustainable Development Goals", in *Applied Sciences*, vol. 14, issue 11, article 4850, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app14114850 [Accessed 30 September 2025].

Cucchiella, F., Rotilio, M., Barile, G., De Berardinis, P., Leoni, A., Ragnoli, M., Scarsella, M. and Stornelli, V. (2024), "Renovation wave – A bioeconomy panel produced with waste", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 467, article 142868, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142868 [Accessed 30 September 2025].

Dace, E., Cascavilla, A., Bianchi, M., Chioatto, E., Zecca, E., Ladu, L. and Yilan, G. (2024), "Barriers to transitioning to a circular bio-based economy – Findings from an industrial perspective", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 48, pp. 407-418. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.029 [Accessed 30 September 2025].

Dotelli, G., Moletti, C., Aversa, P., Sabbadini, S., Marzo, A., Tripepi, C., Lauriola, P. and Luprano, V. A. M. (2020), "Hempcrete buildings – Environmental sustainability and durability of two case-studies in North and South Italy", in Serrat, C., Casas, J. R. and Gibert, V. (eds), *DBMC 2020 – XV International Conference on Durability of Building Materials and*

Components, Barcelona, Catalonia, October 20-23, 2020, Scipedia, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.23967/dbmc.2020.213 [Accessed 30 September 2025].

EN 16575:2014, *Bio-based products – Vocabulary*. [Online] Available at: store.uni.com/en-16575-2014 [Accessed 15 October 2025].

Essaghouri, L., Mao, R. and Li, X. (2023), "Environmental benefits of using hempcrete walls in residential construction – An LCA-based comparative case study in Morocco", in *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 100, article 107085, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107085 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2023), "New European Bauhaus Academy to build skills for sustainable construction with innovative materials", in *ec.europa.eu*, 18/12/2023. [Online] Available at: ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_6593 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2021), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – New European Bauhaus – Beautiful, Sustainable, Together*, COM/2021/573 final. [Online] Available at: new-european-bauhaus.europa.eu/system/files/2021-09/COM(2021)_573_EN_ACT.pdf [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2020), *Circular Economy Action Plan – International aspects*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2779/085517 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, COM/2019/640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640 [Accessed 30 September 2025].

Fernando, S., Gunasekara, C., Law, D. W., Nasvi, M. C. M., Setunge, S. and Dissanayake, R. (2021), "Life cycle assessment and cost analysis of fly ash-rice husk ash blended alkali-activated concrete", in *Journal of Environmental Management*, vol. 295, article 113140, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113140 [Accessed 30 September 2025].

Ferrara, M. and Squatrito, A. (2022), "L'innovazione Design-driven dei materiali circolari a base biologica – Strategie e competenze per la progettazione | Design-driven innovation of bio-based circular materials – Design strategies and skills", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 288-299. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11262022 [Accessed 30 September 2025].

Garas, G., Sayed, A. M. and Hana Bakhoum, E. S. H. (2021), "Application of nano waste particles in concrete for sustainable construction – A comparative study", in *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 14, issue 6, pp. 2041-2047. [Online] Available at: doi.org/10.1080/19397038.2021.1963004 [Accessed 30 September 2025].

García-Velásquez, C., Leduc, S. and van der Meer, Y. (2022), "Design of biobased supply chains on a life cycle basis – A bi-objective optimization model and a case study of biobased polyethylene terephthalate (PET)", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 30, pp. 706-719. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2022.01.003 [Accessed 30 September 2025].

Garkoti, P. and Thengane, S. K. (2025), "Techno-economic and life cycle assessment of circular economy-based biogas plants for managing organic waste", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 504, article 145412, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145412 [Accessed 30 September 2025].

Giordano, R. and Andreotti, J. (2023), "DEC50 – Strumenti per la decarbonizzazione dei manufatti edilizi | DEC50 – Building decarbonisation tools", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 26, pp. 207-216. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-14435 [Accessed 30 September 2025].

Giuffrida, G., Dipasquale, L., Pulselli, R. M. and Caponetto, R. (2024), "Compared environmental lifecycle performances of earth-based walls to drive building envelope design", in *Sustainability*, vol. 16, issue 4, article 1367, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su16041367 [Accessed 30 September 2025].

Göswein, V., Arehart, J., Phan-Huy, C., Pomponi, F. and Habert, G. (2022), "Barriers and opportunities of fast-growing biobased material use in buildings", in *Buildings and Cities*, vol. 3, issue 1, pp. 745-755. [Online] Available at: doi.org/10.5334/bc.254 [Accessed 30 September 2025].

Gounni, A., Mabrouk, M. T., El Wazna, M., Kheiri, A., El Alami, M., El Bouari, A. and Cherkaoui, O. (2019), "Thermal and economic evaluation of new insulation materials for building envelope based on textile waste", in *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, pp. 475-483. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.057 [Accessed 30 September 2025].

Gursel, A. P., Maryman, H. and Ostertag, C. (2016), "A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of 'green' concrete mixes with rice husk ash", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, issue 1, pp. 823-836. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.029 [Accessed 30 September 2025].

Hartini, S., Azzahra, F., Purwaningsih, R., Ramadan, B. S. and Sari, D. P. (2023), "Framework for Increasing Eco-efficiency in the Tofu Production Process – Circular Economy Approach", in *Production Engineering Archives*, vol. 29, issue 4, pp. 452-460. [Online] Available at: doi.org/10.30657/pea.2023.29.50 [Accessed 30 September 2025].

ISO 15686-5:2017, *Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 5 – Life-Cycle Costing*. [Online] Available at: store.uni.com/en/iso-15686-5-2017 [Accessed 30 September 2025].

Isopescu, D. N., Adam, L., Nistorac, A. and Bodoga, A. (2024), "Carbon Footprint Assessment – Case Studies for Hemp-Based Eco-Concrete Masonry Blocks", in *Buildings*, vol. 14, issue 10, article 3150, pp. 1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings14103150 [Accessed 30 September 2025].

Kayaçetin, N. C., Piccardo, C. and Versele, A. (2023), "Social Impact Assessment of Circular Construction: Case of Living Lab Ghent", in *Sustainability*, vol. 15, issue 1, article 721, pp.1-15. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su15010721 [Accessed 30 September 2025].

Keena, N., Raugei, M., Lokko, M.-L., Aly Etman, M., Achnani, V., Reck, B. K. and Dyson, A. (2022), "A Life-Cycle Approach to Investigate the Potential of Novel Biobased Construction Materials toward a Circular Built Environment", in *Energies*, vol. 15, issue 19, article 7239, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en15197239 [Accessed 30 September 2025].

Khan, N. W. and Ali, Y. (2019), "Sustainable construction – Lessons learned from life cycle assessment (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA)", in *Construction Innovation – Information Process Management*, vol. 20, issue 2, pp. 191-207. [Online] Available at: doi.org/10.1108/CI-05-2019-0040 [Accessed 30 September 2025].

Komkova, A. and Habert, G. (2023), "Optimal supply chain networks for waste materials used in alkali-activated concrete fostering circular economy", in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 193, article 106949, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106949 [Accessed 30 September 2025].

Kristianto, Y. and Zhu, L. (2017), "Techno-economic optimization of ethanol synthesis from rice-straw supply chains", in *Energy*, vol. 141, pp. 2164-2176. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.077 [Accessed 30 September 2025].

Le, D. L., Salomone, R., Nguyen, Q. T., Versele, A. and Piccardo, C. (2025), "Drivers for adopting circular bio-based building materials to facilitate a circular transition – A case of a developed economy", in *Journal of Environmental Planning and Management*, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09640568.2025.2475448 [Accessed 30 September 2025].

Le, D. L., Salomone, R. and Nguyen, Q. T. (2024), "Sustainability assessment methods for circular bio-based building materials – A literature review", in *Journal of Environmental Management*, vol. 352, article 120137, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120137 [Accessed 15 October 2025].

Littell, J. H., Corcoran, J. and Pillai, V. (2008), *Systematic Reviews and Meta-Analysis – Pocket Guides to Social Work Research Methods*, Oxford University Press, New York. [Online] Available at: doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195326543.001.0001 [Accessed 30 September 2025].

Mancini, L., Valente, A., Barbero Vignola, G., Sanyé-Mengual, E. and Sala, S. (2023), "Social footprint of European food production and consumption", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 35, pp. 287-299. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2022.11.005 [Accessed 30 September 2025].

Martínez, A. and Miller, S. A. (2025), "Life cycle assessment and production cost of geopolymer concrete – A meta-analysis", in *Resources, Conservation & Recycling*, vol. 215, article 108018, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108018 [Accessed 30 September 2025].

Mesa, J., Esparragoza, I. and Maury, H. (2018), "Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, pp. 1429-1442. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.131 [Accessed 30 September 2025].

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G. and PRISMA Group (2009), "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses – The PRISMA statement", in *PLOS Medicine Journal*, vol. 6, issue 7, article e1000097, pp. 1-6. [Online] Available at: doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097 [Accessed 15 October 2025].

Morpurgo, E. (2024), "Biomateriali e zone umide – Filiere per l'edilizia e il tessile dalla valorizzazione di ecosistemi locali | Biomaterials and wetlands – Supply chains for construction and textiles through the enhancement of local ecosystems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 314-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16262024 [Accessed 30 September 2025].

Mouton, L., Allacker, K. and Röck, M. (2023), "Bio-based building material solutions for environmental benefits over conventional construction products – Life cycle assessment of regenerative design strategies (1/2)", in *Energy and Buildings*, vol. 282, article 112767, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112767 [Accessed 30 September 2025].

Ondova, M., Stevulova, N. and Meciarova, L. (2013), "The potential of higher share of fly ash as cement replacement in the concrete pavement", in *Procedia Engineering*, vol. 65, pp. 45-50. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.009 [Accessed 30 September 2025].

Onyelowe, K. C., Ebid, A. M., Mahdi, H. A., Soleymani, A., Jahangir, H. and Dabbaghi, F. (2022), "Optimization of Green Concrete Containing Fly Ash and Rice Husk Ash Based on Hydro-Mechanical Properties and Life Cycle Assessment Considerations", in *Civil Engineering Journal*, vol. 8, issue 12, pp. 3912-3938. [Online] Available at: doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-12-018 [Accessed 30 September 2025].

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinnes, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P. and Moher, D. (2021), "The PRISMA 2020 statement – An updated guideline for reporting systematic reviews", in *JCE | Journal of Clinical Epidemiology*, vol. 134, pp. 178-189. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclinepi.2021.03.001 [Accessed 30 September 2025].

Parvathy, S. U., Kolil, V. K., Raman, R., Vinuesa, R. and Achuthan, K. (2025), "Integrating sustainable development goals into life cycle thinking – A multidimensional approach for advancing sustainability", in *Environment, Development and Sustainability*, pp. 1-39. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10668-024-05810-z [Accessed 30 September 2025].

Paul, S., Islam, M. S. and Elahi, T. E. (2023), "Potential of waste rice husk ash and cement in making compressed stabilized earth blocks – Strength, durability and life cycle assessment", in *Journal of Building Engineering*, vol. 73, article 106727, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106727 [Accessed 30 September 2025].

Pennacchio, R., Savio, L., Bosia, D., Thiébat, F., Piccablotto, G., Patrucco, A. and Fantucci, S. (2017), "Fitness – Sheep-

wool and Hemp Sustainable Insulation Panels", in *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 287-297. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.030 [Accessed 30 September 2025].

Piccardo, C., Dodoo, A., Gustavsson, L. and Tettey, U. (2020), "Retrofitting with different building materials – Life-cycle primary energy implications", in *Energy*, vol. 192, article 116 648, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.energy.20 19.116648 [Accessed 30 September 2025].

Pinelli, D., Zanaroli, G., Rashed, A. A., Oertle, E., Wardenaar, T., Mancini, M., Vettore, D., Fiorentino, C., Frascari, D. (2020), "Comparative preliminary evaluation of 2 in-stream water treatment technologies for the agricultural reuse of drainage water in the Nile Delta", in *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 16, issue 6, pp. 920-933. [Online] Available at: doi.org/10.1002/ieam.4277 [Accessed 30 September 2025].

Pittau, F., Giacomel, D., Iannaccone, G. and Malighetti, L. (2020), "Environmental consequences of refurbishment versus demolition and reconstruction – A comparative life cycle assessment of an Italian case study", in *Journal of Green Building*, vol. 15, issue 4, pp. 155-172. [Online] Available at: doi.org/10.3992/jgb.15.4.155 [Accessed 30 September 2025].

Quintana-Gallardo, A., Alba, J., del Rey, R., Crespo-Amorós, J. E. and Guillén-Guillamón, I. (2020), "Life-cycle assessment and acoustic simulation of drywall building partitions with bio-based materials", in *Polymers*, vol. 12, issue 9, article 1965, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.3390/polym12091965 [Accessed 30 September 2025].

Quintana-Gallardo, A., Romero Clausell, J., Guillén-Guillamón, I. and Mendiguchia, F. A. (2021), "Waste valorization of rice straw as a building material in Valencia and its implications for local and global ecosystems", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 318, article 128507, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128507 [Accessed 30 September 2025].

Ramos, A., Briga-Sá, A., Pereira, S., Correia, M., Pinto, J., Bentes, I. and Teixeira, C. A. (2021), "Thermal performance and life cycle assessment of corn cob particleboards", in *Journal of Building Engineering*, vol. 44, article 102998, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102998 [Accessed 30 September 2025].

Ricciardi, P., Belloni, E., Merli, F. and Buratti, C. (2021), "Sustainable panels made with industrial and agricultural waste – Thermal and environmental critical analysis of the experimental results", in *Applied Sciences*, vol. 11, issue 2, article 494, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.3390/app11020494 [Accessed 30 September 2025].

Rigillo, M., Galluccio, G. and Paragliola, F. (2023), "Digitale e circolarità in edilizia – Le KETs per la gestione degli scarti in UE | Digital and circularity in building – KETs for waste management in the European Union", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 247-258. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13212023 [Accessed 30 September 2025].

Safaripour, M., Hossain, K. G., Ulven, C. A. and Pourhashem, G. (2021), "Environmental impact tradeoff considerations for wheat bran-based biocomposite" in *Science of the Total Environment*, vol. 781, article 146588, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146588 [Accessed 30 September 2025].

Salzer, C., Wallbaum, H., Ostermeyer, Y. and Kono, J. (2017), "Environmental performance of social housing in emerging economies – Life cycle assessment of conventional and alternative construction methods in the Philippines", in *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, issue 11, pp. 1785-1801. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11367-017-1362-3 [Accessed 30 September 2025].

Schonhoff, A., Stöckigt, G., Wulf, C., Zappab, P. and Kuckshinrichs, W. (2023), "Biosurfactants' production with substrates from the sugar industry – Environmental, cost, market, and social aspects", in *RSC Sustainability*, vol. 1, pp. 1798-1813. [Online] Available at: doi.org/10.1039/d3su00122a [Accessed 30 September 2025].

Schroeder, P., Anggraeni, K. and Weber, U. (2019), "The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals", in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 23, issue 1, pp.77-95. [Online] Available at: doi.org/10.1111/jiec.12732 [Accessed 30 September 2025].

Scrucca, F., Ingrao, C., Maalouf, C., Moussa, T., Polidori, G., Messineo, A., Arcidiacono, C. and Asdrubali, F. (2020), "Energy and carbon footprint assessment of production of hemp hurds for application in buildings", in *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 84, article 106417, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106417 [Accessed 30 September 2025].

Seyedabadi, M. R., Abolhassani, S. S. and Eicker, U. (2023), "District cradle to grave LCA including the development of a localized embodied carbon database and a detailed end-of-life carbon emission workflow", in *Journal of Building Engineering*, vol. 76, article 107101, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107101 [Accessed 30 September 2025].

Sheshadri, A., Marathe, S. and Sadowski, Ł. (2024), "Development of sustainable, high strength slag based alkali activated pavement quality concrete using agro-industrial wastes – Properties and life cycle analysis", in *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 25, issue 1, article 2410953, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.1080/10298436.2024.2410953 [Accessed 30 September 2025].

Sifuentes-Nieves, I., Molina-Cervantes, A., Flores-Silva, P. C., Garza-Santibañez, A., Saucedo-Salazar, E., Garcia-Hernandez, A. and Hernández-Hernández, H. (2023), "Structural performance and eco-efficiency assessment of biofilms obtained by a green single-step modification of starch and agave fibers", in *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 31, pp. 4829-4841. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10924-023-02905-y [Accessed 30 September 2025].

Singh, J. and Ordoñez, I. (2016), "Resource recovery from post-consumer waste – Important lessons for the up-coming circular economy", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 134, part. A, pp. 342-353. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.020 [Accessed 30 September 2025].

Sinka, M., Zorica, J., Bajare, D., Sahmenko, G. and Korjakins, A. (2020), "Fast setting binders for application in 3D printing of bio-based building materials", in *Sustainability*, vol. 12, issue 21, article 8838, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su12218838 [Accessed 30 September 2025].

Soleimani, M. and Shahandashti, M. (2017), "Comparative process-based life-cycle assessment of bioconcrete and conventional concrete", in *Journal of Engineering, Design and Technology*, vol. 15, issue 5, pp. 667-688. [Online] Available at: doi.org/10.1108/JEDT-04-2017-0033 [Accessed 30 September 2025].

Sposito, C. and De Giovanni, G. (2023), "Affrontare la complessità – Integrare LCA, ERA ed ESA per valutare impatti e benefici antropici sulla biosfera | Dealing with complexity – Integrating LCA, ERA and ESA to assess human impacts and benefits on the biosphere", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 12-39. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1412023 [Accessed 30 September 2025].

Sposito, C. and Scalisi (2023), "Riflessioni e traiettorie di ricerca interdisciplinari sulla transizione ecologica | Reflections and trajectories for interdisciplinary research on the ecological transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 3-18. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1302023 [Accessed 30 September 2025].

Sprenger, J.-M., Albrecht, K., Minkov, N., Finkbeiner, M., Schönfeld, L., Meyer, K. V. and Müssig, J. (2025), "Stiffness and Strength-Related Sustainability Assessment of Natural Fibers for Injection Molded Composites", in *Journal of Natural Fibers*, vol. 22, issue 1, article 2531372, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1080/15440478.2025.2531372 [Accessed 30 September 2025].

Thiébat, F. and Morselli, F. (2025), "Materiali biogenici per la decarbonizzazione dell'ambiente costurito | Biogenic materials for the decarbonisation of the built environment", in *Techne | Journal of Technology for Architecture and Environment*, vol. 29, issue 1, pp. 108-117. [Online] Available at: doi.org/10.36253/techne-16598 [Accessed 30 September 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development – A/RES/70/1*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 30 September 2025].

UNEP – United Nations Environment Programme (2020), *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations*. [Online] Available at: lifecycleinitiative.org/library/guidelines-for-social-life-cycle-assessment-of-products-and-organisations-2020/ [Accessed 15 October 2025].

UNEP – United Nations Environment Programme and IRP – International Resource Panel (2024), *Bend the trend – Pathways to a liveable planet as resource use spikes – Global resource outlook 2024*. [Online] Available at: unep.org/resources/Global-Resource-Outlook-2024 [Accessed 15 October 2025].

UNEP – United Nations Environment Programme and SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry (2009), *Guidelines for social life cycle assessment of products*. [Online] Available at: unep.org/resources/report/guidelines-social-life-cycle-assessment-products [Accessed 15 October 2025].

UNI EN 16575:2014, *Bio-based products – Vocabulary*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-16575-2014 [Accessed 30 September 2025].

UNI EN 15978:2011, *Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-15978-2011 [Accessed 30 September 2025].

UNI EN 15804:2021, *Sustainability of construction works – Environmental Product Declarations – Core rules for the product category of construction products*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-15804-2021 [Accessed 30 September 2025].

UNI EN ISO 14044:2021, *Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and guidelines*. [Online] Available at: store.uni.com/en/search/ALL/1/14044 [Accessed 30 September 2025].

UNI EN ISO 14040:2021, *Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework*. [Online] Available at: store.uni.com/en/uni-en-iso-14040-2021 [Accessed 30 September 2025].

Vilaboa Díaz, A., López, A. F. and Bugallo, P. M. B. (2022), "Analysis of biowaste-based materials in the construction sector – Evaluation of thermal behaviour and life cycle assessment (LCA)", in *Waste and Biomass Valorization*, vol. 13, pp. 4983-5004. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s12649-022-01820-y [Accessed 30 September 2025].

Violano, A., Cannaviello, M. and Del Prete, S. (2021), "Materiali rigenerativi bio-based – Una proposta innovative per il packaging e i prodotti da costruzione | Bio-based circular materials – Innovative packaging and construction products", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 9, pp. 244-253. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/9242021 [Accessed 30 September 2025].

Yu, D., Tan, H. and Ruan, Y. (2011), "A future bamboo-structure residential building prototype in China – Life cycle assessment of energy use and carbon emissions", in *Energy and Buildings*, vol. 43, issue 10, pp. 2638-2646. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.013 [Accessed 30 September 2025].

Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A. and Aranda Usón, A. (2011), "Life cycle assessment of building materials – Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential", in *Building and Environment*, vol. 46, issue 5, pp. 1133-1140. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002 [Accessed 30 September 2025].

Zhang, Y., Yan, D., Hu, S. and Guo, S. (2019), "Modelling of energy consumption and carbon emission from the building construction sector in China – A process-based LCA approach", in *Energy Policy*, vol. 134, article 110949, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110949 [Accessed 30 September 2025].

Zumsteg, J. M., Cooper, J. S. and Noon, M. S. (2012), "Systematic review checklist – A standardized technique for assessing and reporting reviews of life cycle assessment data", in *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, issue s1, S12-S21. [Online] Available at: doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00476.x [Accessed 15 October 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 332-343
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18202025

Article Info

Received 10 September 2025
Revised 25 October 2025
Accepted 27 October 2025
Published 30 December 2025

ENERGIE RINNOVABILI E AGRICOLTURA URBANA
Strategie multidisciplinari per città resilienti

RENEWABLE ENERGY AND URBAN AGRICULTURE
Multidisciplinary strategies for resilient cities

Stefano Follesa, Leila Farahbakhsh, Xinxin Song

Abstract

Il contributo analizza l'agricoltura urbana come processo in grado di sviluppare sostenibilità ambientale, inclusione sociale ed economia circolare, promuovendone modalità di utilizzo e sviluppo. Attraverso un approccio interdisciplinare basato sulle 'mappe di domanda', si propone un modello attuativo utile a sincronizzare le esigenze degli utenti e le soluzioni progettuali. L'analisi critica di casi studio evidenzia i benefici in termini di mitigazione delle isole di calore urbane, biodiversità, sicurezza alimentare, coesione sociale ed evoluzione di comunità vulnerabili. Le linee guida presentate mirano a promuovere l'uso delle mappe di domanda nei processi decisionali urbani al fine di favorire strategie partecipative, inclusive e sostenibili.

This paper examines urban agriculture as a process capable of promoting environmental sustainability, social inclusion, and the circular economy, and it suggests ways to utilise and develop it. Through an interdisciplinary approach based on 'demand maps', an implementation model is proposed to align users' needs with design solutions. The critical analysis of case studies highlights benefits such as reducing urban heat islands, supporting biodiversity, enhancing food security, fostering social cohesion, and aiding the development of vulnerable communities. The guidelines presented aim to encourage the use of demand maps in urban decision-making processes to support participatory, inclusive, and sustainable strategies.

Keywords

sviluppo sostenibile, infrastrutture verdi, energia rinnovabile, agricoltura urbana, mappe della domanda

sustainable development, green infrastructure, renewable energy, urban agriculture, demand maps



Stefano Follesa, PhD and Designer, is a Researcher at the University of Florence (Italy), Lecturer in Interior Design, and has been Visiting Professor at NUAA University Nanjing (China) and Alzahra University (Iran). His research interests include Spatial Design and Narrative Design. E-mail: stefano.follesa@unifi.it

Leila Farahbakhsh, Designer, focuses her research interests on the themes of the hybrid city, urban regeneration, and well-being. E-mail: farahleila85@gmail.com

Xinxin Song, PhD Candidate at the University of Florence (Italy), focuses her research on the contribution of urban agriculture to sustainable urban development. She worked as a Designer on a project analysing the nervous system of Drosophila at the Life Science Centre of the Harbin Institute of Technology (China). E-mail: xinxin.song@unifi.it

Le città contemporanee affrontano oggi sfide condivise: urbanizzazione accelerata, crisi climatica, fragilità dei sistemi alimentari e crescenti disuguaglianze sociali. La crescente inurbazione determinerà che entro il 2050 circa il 68% della popolazione mondiale vivrà in aree urbane[1] (UN-Habitat, 2020), rendendo necessaria una trasformazione dei sistemi urbani in chiave di maggiore resilienza e sostenibilità. Gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'Agenda 2030 (UN, 2015) pongono l'accento su tre priorità interconnesse: accesso equo all'acqua, energia pulita e lavoro dignitoso.

L'agricoltura urbana si inserisce in questo quadro, configurandosi non solo come pratica di sicurezza alimentare, ma anche come leva strategica per la rigenerazione ecologica, l'inclusione sociale e l'innovazione in ambito urbano: numerosi studi ne evidenziano i benefici ecosistemici e socioeconomici tra cui la riduzione delle isole di calore, l'incremento della biodiversità, la coesione comunitaria e l'attivazione di economie locali (Thebo, Drechsel and Lambin, 2014; Opitz et alii, 2016; Ghahremani et alii, 2024). Clinton et alii (2018) stimano che tali benefici possano produrre un impatto economico globale annuo pari a 160 miliardi di dollari, grazie a minori emissioni di gas climalteranti, migliore qualità dell'aria e gestione sostenibile delle acque.

Tuttavia l'efficacia trasformativa dell'agricoltura urbana è spesso compromessa da approcci episodici o non strutturati, incapaci di rispondere ai bisogni concreti delle comunità; in risposta a questa difficoltà progettuale il presente contributo propone l'impiego delle 'mappe della domanda', uno strumento mutuato dal Service Design, che collega le esigenze della comunità alle strategie di progettazione, in grado di sistematizzare il rapporto tra esigenze sociali e servizi generati: un tale approccio consente di superare la logica funzionalista e tecnocratica, valorizzando le dimensioni culturali, ecologiche ed emotive della domanda sociale (Santo, Palmer and Kim, 2016; An, Kim and Kim, 2020; Casiddu, Burlando and Chen, 2024).

Le mappe di domanda sono strumenti usati prevalentemente nella progettazione di servizi per visualizzare e comprendere i bisogni, le priorità e le motivazioni delle persone rispetto a un determinato servizio o problema. L'obiettivo è identificare i bisogni espliciti dei cittadini e mappare ciò che le persone chiedono, ma anche far emergere i bisogni impliciti o latenti (ciò che le persone non dicono, ma che spesso determina i loro comportamenti) al fine di progettare soluzioni più mirate. Nell'ambito dell'agricoltura urbana una mappa di domanda può essere finalizzata ad analizzare la corrispondenza tra bisogni alimentari e disponibilità di spazi produttivi. L'unità geografica di riferimento può essere il quartiere o il distretto urbano, mentre l'unità di misura (ad esempio il Kg/anno) può rappresentare il fabbisogno medio di produzione locale necessario a coprire una determinata quota di consumo alimentare (Tab. 1).[2]

L'elaborazione dei dati (ottenuti da questionari, statistiche municipali e rilievi GIS) consente di generare mappe tematiche di 'hot-spot' che evidenziano le aree a maggiore domanda sociale di produzione alimentare, formazione o inclusione. Gli output principali della mappa sono quindi i livelli di servizio attuale e potenziale, la distanza dai mercati locali e l'indice di accessibilità ai suoli coltivabili o rigenerabili (Fig. 1). Tali elaborazioni possono orientare politiche e progettazione identificando ad esempio i quartieri dove la creazione di orti comunitari può avere il maggiore impatto sociale o ambientale o dove i programmi di agrivoltaico urbano possono combinare al meglio benefici energetici e produttivi.

Alla luce di tali premesse il contributo propone una metodologia operativa nell'ambito dell'agricoltura urbana basata sulle mappe di domanda, la cui costruzione si articola in una sequenza metodologica strutturata in sei fasi che vanno dalla raccolta dei dati fino al monitoraggio dei risultati. A seguire la proposta formula linee guida progettuali rivolte a differenti tipologie di stakeholders per poi sintetizzare le prospettive per la diffusione dell'approccio proposto.

Stato dell'arte | L'agricoltura urbana si configura come una strategia multifunzionale capace di coniugare produzione alimentare urbana, rigenerazione ecologica e coesione sociale. Alcuni studi rilevano come i progetti di agricoltura urbana integrino diversi modelli di impresa, finalità e dimensioni – dagli orti comunitari alle microimprese agricole urbane – generando servizi ecosistemici rilevanti (Orsini et alii, 2020, 2022), mentre altri evidenziano come l'agricoltura urbana possa migliorare l'economia locale, mitigare i cambiamenti climatici e rafforzare la resilienza urbana, pur evidenziando criticità sociali da affrontare (Mensah, 2023). L'adozione di tecniche di agricoltura rigenerativa, che comporta la rotazione colturale con leguminose e l'impiego di coperture vegetali e pacciamatura organica, rappresenta un approccio chiave per rigenerare i terreni urbani senza comprometterne la fertilità, aumentando la biodiversità e catturando il carbonio.

L'agricoltura urbana sostiene la resilienza delle città attraverso diverse dimensioni e la capacità di 'buffering' garantisce la sicurezza alimentare durante la crisi: secondo Prem Nath (2021) durante la pandemia da Covid-19 molte catene di distribuzione alimentare sono state interrotte, mentre si è sviluppata l'agricoltura urbana come possibile alternativa per garantire sicurezza alimentare. I modelli di agricoltura urbana, come testimoniato tanto dal passato quanto dalla contemporaneità, assumono rilevanza nei periodi di crisi quali pandemie e eventi di guerra per attenuare gli effetti negativi delle crisi sulla sicurezza alimentare e sviluppare una maggiore resilienza alimentare urbana. La capacità adattiva dell'agricoltura urbana fornisce inoltre importanti servizi ecosistemici, tra cui il raffrescamento urbano, l'incremento della biodiversità e la gestione sostenibile delle acque: una tale dimensione trasformativa è in grado di promuovere anche la coesione sociale (Ghahremani et alii, 2024).

Tali pratiche possono oggi essere potenziate dall'adozione di tecnologie di agricoltura di precisione, che integrano il monitoraggio ambientale con droni, sensori e app (per controllare ad esempio l'umidità del terreno, lo stato nutrizionale delle piante e la presenza di parassiti) e consentono di ottimizzare l'uso di risorse idriche e fertilizzanti, riducendo gli sprechi e migliorando l'efficienza produttiva. Risulta oggi fondamentale conferire valore sociale all'agricoltura urbana attraverso la progettazione di sistemi di servizi, ovvero sistemi che oltre a produrre cibo forniscono servizi sociali, ecologici e culturali, che aumentano il valore complessivo della proposta per la comunità (Siani, 2020).

Un esempio significativo in tale direzione è quello dell'area metropolitana di Rotterdam, dove l'agricoltura urbana ha giocato un ruolo vitale durante la pandemia, adattando rapidamente le sue funzioni sociali e produttive alle nuove esigenze della comunità (Visser et alii, 2023). Il progetto è stato sviluppato come attività essenziale nel settore della produzione alimentare, consentendone il proseguimento anche in presenza di restrizioni urbane perché l'Amministrazione locale considerava le attività agricole urbane professioni essenziali, permettendo la continuità della produzione nonostante il lockdown durante la pandemia da Covid-19.

I cittadini hanno poi utilizzato gli spazi agricoli per ulteriori funzioni quali il telelavoro, l'assistenza all'infanzia e la celebrazione di cerimonie collettive, mostrando la versatilità di tali spazi in chiave sociale. Attraverso la fornitura di scorte alimentari ai gruppi vulnerabili supportata da programmi di distribuzione locale, il progetto ha svolto un'altra funzione essenziale, quella di ammortizzatore supplementare all'interno del sistema alimentare, sottolineando come un costante sostegno istituzionale e di risorse ai progetti di agricoltura urbana possa essere fondamentale per migliorarne la resilienza in caso di crisi future.

L'integrazione tra agricoltura urbana e infrastrutture blu-verdi è in grado di creare unità urbane resilienti capaci di gestire acqua, produzione e spazio in termini di ritenzione idrica, autoconsumo alimentare locale e uso efficiente del suolo urbano, adempiendo a funzioni urbane multiple (Grochulska-Salak, Nowysz and Tofiluk, 2021). In particolare le costruzioni ibride dotate di tetti verdi o serre urbane possono migliorare l'efficienza energetica e creare opportunità occupazionali (Abu Qadourah, 2024), mentre sistemi innovativi come l'agrivoltaico riescono ad aumentare l'efficienza d'uso del suolo del 60-70%, integrando produzione agricola ed energia solare. Nei climi mediterranei i tetti verdi possono ridurre le temperature esterne estive fino a 7,4 °C, diminuire la variazione di temperatura diurna del 68% e abbattere il consumo energetico per il condizionamento degli edifici dal 10% al 34,7% (De Cristo et alii, 2025).

L'adozione di principi di permacultura e di progettazione agroecologica, attraverso sistemi agricoli mimetici con gli ecosistemi naturali, colture consociate, siepi frangivento e fasce tampone, è in grado di ottimizzare ulteriormente l'efficienza ecologica del paesaggio urbano e rafforzare la resilienza complessiva dell'ambiente costruito (Vacanti and Leonardi, 2024). La riscoperta in chiave di innovazione delle pratiche agroecologiche tradizionali (Berkes, 2008; Barthel, Folke and Colding, 2010), quali le zone cuscinetto vegetative e le barriere frangivento, sta silenziosamente rimodellando il tessuto urbano, consentendo alle città di crescere in armonia con la natura, attraverso pratiche che non sono semplici tecniche, ma un linguaggio di riconciliazione con la terra.

L'agricoltura e l'agroecologia partecipate in ambito urbano si manifestano infine anche attraverso pratiche comunitarie e domestiche che favoriscono la diversificazione delle colture e la gestione collettiva delle risorse: come linee di vita nascoste, esse rafforzano silenziosamente la resilienza dell'ambiente costruito.

Approccio metodologico | In questo quadro caratterizzato da una grande varietà di soluzioni e tecniche il presente contributo adotta un approccio qualitativo, comparativo e interdisciplinare nell'ambito dell'agricoltura urbana, volto a indagare il potenziale delle pratiche citate come leva per la resilienza socio-ambientale delle città. Il processo metodologi-

co adottato dalla ricerca si fonda su tre componenti principali: 1) l'analisi critica della letteratura scientifica internazionale sui rapporti cibo-città con attenzione agli sviluppi più recenti in ambito di sostenibilità urbana, design partecipativo, policy per il cibo e innovazione sociale; 2) lo studio comparato di casi studio internazionali, selezionati in base alla capacità di integrare dimensioni ambientali, sociali e tecnologiche all'interno di progetti di agricoltura urbana; 3) l'elaborazione e l'applicazione delle 'mappe di domanda' come strumento che consente di visualizzare la corrispondenza tra bisogni locali e servizi progettuali.

Il framework metodologico è stato integrato con un modulo di sensoristica wireless per agricoltura di precisione, al fine di rilevare umidità, temperatura, pH e salinità supportati da reti LoRa o Zigbee, cruscotti per la visualizzazione in tempo reale e sistemi di automazione irrigua e fitotecnica basati su dati ambientali, con attivazione remota, allarmi per carenze idriche e integrazione di UAV per interventi mirati. Questo approccio integrato consente di osservare l'agricoltura urbana non solo come dispositivo tecnico-funzionale, ma come infrastruttura relazionale e culturale. La metodologia proposta apre così la strada a un modello operativo replicabile, utile a supportare decisori, progettisti e comunità nella definizione di strategie più eque, partecipative e sostenibili.

Casi studio | L'analisi comparata dei casi studio si concentra su cinque progetti internazionali di agricoltura urbana selezionati per la loro capacità di integrare aspetti multidisciplinari.

Eco Soul Ericeira (Portogallo, 2016) è un progetto di agricoltura urbana, turismo creativo e inclusione sociale, sviluppato con un approccio sistemico e con il coinvolgimento della comunità locale. La mappa della domanda è utilizzata per identificare bisogni latenti, in linea con le riflessioni di Delgado (2021) sui vincoli e sulle opportunità delle politiche pubbliche alimentari in Portogallo. Eco Soul Ericeira è un hotel, ma offre molto più di un semplice alloggio: è un progetto pionieristico che fonde bioarchitettura, permacultura e turismo sostenibile. La guesthouse è stata concepita secondo criteri bioclimatici, con sistemi passivi di ventilazione, recupero dell'acqua piovana e impiego di energia da fonti rinnovabili (Fig. 2); l'iniziativa integra un mini-orto ecologico e spazi per erbe aromatiche che promuovono produzione alimentare locale e consapevolezza ambientale tra gli ospiti (Fig. 3).

Istra Inspirit (Croazia, 2012) è un progetto con elevato coinvolgimento di un'utenza giovane e promozione della coesione sociale, finalizzato a un turismo culturale rigenerativo che valorizza il Patrimonio storico attraverso esperienze immersive e narrazioni locali. Pur non essendo un'iniziativa agricola in senso stretto, il progetto coinvolge aziende agricole a gestione familiare e produttori locali, integrando la dimensione alimentare con quella culturale (Langella, Russo and Scalisi, 2024; Fig. 4). La sostenibilità emerge dalla sinergia tra attori locali, studenti, artigiani e comunità rurali, in un modello di co-creazione territoriale.

OrtoCollettivo a Genova (Italia, 2014) prevede il riuso di spazi abbandonati per orti condivisi rivolti a giovani, migranti e persone fragili; esso rappresenta il più grande orto urbano in Italia, originato da un grande progetto di recupero del territorio (circa sette ettari di terreno collinare recuperato da aree dismesse) creato dall'associazione Comitato4Valli con lo slogan 'zero rifiuti'. Il progetto promuove inclusione sociale, educazione ambientale e permacultura, coinvolgendo migranti, giovani e fasce svantaggiate della popolazione (Fig. 5); una dimensione tecnologica è presente nella gestione idrica e nella mappatura dei terreni disponibili, mentre l'approccio comunitario rafforza la coesione sociale.

MUAI – Michigan Urban Agriculture Initiative (Detroit, USA, 2012) si fonda sul riutilizzo adattivo dell'ambiente costruito con focus sulla comunità e sulla formazione. MUAI è un modello innovativo di 'agrihood', dove l'agricoltura urbana è il fulcro di un progetto di rigenerazione urbana che integra educazione, sostenibilità e sviluppo comunitario, con orti, frutteti, apiari e spazi per la trasformazione alimentare (Fig. 6); la componente tecnologica è visibile nella progettazione del campus agricolo e nell'uso di tecnologie verdi per la gestione del suolo e dell'acqua.

Brooklyn Grange (New York, USA, 2010), con oltre 200.000 mq di superficie coltivata degli Stati Uniti, è il più grande progetto di agricoltura urbana su tetto, che combina sostenibilità economica e ambientale con pratiche biologiche. Il progetto integra agricoltura intensiva sui tetti ed educazione ambientale, producendo oltre 36 tonnellate di ortaggi biologici all'anno (Fig. 7); la dimensione tecnologica è centrale: sistemi di drenaggio avanzati, gestione delle acque piovane e mitigazione dell'effetto isole di calore urbane costituiscono elementi fondanti della proposta. Il progetto offre un programma di agricol-

N°	Element	Value / Specification
1	Geographical scale	– neighbourhood or urban area (e.g., 2 km × 2 km) divided into 250 × 250 m cells (16 cells)
2	Unit of measurement of demand	– kg of vegetables / year per cell – kWh/year for agricultural energy – number of users involved – square meters of required usable space
3	Data sources	– resident questionnaires – per capita consumption statistics – demographic data – GIS surveys on available open areas
4	Agricultural services considered	– horticultural production – composting – training – local supply chain
5	Desired outputs	– hot-spot demand map (cells with demand above the threshold) – current vs. potential service levels – degree of demand / supply correspondence in each cell – accessibility index (distance from agricultural spaces)
6	Permitted decisions	– identification of priority cells for new community gardens – allocation of resources (funding, infrastructure) – selection of the type of intervention in each cell
7	KPI	– ocal food demand coverage (% kg vegetables produced / kg required) – agricultural energy self-produced (kWh / year) – CO_2 avoided (t CO_{2eq}) – community engagement (number of participants / activities)
8	Monitoring tools & frequency	– GIS + community database – smart-metre + dashboard – LCA (Life Cycle Assessment) – surveys – annual / semiannual updates
9	Responsible actors	– municipality / associations – local utilities – environmental designers – NGOs / community organisations

Tab. 1 | Parameters for Urban Agricultural Demand Mapping (credit: L. Farahbakhsh, 2025).

tura sostenuta dalla comunità, utilizza metodi di coltivazione biologici, riduce l'uso di sostanze chimiche e se da un lato vende i prodotti direttamente ai residenti locali e alleva anche api per produrre miele (Figg. 8, 9), dall'altro interagisce con la comunità attraverso varie attività educative e ambientali.

Nei diversi casi analizzati emergono inoltre approcci tecnologici come microfattorie modulari e sistemi idroponici a basso impatto ambientale, piccole unità a circuito chiuso (per la coltivazione di insalate ed erbe aromatiche in spazi indoor) dotate di illuminazione LED e controllo automatico del microclima e sistemi idrici intelligenti con irrigazione a goccia controllata via app, raccolta e riuso delle acque piovane e zone umide artificiali per fitodepurazione che contribuiscono a garantire la resilienza in scenari di siccità (come nel caso di Brooklyn Grange, dove l'integrazione di LED a spettro variabile e sensori climatici consente una gestione ottimizzata della produzione).

Il progetto MUAI adotta sistemi di irrigazione a goccia controllata via app, con raccolta e riuso delle acque piovane, contribuendo alla sicurezza idrica in contesti urbani vulnerabili. Anche Eco Soul Ericeira e OrtoCollettivo mostrano soluzioni ibride, in cui la fitodepurazione tramite zone umide artificiali e la gestione intelligente delle risorse idriche si combinano con pratiche agroecologiche. Istra Inspirit, pur non adottando tecnologie agricole dirette, integra dispositivi digitali per la narrazione territoriale e la valorizzazione dei prodotti locali, contribuendo alla sostenibilità culturale e alla tracciabilità alimentare. La Tabella 2 riporta l'analisi dei casi studio attraverso i cinque criteri di inclusività sociale, innovazione progettuale, impatto ambientale, replicabilità e coinvolgimento del pubblico.

L'analisi comparativa dei casi studio selezionati evidenzia come l'agricoltura urbana, se progettata in modo integrato e contestuale, risponde a bisogni sociali, ambientali e culturali, contribuendo agli SDG 6, 7, 8 e trasversalmente agli SDG 11, 12 e 13. In tutti i casi essa favorisce l'inclusione sociale: MUAI sostiene giovani, anziani, donne e migranti (Santo, Palmer and Kim, 2016), mentre l'OrtoCollettivo promuove coesione intergenerazionale; Istra Inspirit integra turismo e narrazione creativa (Zehr Gantz et alii, 2025) mentre Brooklyn Grange valorizza tetti urbani con pratiche biologiche, pur con replicabilità limitata (Fig. 10).

Tutti i progetti riducono l'impronta ecologica tramite gestione delle acque, riciclo e filiere corte ed Eco Soul integra biofilia e educazione ambientale (Clinton et alii, 2018; Thebo, Drechsel and Lambin, 2014). Se in generale una solida governance solida e la presenza di Living Labs favoriscono la replicabilità dei progetti, gli stessi devono confrontarsi con ostacoli di varia natura come normative non aggiornate o attuali, scarsa interoperabilità, finanziamenti intermittenti, resistenze culturali e limitato accesso alla terra, barriere che possono essere mitigate da governance multilivello, finanziamenti continui e campagne di sensibilizzazione.

Proposta metodologica e linee guida | Alla luce dei casi studio si propone un framework operativo per integrare le 'mappe di domanda' nei processi decisionali, di progettazione e gestione dell'agricoltura urbana, in coerenza con le osservazioni di Delgado (2021) che evidenziano la necessità di strategie pubbliche integrate per promuovere l'agricoltura come componente strutturale delle politiche alimentari in ambito urbano. Le 'mappe di domanda' traducono i bisogni delle comunità in obiettivi strategici per la pianificazione urbana, utilizzando metodi GIS e analisi multicriterio simili a quelli suggeriti da Marqués-Pérez e Segura (2018) e da Weerakoon (2014) per valutare l'idoneità di particolari ambiti alla produzione agricola. Le mappe di domanda diventano in tal modo, uno strumento di progettazione delle politiche adattabile a contesti diversi e dinamiche urbane complesse. Il framework si basa su un approccio partecipativo, coinvolgendo cittadini, stakeholder e progettisti in tutte le fasi e si avvale di tecniche quali i Figure-Ground Plans (Tóth and Timpe, 2017) che da un lato permettono di integrare le esigenze comunitarie nella progettazione degli spazi agricoli, migliorando accuratezza, consenso e senso di appartenenza, dall'altro supportano i decisori a più livelli mediante cruscotti digitali e report aggregati per amministratori, pianificatori e investitori. Il modello Supply-Demand consente strategie adattive anche in contesti con declino demografico o risorse limitate (Takatori, Zheng and Ullah, 2024), favorendo scelte rapide, trasparenti e coerenti con obiettivi di sostenibilità urbana.

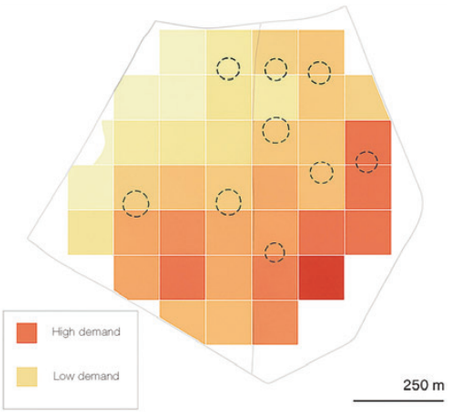


Fig. 1 | Hot-spot Map of the spatial distribution of demand for vegetables and urban agricultural services – District X (credit: L. Farahbakhsh, 2025).

Le linee guida operative delineano fasi chiare: mappatura dei bisogni, sessioni di co-design, prototipazione, implementazione pilota e valutazione iterativa, con la partecipazione di Pubblica Amministrazione, cittadini e progettisti tramite workshop, interviste e focus group. Il framework è adattabile a diversi settori, come istruzione, salute e rigenerazione urbana, consentendo la personalizzazione di indicatori e metriche di performance.

L'adozione di tecnologie abilitanti rafforza l'efficacia e la resilienza: sensori di umidità e pH collegati a reti LoRa e cruscotti digitali aggiornano in tempo reale la mappa della domanda; impianti fotovoltaici con accumulo e smart grid locali riducono costi ed emissioni; sensori climatici, illuminazione LED a spettro regolabile e algoritmi IA ottimizzano la produzione in serre tramite controlli predittivi. In sintesi l'integrazione di principi metodologici partecipativi, strumenti tecnologici e governance multilivello promuove replicabilità, scalabilità e resilienza dell'agricoltura urbana, garantendo un approccio basato sui dati e flessibile alle esigenze delle comunità.

Metodologia di costruzione della 'mappa di domanda' | La costruzione della mappa di domanda urbana si articola in una sequenza metodologica strutturata in sei fasi, che vanno dalla raccolta dei dati fino al monitoraggio dei risultati. Tale approccio consente di integrare dimensioni quantitative e qualitative, con l'obiettivo di restituire una rappresentazione accurata e dinamica dei bisogni territoriali legati alla produzione agricola urbana e ai servizi ecosistemici associati.

La prima fase consiste nella raccolta di dati di base, fondamentali per la caratterizzazione territoriale e socioeconomica dell'area di studio; essi dati provengono da diverse fonti: questionari rivolti ai residenti, finalizzati a comprendere abitudini di consumo, bisogni alimentari e disponibilità alla partecipazione; statistiche sui consumi pro capite, utili per quantificare il fabbisogno alimentare medio della popolazione; dati demografici e socio-economici, estratti da fonti ad accesso aperto o censimenti ufficiali; rilievi GIS sulle aree libere e disponibili, utilizzati per identificare potenziali superfici coltivabili o spazi per orticoltura urbana. L'integrazione di questi dataset consente di costruire una base informativa coerente, normalizzata e georiferita.

La seconda fase (elaborazione dei dati) prevede che i dati vengano aggregati e riferiti al territorio in esame che viene diviso in celle quadrate di 250 × 250 metri, unità spaziale scelta per garantire un buon equilibrio tra dettaglio territoriale e leggibilità della mappa. Per ogni cella vengono calcolati: il fabbisogno alimentare (espresso in kg di ortaggi/anno); la domanda energetica agricola (kWh/anno); la presenza e la tipologia dei servizi agricoli esistenti o potenziali. Questa elaborazione produce una prima rappresentazione spaziale della distribuzione della domanda, successivamente raffinata attraverso indicatori sociodemografici e parametri di accessibilità.

La terza fase riguarda la creazione della mappa tematica e l'analisi spaziale dei risultati. Attraverso l'uso di software GIS vengono individuate le celle con valori di domanda superiori a una soglia di riferimento ('hot-spot') e messe a confronto con la distribuzione dei servizi agricoli esistenti. L'analisi produce diversi output: la mappa degli hot-spot di domanda; il confronto tra livelli di servizio attuali e potenziali; un indice di accessibilità, calcolato sulla distanza dagli spazi agricoli o dagli orti esistenti. Parallelamente viene condotta un'analisi di sensibilità che consente di valutare la robustezza dei risultati variando alcuni parametri (ad esempio il raggio di influenza tra 300 e 500 metri o un incremento della popolazione del 10%).

La quarta fase riguarda una componente fondamentale della metodologia, la validazione partecipata dei risultati. Attraverso focus group, sondaggi online e interviste con associazioni e attori locali, vengono raccolti feedback qualitativi sulla percezione dei bisogni e sulla fruizione degli spazi agri-



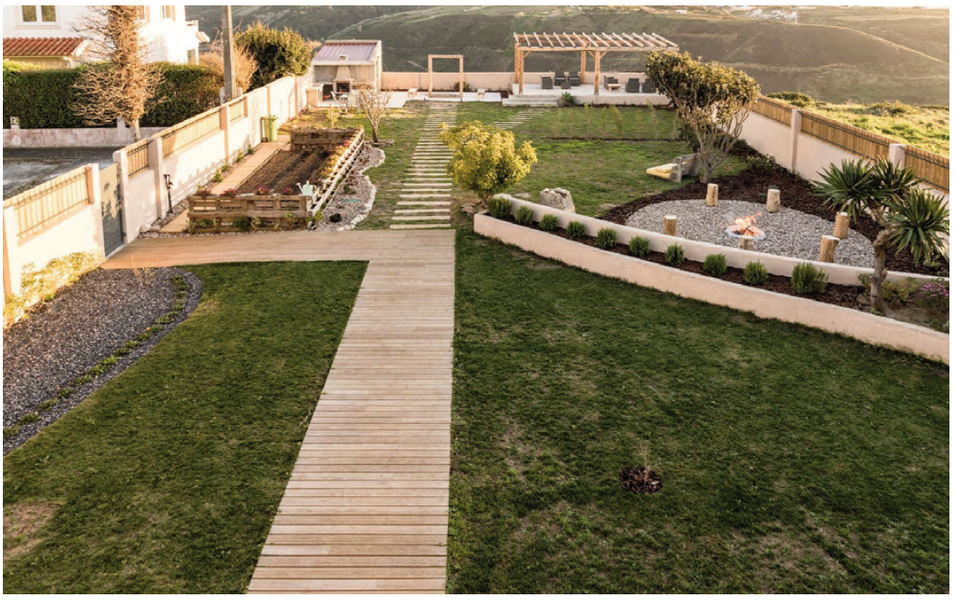


Fig. 2 | The collected rainwater is treated and utilised for the irrigation of the organic garden and cultivated fields, as well as for supplying an outdoor shower available to guests (source: ecosoulericeira.com).

Fig. 3 | The micro-ecological garden within the inn (source: portugal.com, 2022).

coli. Il confronto tra la 'domanda percepita' (cioè i bisogni espressi direttamente dagli abitanti) e la 'domanda modellata' (cioè i risultati prodotti dal modello GIS e dagli indicatori quantitativi) permette di verificare la coerenza del modello con le aspettative e le priorità espresse dai cittadini, migliorando così la credibilità e l'usabilità delle mappe prodotte.

La quinta fase è relativa alla mappa di domanda che non rappresenta un semplice strumento descrittivo, ma è una base conoscitiva per la pianificazione operativa. Le celle con domanda elevata vengono considerate prioritarie per nuovi interventi di agricoltura urbana o per il potenziamento dei servizi esistenti. In questa fase vengono prese decisioni riguardanti: la localizzazione di nuovi orti comunitari o microfattorie; l'allocazione delle risorse economiche e infrastrutturali; la tipologia di intervento più appropriata (orti in suolo, sistemi idroponici, agrivoltaico, programmi formativi o educativi). Il risultato analitico-progettuale consente di legare direttamente la mappa alle scelte di policy e governance.

La sesta fase prevede la definizione di un piano di monitoraggio basato su indicatori chiave di performance, utili per valutare nel tempo l'efficacia delle azioni intraprese. Tra i principali indicatori si considerano: la percentuale di fabbisogno alimentare coperto localmente; l'energia agricola autoprodotta (kWh/anno); le emissioni di CO_2 evitate (t CO_{2eq}); il livello di partecipazione comunitaria (numero di utenti coinvolti o attività realizzate). Il monitoraggio avviene con strumenti digitali quali cruscotti GIS, contatori intelligenti e database condivisi, con una frequenza di aggiornamento annuale o semestrale, a seconda della disponibilità dei dati.

Questa struttura metodologica garantisce trasparenza, replicabilità e solidità scientifica, ponendo le basi per una pianificazione urbana fondata su dati, partecipazione e metriche verificabili.

Sinergie con gli SDG e trasferibilità | Pradhan et alii (2024) hanno analizzato oltre 1.450 pubblicazioni per mappare l'impatto dell'agricoltura urbana su 17 SDG e 142 target, con impatti significativi su sicurezza alimentare, inclusione sociale, mitigazione climatica e biodiversità urbana, sebbene l'efficacia delle iniziative vari in base alle pratiche adottate e al livello di supporto politico locale. Lo studio fa emergere inoltre diversi compromessi tra esigenze estetiche urbane, integrazione di infrastrutture energetiche e competizione per l'uso del suolo; tali compromessi possono essere attenuati attraverso processi di pianificazione partecipativa e multi-stakeholder in grado di bilanciare interessi individuali, collettivi, funzionali e ambientali.

L'analisi delle pratiche di agricoltura urbana evidenzia il loro contributo concreto al raggiungimento di diversi SDG. In particolare la gestione dell'acqua, attraverso fitodepurazione e riuso delle acque meteoriche, riduce il carico sugli impianti urbani, migliorando sostenibilità e resilienza (Clinton et alii, 2018); i sistemi agrivoltaici sui tetti urbani aumentano l'efficienza dell'uso del suolo, abbassano le emissioni di CO_2 e integrano produzione energetica e alimentare, mentre i biodigestori trasformano i residui organici in biogas, chiudendo il ciclo dei rifiuti; infine smart grid e microreti generano inoltre nuove opportunità lavorative, con un legame diretto tra innovazione sostenibile e sviluppo locale.

Sul piano sociale ed economico l'orticoltura partecipativa e la microimprenditorialità favoriscono inclusione e competenze in contesti marginalizzati (Opitz et alii, 2016); orti urbani e aree verdi mitigano le isole di calore e assorbono anidride carbonica, sostenendo gli SDG 11 e 13, mentre filiere corte e produzione locale supportano SDG 2 e 12, promuovendo accesso a cibo sano e consumi responsabili.

Un limite critico riguarda l'interdipendenza tra SDG: i benefici tecnologici e infrastrutturali dipendono dal coinvolgimento comunitario, dalla governance e dalla continuità di supporto politico-finanziario; solo così l'agricoltura urbana diventa un laboratorio socio-ecologico integrato, promuovendo resilienza e sostenibilità a più livelli.

La proposta adotta un approccio del tipo 'pilot-before-scale' (Brown and Wyatt, 2010) nell'ambito del Design Thinking for Social Innovation, come principio di trasferibilità da convalidare attraverso un sistema minimo funzionante e da ampliare successivamente. Tale metodo prevede la sperimentazione di un Minimum Viable System (MVS) – un prototipo territoriale o sociale a piccola scala – in grado di testare l'efficacia di una soluzione in termini di impatto ambientale, economico e partecipativo, prima di un'eventuale espansione su scala urbana (von Wirth et alii, 2018).

La trasferibilità non implica il trasferimento di configurazioni statiche, ma piuttosto il riutilizzo della combinazione di 'moduli funzionali + moduli di governance + moduli finanziari'. La chiave della trasferibilità risiede nelle potenzialità delle tecnologie e nella disponibilità dei dati (rilevamento e LCA), nel valore sociale (partecipazione e co-governance) e nelle capacità istituzionali (accesso a più livelli e orientamento alle prestazioni): solo interpretando l'agricoltura urbana come infrastruttura ecologica nella pianificazione e negli strumenti fiscali è possibile amplificare gli effetti sinergici dal livello del progetto alla scala urbana.

Conclusioni | Attraverso la chiave di lettura esposta il saggio ridefinisce l'agricoltura urbana come infrastruttura sistemica che integra rigenerazione ecologica, inclusione sociale e innovazione tecnologica, superando l'idea di processo rivolto esclusivamente alla produzione alimentare. Le 'mappe di domanda', proposte come strumento metodologico, mirano a connettere le esigenze della comunità con strategie di progettazione sostenibile, promuovendo l'agricoltura urbana come leva per la trasformazione resiliente delle città.

I casi studio mostrano come un approccio partecipativo e basato sui dati possa coordinare produzione alimentare, servizi ecologici e coesione sociale, generando molteplici benefici nella mitigazione dell'effetto isola di calore urbana, nel potenziamento della biodiversità, nell'emancipazione di comunità o soggetti emarginati (Giachetta, Buondonno and Canepa, 2025) e nel rafforzamento dell'identità culturale. La scalabilità dei progetti è potenziata dall'integrazione di pratiche innovative quali le tecnologie agricole di precisione, la gestione intelligente dell'acqua, l'agricoltura fotovoltaica e i sistemi energetici a ciclo chiuso, tutte pratiche che operativamente ottimizzano le risorse e strategicamente sono allineate con gli SDG, favorendo sinergie tra energia pulita, città sostenibili, sicurezza alimentare e inclusione sociale. Nonostante il potenziale delle 'mappe di domanda' come strumenti decisionali per l'agricoltura urbana, diversi fattori ne condizionano lo sviluppo; in primo luogo la qualità e la granularità dei dati disponibili rappresentano una limitazione significativa: dati statistici ufficiali, open-data comunali o informazioni catastali spesso presentano una risoluzione spaziale limitata, aggiornamenti sporadici o lacune nelle microaree urbane, riducendo la precisione degli hotspot individuati. Tale criticità può essere attenuata integrando fonti multiple e combinando dati quantitativi con valutazioni qualitative provenienti da cittadini, associazioni locali e osservazioni sul territorio oppure impiegando strategie di aggregazione spaziale uniformi.

Un'ulteriore barriera riguarda la scarsa rappresentatività dei mercati informali, attraverso cui parte della domanda alimentare o energetica viene soddisfatta; mercati contadini locali, reti cooperative o scambi comunitari non censiti nei dataset ufficiali rischiano di generare sottostime della domanda reale. La raccolta di dati qualitativi tramite focus group, interviste e questionari mirati consente di integrare queste informazioni e di stimare in modo più realistico la domanda effettiva. Il trattamento dei dati sensibili, dei consumi energetici registrati da contatori intelligenti o di informazioni socio-demografiche individuali impone vincoli di privacy che possono limitare l'accesso a informazioni utili; l'adozione di protocolli di anonimizzazione e aggregazione dei dati, unitamente ad accordi di condivisione dei dati con i gestori rappresenta una strategia efficace per salvaguardare la privacy mantenendo la possibilità di analisi accurate.

Anche i vincoli normativi costituiscono un fattore rilevante: regolamentazioni dell'uso di tetti, suoli pubblici e aree agricole possono limitare l'implementazione di interventi suggeriti dalla mappa, al pari dell'installazione di serre idroponiche o impianti agrivoltaici. Tali ostacoli possono essere superati mediante verifiche preliminari con gli uffici tecnici comunali, sperimentazioni in scala ridotta e prototipi pilota su aree già autorizzate.

Infine non possono essere trascurate le barriere socio-economiche e culturali, quali la scarsa familiarità con pratiche agricole urbane, una partecipazione civica limitata o resistenze culturali che possono condizionare la realizzazione e l'efficacia degli interventi. L'integrazione di programmi formativi, laboratori partecipativi e iniziative di sensibilizzazione può favorire l'adozione diffusa delle soluzioni progettuali, rendendo la mappa non solo uno strumento analitico, ma anche operativo e socialmente accettato. In sintesi, sebbene la mappa di domanda costituisca un potente strumento per orientare interventi di agricoltura urbana, la consapevolezza dei limiti metodologici, tecnici, normativi e sociali è essenziale. L'adozione di strategie mirate per l'integrazione dei dati, la tutela della privacy, la sperimentazione pilota e il coinvolgimento attivo della comunità consente di abbattere gran parte delle barriere, incrementando la robustezza e la replicabilità dello strumento. In tal modo l'agricoltura urbana, intesa come pratica civica e culturale, rinnova le relazioni tra persone e natura, contribuendo a un tessuto urbano più vitale.

Contemporary cities are facing shared challenges: accelerated urbanisation, the climate crisis, the fragility of food systems, and growing social inequalities. Ongoing urbanisation will mean that by 2050, about 68% of the world's population will live in urban areas[1] (UN-Habitat, 2020), making it necessary to transform urban systems toward greater resilience and sustainability. The Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda (UN, 2015) emphasise three interconnected priorities: equitable access to water, clean energy, and decent work.

Urban agriculture fits into this framework and is configured not only as a practice for food security but also as a strategic lever for ecological regeneration, social inclusion, and innovation in the urban realm. Numerous studies highlight its ecosystem and socioeconomic benefits, including the reduction of heat islands, increased biodiversity, community cohesion, and the activation of local economies (Thebo, Drechsel and Lambin, 2014; Opitz et alii, 2016; Ghahremani et alii, 2024). Clinton et alii (2018) estimate that these benefits may yield a global annual economic impact of 160 billion dollars, driven by lower greenhouse gas emissions, improved air quality, and sustainable water management.

However, the transformative power of urban agriculture is often compromised by episodic or unstructured approaches that fail to address commu-



Fig. 4 | The inhabitants of the Istrian Peninsula cook dishes that tell a story (source: istriavicina.istra.hr, 2023).



Fig. 5 | Young people and immigrants working in the OrtoCollettivo of Genoa (credit: OrtoCollettivo, 2025).

nities' concrete needs. In response to this design difficulty, this contribution proposes the use of 'demand maps', a tool borrowed from Service Design that links community needs to design strategies and systematises the relationship between social needs and the services that are generated. Such an approach enables overcoming a functionalist and technocratic logic and enhancing the cultural, ecological, and emotional dimensions of social demand (Santo, Palmer and Kim, 2016; Casiddu, Burlando and Chen, 2024).

Demand maps are tools primarily used in service design to visualise and understand people's needs, priorities, and motivations related to a given service or problem. The goal is to identify the explicit needs of citizens and map what people are asking for, and to uncover implicit or latent needs (what people do not say but which often determine their behaviour) to design more targeted solutions. In the context of urban agriculture, a demand map can be used to analyse the correspondence between food needs and the availability of productive spaces. The geographical reference unit may be the neighbourhood or the urban district, while the unit of measurement (for example kg per year) can represent the average need for local production required to cover a given share of food consumption (Tab. 1).[2]

The processing of data (collected from questionnaires, municipal statistics, and GIS surveys) enables the generation of thematic 'hot-spot' maps that highlight areas with the most significant social demand for food production, training, or inclusion. The main outputs of the map are therefore the level of current and potential service provision, the distance from local markets, and the index of accessibility to cultivable or regenerable soils (Fig. 1). These elaborations can orient policies and design by identifying, for example, the neighbourhood where the creation of community gardens can have the most significant social or environmental impact, or where urban agrivoltaic programs can best combine energy and productive benefits.

In light of these premises, this contribution proposes an operational methodology for urban agriculture based on demand maps. The construction of these maps is articulated in a structured methodological sequence of six phases, ranging from data collection to monitoring of results. The paper then formulates design guidelines for different stakeholder types and, finally, summarises perspectives for disseminating the proposed approach.

State of the art | Urban agriculture is emerging as a multifunctional strategy that combines urban food production, ecological regeneration, and social cohesion. Some studies observe how urban agriculture projects integrate different types of enterprise, purposes, and scales – from community gardens to urban agricultural micro-enterprises – generating relevant ecosystem services (Orsini et alii, 2020), while others show how urban agriculture can improve the local economy, mitigate climate change, and strengthen urban resilience, even while highlighting social criticalities that must be addressed (Mensah, 2023). The adoption of regenerative agriculture techniques – such as no-till practices, crop rotation with legumes, cover crops, and organic mulching – represents a key approach to regenerating urban soils without compromising their fertility, increasing biodiversity, and capturing carbon.

Urban agriculture supports cities' resilience in several ways, and its buffering capacity helps ensure food security during crises. According to Prem Nath (2021), during the Covid-19 pandemic, many food distribution chains were disrupted, while urban agri-





Fig. 6 | Michigan Urban Agriculture Initiative, USA (source: blog.assethealth.com).

Fig. 7 | Brooklyn Grange opens NYC's largest rooftop farm in Sunset Park (source: 6sqft.com, 2019).

culture emerged as a possible alternative to guarantee food security. Models of urban agriculture, as demonstrated by the past and the present, become significant in times of crisis, such as pandemics and wartime events, to mitigate the adverse effects of crises on food security and to develop greater urban food resilience. The adaptive capacity of urban agriculture also provides essential ecosystem services, including urban cooling, increased biodiversity, and sustainable water management. This transformative dimension can also promote social cohesion (Ghahremani et alii, 2024). These practices can now be strengthened through the adoption of precision agriculture technologies that integrate environmental monitoring with drones, sensors, and apps (for example, to monitor soil moisture, plant nutritional status, and pest presence), and that allow optimisation of water and fertiliser use, reducing waste and improving production efficiency.

It is now essential to attribute social value to urban agriculture through the design of systems of services, that is, systems which, in addition to producing food, provide social, ecological, and cultural services that increase the overall value of the proposal for the community (Siani, 2020).

A significant example in this direction is the metropolitan area of Rotterdam, where urban agriculture played a vital role during the pandemic by rapidly adapting its social and productive functions to the community's new needs (Visser et alii, 2023). The project was developed as an essential activity in the food production sector, allowing it to continue even under urban restrictions, as the local Administration considered urban agricultural activities essential professions, permitting production to continue despite the lockdown during the Covid-19 pandemic.

Citizens then used agricultural spaces for additional functions, such as remote work, childcare, and collective ceremonies, demonstrating the social versatility of these spaces. By supplying food stocks to vulnerable groups supported by local distribution programs, the project also performed another essential function: that of an additional buffer within the food system. This underlines how consistent institutional and resource support for urban agriculture projects can be fundamental to improving their resilience in the event of future crises.

The integration of urban agriculture and blue-green infrastructure can create resilient urban units capable of managing water, production, and space through water retention, local food self-consumption, and the efficient use of urban land, thereby fulfilling multiple urban functions (Grochulska-Sałak, Nowysz and Tofiluk, 2021). In particular, hybrid buildings equipped with green roofs or urban greenhouses can improve energy efficiency and create employment opportunities (Abu Qadourah, 2024), while innovative systems such as agrivoltaics can increase land-use efficiency by 60-70%, integrating agricultural production and solar energy generation. In Mediterranean climates, green roofs can reduce outdoor summer temperatures by up to 7.4 °C, decrease the daily temperature range by 68%, and cut building air-conditioning energy consumption by 10% to 34.7% (De Cristo et alii, 2025).

The adoption of permaculture principles and agroecological design – through agricultural systems that mimic natural ecosystems, companion planting, windbreak hedges, and buffer strips – can further optimise the ecological efficiency of the urban landscape and strengthen the overall resilience of the built environment (Vacanti and Leonardi, 2024). Rediscovering traditional agroecological practices as innovation (Berkes, 2008; Barthel, Folke and Colding, 2010) – such as vegetative buffer zones and windbreak barriers – is quietly reshaping the urban fabric and allowing cities to grow in harmony with nature through practices that are not merely technical solutions, but a language of reconciliation with the land.

Participatory agriculture and agroecology in the urban realm are also manifested through community and domestic practices that promote crop diversification and collective resource management. Like hidden lifelines, they quietly strengthen the built environment's resilience.

Methodological approach | Within this framework, characterised by a wide variety of solutions and techniques, this contribution adopts a qualitative, comparative, and interdisciplinary approach to urban agriculture, aimed at investigating the potential of the practices mentioned above as levers for the socio-environmental resilience of cities. The methodological process adopted by the research is based on three main components: 1) Critical analysis of the international scientific literature on food-city relationships, with attention to the most recent developments in urban sustainability, participatory design, food policy, and social innovation; 2) Comparative study of international case studies selected on the basis of their capacity to integrate environmental, social, and technological dimensions within urban agriculture projects; 3) The elaboration and application of 'demand maps' as a tool that makes it possible to visualise the correspondence between local needs and design services.

The methodological framework was integrated with a wireless sensor module for precision agriculture, in order to detect humidity, temperature, pH, and salinity, supported by LoRa or Zigbee networks; dashboards for real-time visualisation; and irrigation and phytotechnical automation systems based on environmental data, featuring remote activation, alarms for water shortages, and UAV integration for targeted interventions. This integrated approach allows observing urban agriculture not only as a technical-functional device but also as a relational and cultural infrastructure. The proposed methodology thus paves the way for a replicable operational model that supports decision-makers, designers, and communities in defining more equitable, participatory, and sustainable strategies.

Case studies | The comparative analysis of case studies focuses on five international urban agriculture projects selected for their capacity to integrate multidisciplinary aspects. Eco Soul Ericeira (Portugal, 2016) is an urban agriculture, creative tourism, and social inclusion project developed with a sys-





Figg. 8, 9 | Beekeeping and honey production (source: blog.naver.com, 2014).



Fig. 10 | Brooklyn Grange – A Rooftop Farm in New York (source: au.toa.st, 2021).

temic approach and with the involvement of the local community. The demand map is used to identify latent needs, in line with Delgado's reflections on constraints and opportunities for public food policies in Portugal (Delgado, 2021). Eco Soul Ericeira is a guesthouse, but offers much more than simple accommodation: it is a pioneering project that blends bioarchitecture, permaculture, and sustainable tourism. The guesthouse was designed according to bioclimatic principles, with passive ventilation systems, rainwater harvesting, and renewable energy (Fig. 2). The initiative integrates a mini ecological garden and areas for aromatic herbs to promote local food production and environmental awareness among guests (Fig. 3).

Istra Inspirit (Croatia, 2012) is a project with a high level of involvement from a young user base and a focus on social cohesion, aiming to foster regenerative cultural tourism that enhances heritage through immersive experiences and local storytelling. Although it is not an agricultural initiative in the strict sense, the project involves family-run farms and local producers, integrating the food dimension with the cultural one (Langella, Russo and Scalisi, 2024; Fig. 4). Sustainability emerges from the synergy among local actors, students, artisans, and rural communities in a model of territorial co-creation.

OrtoCollettivo in Genova (Italy, 2014) involves the reuse of abandoned spaces for shared gardens aimed at young people, migrants, and vulnerable individuals. It represents the most extensive urban garden in Italy, originating from a major land-reclamation project (around 7 hectares of hillside terrain reclaimed from disused areas) carried out by the association Comitato4Valli under the slogan 'zero waste'. The project promotes social inclusion, environmental education, and permaculture, engaging migrants, young people, and disadvantaged groups (Fig. 5). A technological dimension is present in water management and land mapping, while the community-based approach strengthens social cohesion.

MUAI – Michigan Urban Agriculture Initiative (Detroit, USA, 2012) is based on the adaptive reuse of the built environment with a focus on community and education. MUAI is an innovative 'agrihood', where urban agriculture is the core of an urban regeneration project that integrates education, sustainability, and community development, with gardens, orchards, apiaries, and spaces for food processing (Fig. 6). The technological component is visible in the design of the agricultural campus and in the use of green technologies for soil and water management. Brooklyn Grange (New York, USA, 2010), with over 200,000 square meters of cultivated surface in the United States, is the largest rooftop urban agriculture project, combining economic and environmental sustainability with organic practices.

The project integrates intensive rooftop agriculture and ecological education, producing over 36 tons of organic vegetables per year (Fig. 7). The technological dimension is central because advanced drainage systems, stormwater management, and mitigation of the urban heat island effect are foundational elements of the proposal. The project offers a community-supported agriculture program, uses organic cultivation methods, and reduces chemical use. On the one hand, it sells products directly to residents and also keeps bees to produce honey (Figg. 8, 9); on the other hand, it interacts with the community through various educational and environmental activities.

Across the different cases analysed, technological approaches also emerge such as modular micro-farms and low-impact hydroponic systems, small closed-loop units (for growing salads and herbs in indoor spaces) equipped with LED lighting and automatic microclimate control; and intelligent water systems with app-controlled drip irrigation, rainwater collection and reuse, and constructed wetlands for phytoremediation, which contribute to guaranteeing resilience under drought scenarios (as in the case of Brooklyn Grange, where the integration of variable-spectrum LEDs and climate sensors enables optimised production management).

The MUAI project adopts app-controlled drip irrigation systems with rainwater collection and reuse, contributing to water security in vulnerable urban contexts. Eco Soul Ericeira and OrtoCollettivo also showcase hybrid solutions that combine phytoremediation via constructed wetlands with intelligent water resource management and agroecological practices. Istra Inspirit, while not adopting direct agricultural technologies, integrates digital tools for territorial storytelling and the valorisation of local products, contributing to cultural sustainability and food traceability. Table 2 presents an analysis of the case studies across five criteria: social inclusiveness, design innovation, environmental impact, replicability, and public engagement.

The comparative analysis of the selected case studies shows how urban agriculture, when designed in an integrated and contextual way, responds to social, environmental, and cultural needs, contributing to SDG 6, 7, 8 and, transversally, to SDG 11, 12, and 13. In all cases, it fosters social inclusion: MUAI supports youth, the elderly, women, and migrants (Santo, Palmer and Kim, 2016), while OrtoCollettivo promotes intergenerational cohesion; Istra Inspirit integrates tourism and creative storytelling (Zehr Gantz et alii, 2025) and Brooklyn Grange valorises urban rooftops with organic practices, even though its replicability is limited (Fig. 10). All projects reduce ecological footprint through water management, recycling, and short supply chains, and Eco Soul integrates biophilia and environmental education (Clinton et alii, 2018; Thebo, Drechsel and Lambin, 2014). In general, strong governance and the presence of Living Labs encourage replicability. However, the projects still face various obstacles, including outdated or non-updated regulations, poor interoperability, intermittent funding, cultural resistance, and limited access to land. These barriers can be mitigated through multilevel governance, continuous financing, and awareness campaigns.

Methodological proposal and guidelines | In light

of the case studies, an operational framework is proposed for integrating 'demand maps' into decision-making, design, and management processes for urban agriculture, in line with Delgado's (2021) observations that highlight the need for integrated public strategies to promote agriculture as a structural component of urban food policies.

'Demand maps' translate community needs into strategic objectives for urban planning, using GIS methods and multi-criteria analysis similar to those suggested by Marqués-Pérez and Segura (2018) and Weerakoon (2014) to assess the suitability of particular areas for agricultural production. Demand maps thus become a policy design tool that can be adapted to different contexts and complex urban dynamics. The framework is based on a participatory approach that involves citizens, stakeholders, and designers throughout all phases. It makes use of techniques such as Figure-Ground Plans (Tóth and Timpe, 2017) which, on the one hand, allow community needs to be integrated into the design of agricultural spaces – improving accuracy, consensus, and sense of ownership – and, on the other hand, support decision-makers at multiple levels through digital dashboards and aggregated reports for administrators, planners, and investors. The Supply-Demand model enables adaptive strategies even in contexts with demographic decline or limited resources (Takatori, Zheng and Ullah, 2024), encouraging rapid, transparent choices consistent with urban sustainability objectives.

The operational guidelines outline clear phases: mapping needs, co-design sessions, prototyping, pilot implementation, and iterative evaluation. Public Administration, citizens, and designers participate through workshops, interviews, and focus groups. The framework is adaptable across sectors such as education, health, and urban regeneration, enabling customisation of indicators and performance metrics.

The adoption of enabling technologies strengthens effectiveness and resilience: moisture and pH sensors connected to LoRa networks and digital dashboards update the demand map in real time; photovoltaic systems with storage and local smart grids reduce costs and emissions; climate sensors, adjustable-spectrum LED lighting, and AI algorithms optimise production in greenhouses through predictive controls. In summary, integrating participatory methodological principles, technological tools, and multilevel governance promotes replicability, scalability, and resilience in urban agriculture, ensuring a data-driven approach that remains flexible to community needs.

Methodology for constructing the 'demand map' | The construction of the urban demand map is articulated in a structured methodological sequence of six phases, ranging from data collection to monitoring of results. This approach enables integration of quantitative and qualitative dimensions to produce an accurate and dynamic representation of territorial needs related to urban agricultural production and associated ecosystem services.

The first phase consists of collecting baseline data, which is essential for characterising the study area's territory and socioeconomic conditions. The data comes from various sources: questionnaires addressed to residents, aimed at understanding consumption habits, food needs, and willingness to participate; statistics on per capita consumption, helpful in quantifying the average food requirements of the population; demographic and socioeconomic data, extracted from open access sources or official censuses; GIS surveys of free and available areas, used to identify potential arable land or spaces for urban horticulture. The integration of these datasets enables the construction of a coherent, standardised, and georeferenced information base.

The second phase (data processing) involves aggregating the data and referring it to the territory under examination, which is divided into square cells measuring 250 × 250 meters, a spatial unit chosen to ensure a good balance between territorial detail and map readability. For each cell, food requirements (measured in kg of vegetables per year), agricultural energy demand (kWh per year), and the presence and type of existing or potential agricultural services

N°	Case Studies	Social Inclusivity	Design Innovation	Environmental Impact	Replicability	Active Participation	Hot-spot → Action	Type of Agriculture	Plant Size	Governance and Stakeholders
1	Eco Soul Ericeira (Portugal)	Strong integration with the local community and engagement of guests in agricultural and educational activities	Systemic approach combining biophilic architecture, permaculture, and sustainable tourism	Rainwater harvesting, ecological gardens, and reduced energy consumption	Medium replicability, tied to the specific tourism context	Direct involvement of residents and visitors in workshops and agricultural practices	Priority for small-scale urban garden expansion	Community garden + ecological hotel garden	Small	Hotel management + local community
2	Istra Inspirit (Croatia)	Youth inclusion and cultural heritage enhancement through immersive experiences	Innovative use of storytelling and performing arts for territorial regeneration	Moderate environmental impact, focusing more on cultural than ecological sustainability	Highly replicable model in other cultural contexts	Active involvement of students, artisans, and rural communities	Establish educational gardens with participatory workshops	Cultural-agricultural garden	Small / Medium	Local NGO + schools + municipality
3	OrtoCollettivo (Genoa, Italy)	Inclusion of migrants, youth, and vulnerable people through shared gardens	Creative reuse of abandoned land and application of permaculture principles	Increased urban biodiversity, sustainable water management, and reduction of urban heat islands	High replicability thanks to the participatory model and institutional support	High level of daily community participation	Expansion of shared gardens into new cells	Community garden + permaculture	Medium	Association + volunteers + municipality
4	MUAI – Michigan Urban Agriculture Initiative (USA)	Empowerment of marginalised neighbourhoods, food access for vulnerable communities	Agrihood concept integrating agriculture, education, and urban development	Improved soil quality, sustainable water management, and creation of green spaces	Highly replicable as an urban regeneration model	Direct participation of volunteers, residents, and university students	Scale pilot gardens and training programs in underserved neighbourhoods	Community gardens + educational farms	Medium	University + NGO + local residents
5	Brooklyn Grange (New York, USA)	Opportunities for inclusion through local collaborations, educational programs	Large-scale use of urban rooftops for organic agricultural production	Production of over 36 t/year of vegetables, rainwater management, and reduction of the urban heat island effect	Production of over 36 t/year of vegetables, rainwater management, and reduction of the urban heat island effect	Strong engagement through events, courses, and guided tours	Identify rooftop cells with highest demand for urban agriculture	Vertical rooftop farm	Large	Partnership public-private + community programs

Tab. 2 | Case Study Comparison by Selected Criteria (credit: L. Farahbakhsh, 2025).

are assessed. This processing produces an initial spatial representation of demand distribution, which is then refined using socio-demographic indicators and accessibility parameters.

The third phase involves creating a thematic map and performing a spatial analysis of the results. Using GIS software, cells with demand values above a reference threshold ('hot-spots') are identified and compared with the distribution of existing agricultural services. The analysis produces several outputs: a map of demand hotspots; a comparison of current and potential service levels; and an accessibility index calculated from distance to existing agricultural areas or vegetable gardens. At the same time, a sensitivity analysis is conducted to assess the robustness of the results by varying specific parameters (e.g., the radius of influence between 300 and 500 meters or a 10% increase in population).

The fourth phase concerns a fundamental component of the methodology: participatory validation of the results. Through focus groups, online surveys, and interviews with local associations and stakeholders, qualitative feedback is collected on the perception of needs and the use of agricultural spaces. The comparison between 'perceived demand' (i.e., the needs expressed directly by residents) and 'modelled demand' (i.e., the results produced by the GIS model and quantitative indicators) makes it possible to verify the consistency of the model with the expectations and priorities expressed by citizens, thus improving the credibility and usability of the maps produced. The fifth phase concerns the demand map, which is not simply a descriptive tool but a knowledge base for operational planning. Cells with high demand are considered a priority for new urban agriculture initiatives or for enhancing existing services. In this phase, decisions are made regarding: the location of new community gardens or micro-farms; the allocation of economic and infrastructural resources; the most appropriate type of intervention (soil gardens, hydroponic systems, agrivoltaics, training or educational programs). This analytical-design translation allows the map to be directly linked to policy and governance choices.

The sixth phase involves defining a monitoring plan based on key performance indicators to assess the effectiveness of actions over time. The leading indicators include: the percentage of food requirements covered locally; self-produced agricultural energy (kWh per year); CO_2 emissions avoided (t CO_{2eq}); and the level of community participation (number of users involved or activities carried out). Monitoring is carried out using digital tools such as GIS dashboards, smart meters, and shared databases, with updates issued annually or semi-annually, depending on data availability.

This methodological structure guarantees transparency, replicability, and scientific robustness, laying the foundations for urban planning based on data, participation, and verifiable metrics.

Synergies with the SDGs and transferability | Pradhan et alii (2024) analysed over 1,450 publications to map the impact of urban agriculture on 17 SDGs and 142 targets, identifying significant impacts on food security, social inclusion, climate mitigation, and urban biodiversity. However, the effectiveness of initiatives varies depending on the practices adopted and the level of local political support. The study also highlights different trade-offs between urban aesthetic requirements, the integration of energy infrastructure, and competition for land use. These trade-offs can be alleviated through participatory and multi-stakeholder planning processes to balance individual, collective, functional, and environmental interests. The analysis of urban agriculture practices highlights their concrete contribution to achieving several SDGs. In particular: water management, through phytoremediation and reuse of stormwater, reduces the load on urban systems, improving sustainability and resilience (Clinton et alii, 2018); agrivoltaic systems on urban rooftops increase land-use efficiency, lower CO_2 emissions, and integrate energy and food production; biodigesters transform organic waste into biogas, closing the waste loop; finally, smart grids and microgrids generate new job opportunities, creating a direct link between sustainable innovation and local development.

On the social and economic level, participatory horticulture and micro-entrepreneurship foster inclusion and skills development in marginalised contexts (Opitz et alii, 2016); urban gardens and green areas mitigate heat islands and absorb carbon dioxide, supporting SDG 11 and 13; short supply chains and local production support SDG 2 and 12, promoting access to healthy food and responsible consumption.

A critical limitation concerns the interdependence among the SDGs: technological and infrastructural benefits depend on community involvement, governance, and the continuity of political and financial support. Only under these conditions can urban agriculture become an integrated socio-ecological laboratory, promoting resilience and sustainability on multiple levels. This proposal adopts a 'pilot-before-scale' approach (Brown and Wyatt, 2010) within Design Thinking for Social Innovation, as a principle of transferability to be validated through a minimum functioning system and then expanded. This method calls for experimenting with a Minimum Viable System (MVS) – a small-scale territorial or social prototype – capable of testing the effectiveness of a solution in terms of environmental, economic, and participatory impact, before any possible expansion at the urban scale (von Wirth et alii, 2018).

Transferability does not mean transferring static configurations; instead, it means reusing the combination of 'functional modules + governance modules + financial modules'. The key to transferability lies in technological potential and data availability (monitoring and LCA), in social value (participation and co-governance), and in institutional capacity (multilevel access and performance orientation). Only by interpreting urban agriculture as ecological infrastructure within planning and fiscal instruments can synergistic effects be amplified from the project scale to the urban scale.

Conclusions | Through the lens presented here, the essay redefines urban agriculture as a systemic infrastructure that integrates ecological regeneration, social inclusion, and technological innovation, moving beyond the view of it as a process aimed exclusively at food production. The 'demand maps', proposed as a methodological tool, aim to connect community needs with sustainable design strategies, promoting urban agriculture as a lever for resilient city transformation.

The case studies show how a participatory, data-driven approach can coordinate food production, ecological services, and social cohesion, generating multiple benefits by mitigating the urban heat island effect, strengthening biodiversity, empowering vulnerable communities and marginalised individuals (Giachetta, Buondonno and Canepa, 2025), and reinforcing cultural identity. The scalability of projects is strengthened by integrating innovative practices such as precision agriculture technologies, intelligent water management, photovoltaic agriculture, and closed-loop energy systems. Operationally, these practices optimise resources; strategically, they align with the SDGs, fostering synergies among clean energy, sustainable cities, food security, and social inclusion. Despite the potential of 'demand maps' as decision-making tools for urban agriculture, several factors condition their development. First, the quality and granularity of available data represent a significant limitation: official statistics, municipal open data, or cadastral information often have limited spatial resolution, infrequent updates, or gaps in micro-urban areas, reducing the precision of identified hot-spots. This issue can be mitigated by integrating multiple sources and combining quantitative data with qualitative assessments from citizens, local associations, and on-site observations, or by using uniform spatial aggregation strategies.

A further barrier concerns the weak representation of informal markets, through which part of the food or energy demand is met. Local farmers' markets, cooperative networks, or community exchanges that are not recorded in official datasets risk underestimating actual demand. The collection of qualitative data through focus groups, interviews, and targeted questionnaires enables integration of this information and a more realistic estimate of effective demand. The handling of sensitive data – such as energy consumption recorded by smart meters or individual socio-demographic information – imposes privacy constraints that can limit access to helpful information. The adoption of anonymisation and data-aggregation protocols, together with data-sharing agreements with managers, is an effective strategy for safeguarding privacy while enabling accurate analysis.

Regulatory constraints are also a relevant factor: regulations governing the use of rooftops, public land, and agricultural areas can limit the implementation of the interventions suggested by the map, as well as the installation of hydroponic greenhouses or agrivoltaic systems. These obstacles can be overcome through preliminary verification with municipal technical offices, small-scale experiments, and pilot prototypes in already authorised areas.

Finally, socioeconomic and cultural barriers cannot be ignored, such as limited familiarity with urban agricultural practices, low civic participation, and cultural resistance, which can affect the implementation and effectiveness of interventions. The integration of training programs, participatory workshops, and awareness initiatives can encourage widespread adoption of the proposed solutions, making the map not only an analytical tool but also an operational and socially accepted one.

In summary, although the demand map is a powerful tool to guide urban agriculture interventions, awareness of methodological, technical, regulatory, and social limits is essential. Implementing targeted strategies for data integration, privacy protection, pilot testing, and active community engagement can abate most barriers, thereby enhancing the robustness and replicability of the tool. In this way, urban agriculture – understood as a civic and cultural practice – renews relationships between people and nature, contributing to a more vital urban fabric.

Notes

1) For further information, see: un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html [Accessed 10 September 2025].

2) In this context, the city or neighbourhood is divided into portions of territory called cells. Each cell measures 250 meters on a side, covering an area of 62,500 square meters, i.e., about 6.25 hectares. If a neighbourhood is 2 km × 2 km, it can be divided into 16 cells; each cell represents a portion of the neighbourhood to be analysed.

References

An, S., Kim, S. and Kim, S. (2020), "Necessity of the needs map in the service design for smart cities", in *Frontiers in Psychology*, vol. 11, article 202, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00202 [Accessed 25 September 2025].

Abu Qadourah, J. (2024), "Energy efficiency evaluation of green roofs as a passive strategy in the Mediterranean climate", in *Results in Engineering*, vol. 23, article 102519, pp. 1-8. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102519 [Accessed 25 September 2025].

Barthel, S., Folke, C. and Colding, J. (2010), "Social-ecological memory in urban gardens – Retaining the capacity for management of ecosystem services" in *Global Environmental Change*, vol. 20, issue 2, pp. 255-265. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.01.001 [Accessed 25 September 2025].

Basso, S., Bisiani, T., Martorana, P. and Venudo, A. (2023), "Vertical farm – Dalle forme dell'agricoltura nuove architetture e città | Vertical farm – New architectures and cities from the forms of agriculture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 141-152. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/13122023 [Accessed 25 September 2025].

Berkes, F. (2008), *Sacred Ecology*, Routledge, New York. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9780203928950 [Accessed 25 September 2025].

Brown, T. and Wyatt, J. (2010), "Design Thinking for Social Innovation", in *Stanford Social Innovation Review*, vol. 8, issue 1, pp. 30-35. [Online] Available at: myweb.uiowa.edu/dlgould/plugin/documents/Design_Thinking_for_Social_Innovation.pdf [Accessed 25 September 2025].

Casiddu, N., Burlando, F. and Chen, B. (2024), "Human-de-centred Design – Verso una (nuova) era della sofferenza | Human-de-centred Design – Towards a (new) era of suffering", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 242-249. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16212024 [Accessed 25 September 2025].

Clinton, N., Stuhlmacher, M., Miles, A., Uludere Aragon, N., Wagner, M., Georgescu, M., Herwig, C. and Gong, P. (2018), "A Global Geospatial Ecosystem Services Estimate of Urban Agriculture", in *Earth's Future*, vol. 6, issue 1, pp. 40-60. [Online] Available at: doi.org/10.1002/2017EF000536 [Accessed 25 September 2025].

De Cristo, E., Evangelisti, L., Barbaro, L., De Lieto Vollaro, R. and Asdrubali, F. (2025). "A Systematic Review of Green Roofs' Thermal and Energy Performance in the Mediterranean Region", in *Energies*, vol. 18, issue 10, article 2517, pp. 1-38. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en18102517 [Accessed 25 September 2025].

Delgado, C. (2021), "Agricultura urbana em Portugal – Constrangimentos e oportunidades para uma política pública alimentar", in *Revista Portuguesa de Estudos Regionais*, vol. 53, pp. 109-126. [Online] Available at: doi.org/10.59072/rper.vi53.185 [Accessed 25 September 2025].

Ghahremani, V., Noori, O., Deihimfard, R. and Veisi, H. (2024), "Understanding resilience – Contributions of urban agriculture to the resilience of urban landscapes", in *Urban Agriculture and Regional Food Systems*, vol. 9, article e70003, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1002/uar2.70003 [Accessed 25 September 2025].

Giachetta, A., Buondonno, L. and Canepa, M. (2025), "Cohousing per donne vittime di violenza – Un progetto Interreg per l'equità di genere | Cohousing for women victims of violence – An Interreg project for gender equality", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 242-255. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17162025 [Accessed 25 September 2025].

Grochulska-Sałak, M., Nowysz, A. and Tofiluk, A. (2021), "Sustainable Urban Agriculture as Functional Hybrid Unit – Issues of Urban Resilience", in *Buildings*, vol. 11, issue 10, article 462, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/buildings11100462 [Accessed 25 September 2025].

Langella, C., Russo, D. and Scalisi, F. (2024), "Design e Gastrofisica – Innovazione e sostenibilità dei sistemi alimentari multisensoriali | Design and Gastrophysics – Innovation and sustainability of multisensory food systems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 250-277. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16222024 [Accessed 25 September 2025].

Marqués-Pérez, I. and Segura, B. (2018), "Integrating social preferences analysis for multifunctional peri-urban farming in planning – An application by multi-criteria analysis techniques and stakeholders", in *Agroecology and Sustainable Food Systems*, vol. 42, issue 9, pp. 1029-1057. [Online] Available at: doi.org/10.1080/21683565.2018.1468379 [Accessed 25 September 2025].

Massari, S., Galli, F., Colombo, L. and Goretti, G. (2025), "Divinfood, NUCs and agrobiodiversità – Food Design Agile e Living Labs per l'innovazione sostenibile | Divinfood, NUCs and agrobiodiversity – Agile Food Design and Living Labs for sustainable innovation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 398-411. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17282025 [Accessed 25 September 2025].

Mensah, J. K. (2023), "Urban agriculture, local economic development and climate change – Conceptual linkages", in *International Journal of Urban Sustainable Development*, vol. 15, issue 1, pp. 141-151. [Online] Available at: doi.org/10.1080/19463138.2023.2207523 [Accessed 25 September 2025].

Nath, P. (2021), *The Basics of Human Civilization – Food, Agriculture and Humanity – Volume I – Present Scenario*, Taylor & Francis Group, Milton.

Opitz, I., Berges, R., Piorr, A. and Krikser, T. (2016), "Contributing to food security in urban areas – Differences between urban agriculture and peri-urban agriculture in the Global North", in *Agriculture and Human Values*, vol. 33, pp. 341-358. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s10460-015-9610-2 [Accessed 25 September 2025].

Orsini, F., Frasnetti, E., D'Ostuni, M., Zauli, I., Carotti, L., Picca, G. and Pennisi, G. (eds) (2022), *UrbanFarm2022 – Building multi-disciplinary knowledge for urban green regeneration and sustainable food systems, Bologna, Italy*, Alma Mater Studiorum University of Bologna, Bologna. [Online] Available at: dx.doi.org/10.6092/unibo/amsacta/6892 [Accessed 25 September 2025].

Orsini, F., Pennisi, G., Michelon, N., Minelli, A., Bazzocchi, G., Sanyé-Mengual, E. and Gianquinto, G. (2020), "Features and Functions of Multifunctional Urban Agriculture in the Global North – A Review", in *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 4, article 562513, pp. 1-27. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fsufs.2020.562513 [Accessed 25 September 2025].

Pradhan, P., Subedi, D. R., Dahal, K., Hu, Y., Gurung, P., Pokharel, S., Kafle, S., Khatri, B., Basyal, S., Gurung, M. and Joshi, A. (2024), "Urban agriculture matters for sustainable development", in *Cell Reports Sustainability | A Cell Press Journal*, vol. 1, issue 9, article 100217, pp. 1-13. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.crsus.2024.100217 [Accessed 25 September 2025].

Rodríguez, A., Jacome-Polit, D., Santandreu, A., Paredes, D. and Álvaro Pinto, N. (2022), "Agro-ecological urban agriculture and food resilience – The Case of Quito, Ecuador", in *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 6, article 550636, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fsufs.2022.550636 [Accessed 25 September 2025].

Siani, M. F. (2020), "Urban farming, una soluzione per lo sviluppo sostenibile delle città", in *Authorea*, 23/10/2020. [Online] Available at: doi.org/10.22541/au.160349192.28203392/v1 [Accessed 25 September 2025].

Santo, R., Palmer, A. and Kim, B. (2016), *Vacant lots to vibrant plots – A review of the benefits and limitations of urban agriculture.* [Online] Available at: clf.jhsph.edu/sites/default/files/2019-01/vacant-lots-to-vibrant-plots.pdf [Accessed 25 September 2025].

Takatori, C., Zheng, Y. and Ullah, A. (2024), "Developing a Spatial Design Framework Based on the Supply-Demand of Urban Agriculture in the Context of Depopulation in Japan – A Case Study from the Kitanagoya City", in *Journal of Urban Planning Review*, vol. 11, pp. 208-226. [Online] Available at: doi.org/10.14398/urpr.11.208 [Accessed 25 September 2025].

Thebo, L., Drechsel, P. and Lambin, E. F. (2014), "Global assessment of urban and peri-urban agriculture – Irrigated and rainfed croplands", in *Environmental Research Letters*, vol. 9, issue 11, article 114002, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1088/1748-9326/9/11/114002 [Accessed 25 September 2025].

Tóth, A. and Timpe, A. (2017), "Exploring Urban Agriculture as a Component of Multifunctional Green Infrastructure – Application of Figure-Ground Plans as a Spatial Analysis tool", in *Moravian Geographical Reports*, vol. 25, issue 3, pp. 208-218. [Online] Available at: doi.org/10.1515/mgr-2017-0018[Accessed 25 September 2025].

UN-Habitat (2020), *The Value of Sustainable Urbanization – World Cities Report 2020*. [Online] Available at: unhabitat.org/sites/default/files/2020/10/wcr_2020_report.pdf [Accessed 25 September 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development.* [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication [Accessed 25 September 2025].

Vacanti, A. and Leonardi, C. (2024), "Tecnologia, energia e tempo – Percorsi sperimentali per il design di tecnologie appropriate | Technology, energy, and time – Experimental paths for the design of appropriate technology", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 316-323. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15262024 [Accessed 25 September 2025].

Villavicencio-Valdez, G. V., Jacobi, J., Schneider, M., Altieri, M. A. and Suzan-Azpiri, H. (2023), "Urban agroecology enhances agrobiodiversity and resilient, biocultural food systems – The case of the semi-dryland and medium-sized Querétaro City, Mexico", in *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 7, article 1066428, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fsufs.2023.1066428 [Accessed 25 September 2025].

Visser, O., Hulsink, W., van der Schans, J. W. and van Lammeren, I. (2023), "Building Urban Resilience through Urban Agriculture? Responses to the pandemic and sustainability crises by urban farms", in *International Institute of Social Studies*, 21/10/2023. [Online] Available at: iss.nl/en/engagement-impact/iss-hague/researching-impacts-covid-19-hague/building-urban-resilience-through-urban-agriculture [Accessed 25 September 2025].

von Wirth, T., Fuenfschilling, L., Frantzeskaki, N. and Coenen, L. (2018), "Impacts of urban living labs on sustainability transitions – Mechanisms and strategies for systemic change through experimentation", in *European Planning Studies*, vol. 27, issue 2, pp. 229-257. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09654313.2018.1504895 [Accessed 25 September 2025].

Weerakoon, K. G. P. K. (2014), "Suitability Analysis for Urban Agriculture Using GIS and Multi-Criteria Evaluation", in *IJAST | International Journal of Agriculture Science and Technology*, vol. 2, issue 2, pp. 69-76. [Online] Available at: researchgate.net/publication/277364137 [Accessed 25 September 2025].

Zehr Gantz, S., Massari, S., McDonagh, D. and Vokoun, J. (2025), "Affrontare l'insicurezza alimentare – Empatia e Design Thinking per l'apprendimento trasformativo | Addressing food insecurity – Leveraging empathy and Design Thinking to achieve transformative learning", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 17, pp. 384-397. [Online] Available at: doi.org/10.69143/2464-9309/17272025 [Accessed 25 September 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 344-357
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18212025

Article Info

Received	08 September 2025
Revised	18 October 2025
Accepted	19 October 2025
Published	30 December 2025

RE-SHAPING FASHION IN ITALY
Sistemi circolari, scenari phygital e formazione informale

RE-SHAPING FASHION IN ITALY
Circular systems, phygital scenarios, and informal education

Paolo Franzo, Andrea Quartu, Margherita Tufarelli

Abstract

Il contributo analizza le trasformazioni del sistema moda italiano alla luce della doppia transizione digitale ed ecologica, esplorando nuove traiettorie per rigenerare un settore in difficoltà e ripensare il Made in Italy come sistema dinamico. Lo studio combina mappature territoriali e interviste a stakeholder, indagando tre direttrici principali: i sistemi circolari, che integrano pratiche di riciclo e simbiosi industriale; gli scenari phygital, dove la contaminazione tra artigianato e digitale ridefinisce i processi progettuali e produttivi; la formazione informale, che ibrida contesti formativi e produttivi. L'analisi dei casi studio mostra come queste traiettorie generino innovazioni strutturali, nuove competenze e forme di conoscenza diffusa, contribuendo al lavoro dignitoso e alla crescita sostenibile in linea con l'Agenda 2030, rivelando il Made in Italy come laboratorio interdisciplinare di sviluppo.

The paper examines the transformations occurring within the Italian fashion system in the context of the twin digital and ecological transition. It explores emerging trajectories aimed at regenerating a struggling sector and rethinking Made in Italy as a dynamic and adaptive system. The research adopts a qualitative mixed-method approach, combining territorial mapping with stakeholder interviews. Three main trajectories are investigated: circular systems, which integrate practices of recycling and industrial symbiosis; phygital scenarios, where the encounter between craftsmanship and digital technologies redefines design and production processes; and informal education, which bridges learning and manufacturing contexts. The analysis of the case studies shows how these trajectories foster structural innovation, new skills, and forms of distributed knowledge. Together, they contribute to decent work and sustainable growth in line with the UN 2030 Agenda, positioning Made in Italy as an interdisciplinary laboratory for sustainable development.

Keywords

gemelli digitali, reti territoriali, apprendimento ibrido, conoscenza incarnata, cicli di risorse

digital twins, territorial networks, hybrid learning, embodied knowledge, resource loops

Paolo Franzo, PhD, is a Researcher at the Department of Architecture, University of Florence (Italy). His research focuses on future practices in fashion design, with particular attention to innovative materials, production chains, and the relationship between craftsmanship and technology in a vision of human, social, and environmental sustainability. E-mail: paolo.franzo@unifi.it

Andrea Quartu, PhD Candidate, conducts research at the DIDA, University of Florence (Italy) and the Department of Physics of the University of Calabria (Italy). His research in fashion design studies the pre-concept phase as an archetype of fashion design and a practice of self-reflection, analysed in light of ongoing technological transformations and the growing integration of artificial intelligence. E-mail: andrea.quartu@unicampania.it

Margherita Tufarelli, PhD, is a Researcher at the Department of Architecture, University of Florence (Italy). Her research investigates the impact of digital and sustainable transitions on fashion design, examining how these transform processes, practices, and imaginaries within the fashion industry, with a particular focus on the intersections between design cultures and production systems. E-mail: margherita.tufarelli@unifi.it



Il settore della moda in Italia sta attraversando un momento di grande trasformazione, plasmato dalle dinamiche convergenti della transizione digitale ed ecologica che ridefiniscono i sistemi di produzione, le catene del valore e le culture del design (Niinimäki et alii, 2020). Lo scenario evolutivo attivato dalla doppia transizione ha un profondo impatto sulla moda che, nel perseguire gli obiettivi dell'Industria 4.0 (Casciani, Chkanikova and Pal, 2022), e sempre più quelli dell'Industria 5.0, sperimenta la contaminazione tra pratiche creative e produttive e tecnologie abilitanti (Särmäkari and Vänskä, 2022). In questo panorama ibrido emergono nuovi modi di considerare la moda e il Made in Italy capaci di identificarsi all'interno di una rete in cui lo scambio creativo può essere un motore di crescita e innovazione (Di Dio et alii, 2022).

In tale ottica il contributo si sviluppa a partire da un progetto di ricerca nazionale che coinvolge cinque Università italiane impegnate nella formazione per il settore della moda. La ricerca 'ResHaping made in ITAly (RHITA) – Modelli circolari per il patrimonio e la produzione manifatturiera della moda italiana attraverso l'inclusività digitale e l'innovazione consapevole', in linea con l'SDG 8 dell'Agenda 2030 (lavoro dignitoso e crescita economica), persegue due obiettivi principali: in primo luogo esplorare nuove traiettorie finalizzate alla rigenerazione di un settore industriale che, pur avendo storicamente rappresentato una componente essenziale del PIL e dell'identità culturale italiana, manifesta oggi un evidente declino strutturale, aggravato dalla delocalizzazione produttiva e dalle pressioni delle dinamiche finanziarie globali; in secondo luogo sviluppare una comprensione sistemica del cambiamento, con l'intento di riconcettualizzare il Made in Italy come un sistema dinamico e situato, piuttosto che come un marchio di eredità fissa, evidenziando le specificità territoriali, i modelli intersettoriali emergenti e generando, al contempo, occupazione qualificata e crescita inclusiva.

Dopo un'analisi dello stato dell'arte sui temi caratterizzanti la ricerca, vengono identificate e analizzate tre traiettorie trasformative dell'attuale sistema della moda in Italia: sistemi circolari, scenari phygital e formazione informale. Su tali categorie è stato adottato un approccio qualitativo e multiscalare, basato sull'integrazione di una mappatura delle filiere regionali e di video interviste semistrutturate[1] a stakeholder rilevanti (ricercatori, insegnanti, imprenditori, artigiani e operatori istituzionali). Il corpus delle interviste è stato in seguito analizzato mediante tecniche di text mining implementate in Python, identificando le ricorrenze lessicali più rilevanti (Figg. 1-3).

Le tre categorie sono presentate e analizzate criticamente all'interno di questo contributo tramite l'analisi di una serie di casi studio, rappresentativi di ciascuna traiettoria: la prima traiettoria – indagata attraverso i casi studio Beste e DIFE – analizza l'introduzione di pratiche circolari orientate alla sostenibilità; la seconda – attraverso FutureClo e Temera – indaga la crescente integrazione tra dimensione fisica e digitale nei processi progettuali e produttivi; la terza – analizzando le esperienze di Lanificio Paoletti e ITS MITA Academy – considera la diffusione di forme innovative di formazione che fanno dialogare contesti formativi e spazi produttivi.

Nel complesso questo approccio consente una lettura critica e sistemica delle traiettorie, evidenziando aree di intensificazione e contaminazione, capaci di ridefinire il significato, le pratiche e i valori associati al Made in Italy. Grazie all'intersezione tra design, innovazione tecnologica, sostenibilità ambientale e formazione, lo studio assume un carattere intrinsecamente interdisciplinare, da un lato ampliando la propria rilevanza nella comunità scientifica, dall'altro fornendo un apporto concreto all'attuazione dell'SDG 8 nel contesto italiano.

In definitiva il contributo si configura come un avanzamento significativo per la comunità scientifica, in quanto colma una lacuna nella letteratura integrando prospettive finora trattate separatamente e proponendo un modello analitico replicabile per studiare la trasformazione dei settori manifatturieri tradizionali. Grazie a questa visione olistica e interdisciplinare la ricerca alimenta un dibattito teorico più ampio sulle traiettorie evolutive del Made in Italy e offre una base conoscitiva per future indagini comparate, accrescendo il potenziale impatto del Design e delle discipline connesse nel promuovere lo sviluppo sostenibile, digitale ed educativo.

Stato dell'arte: Re-shaping Fashion | Come indagato da numerosi studiosi (Barile, 2006; Colombi, 2015; Dellapiana, 2022; Fabbri, 2021; Lazzaretti and Oliva, 2022; Mora and Volonté, 2014), il concetto di Made in Italy ha trovato la sua prima definizione nel settore della moda, affermandosi come strumento di lettura del contesto produttivo italiano all'estero. Questo fenomeno si è sviluppato in relazione alla capacità del settore di combinare tradizione artigianale e innovazione stilistica, contribuendo a costruire un'immagine identitaria riconosciuta su scala globale. Tuttavia le caratteristiche e le modalità che si sono formate e consolidate durante il XX secolo e l'inizio del XXI secolo stanno ora varcando le soglie di nuovi territori trasformativi, rendendo necessario implementare una sorta di 'remanufacturing del pensiero' (Barucco, Bulegato and Vaccari, 2020) per tentare di fornire nuove traiettorie e pratiche di riorientamento per gli scenari emergenti.

La manifattura italiana della moda occupa una posizione unica all'interno di queste dinamiche trasformative: storicamente costruita su una combinazione distintiva di specializzazione flessibile, prossimità geografica e conoscenza tacita (Becattini, 2004), è stata per decenni un modello virtuoso di produzione localizzata, integrata e orientata alla qualità; tuttavia le stesse caratteristiche che l'hanno resa una storia di successo – la modularità delle micro-imprese, la segmentazione delle catene di approvvigionamento e la distribuzione informale delle competenze – si stanno ora dimostrando disallineate di fronte alle richieste di tracciabilità, trasparenza e circolarità (Tebaldi, Brun and Bottani, 2022).

In questo contesto le transizioni ecologica e digitale sfidano la manifattura italiana in modo particolarmente profondo. La questione fondamentale non concerne tanto la predisposizione del settore ad accogliere le trasformazioni in atto, quanto piuttosto la definizione del modello di transizione più adeguato alle sue specificità strutturali: una transizione che valorizzi le risorse esistenti del settore – competenze diffuse, cultura materiale, reti di prossimità – riorganizzandole in un nuovo quadro operativo orientato verso forme di innovazione trasformativa radicate nei territori, sostenibili e globalmente competitive. In questo senso la transizione non è solo un processo tecnico o normativo, ma un vero e proprio atto progettuale che richiede visione, consapevolezza e capacità di agire su più livelli: produttivo, culturale e sociale.

Si è condotta una revisione della letteratura per il periodo 2019-2025, in italiano e inglese, utilizzando Scopus e Web of Science come basi primarie, con estensione esplorativa tramite Google Scholar e consultazione mirata di ResearchGate e Academia per preprint e atti non indicizzati; sono state ammesse eccezioni anteriori al 2019 solo per contributi fondativi. Le query booleane hanno combinato termini coerenti con le tre direttrici (scenari phygital, formazione informale, sistemi circolari), ad esempio 'phygital AND fashion', 'digital twin AND fashion design', 'RFID AND traceability', 'industrial symbiosis OR resource loops', 'circular transition AND value chain'.

Da tale revisione emerge che l'adozione di Digital Twin per prototipazione iterativa e progettazione modulare (Casciani, 2023), l'impiego dell'AI per generazione di concept (Mascitti and Paciotti, 2024) e l'integrazione di metaversi nel fashion design (Hajahmadi et alii, 2024) stanno ridefinendo le catene del valore della moda e conseguentemente del Made in Italy. Tuttavia le ricerche dedicate all'applicazione di tali tecnologie mantengono ancora una dimensione prevalentemente operativa; sono poco indagati infatti gli intrecci con i saperi taciti dei Distretti, la cura dei significati attorno all'oggetto di moda e il manifestarsi di figure professionali ibride che accordino saperi artigianali e competenze digitali.

Parallelamente, nel contesto educativo, programmi accademici tradizionali o percorsi di aggiornamento tecnico continuano a essere un punto di riferimento negli studi sulla moda (Vaccari, 2023); restano poco indagate le forme emergenti di formazione ibrida che intrecciano imprese, ricerca e comunità produttive, sperimentazione digitale e scambio intergenerazionale di competenze, tutte pratiche capaci di connettere transizione ecologica, digitale e sapere artigianale attraverso il loro potenziale trasformativo.

Infine la letteratura sull'economia circolare nel tessile-abbigliamento si concentra soprattutto su soluzioni di riciclo a circuito chiuso o su innovazioni di prodotto limitate alla singola impresa (D'Itria, 2023), lasciando in secondo piano le implicazioni di sistema legate alla tracciabilità del lavoro, alla governance di filiera e alla rigenerazione territoriale. Questa lacuna risulta ancor più rilevante alla luce degli impegni internazionali che, entro il 2030, chiedono di incrementare l'efficienza delle risorse nei modelli di consumo e produzione e di disaccoppiare la crescita economica dal degrado ambientale.

Tali speculazioni delineano un quadro frammentato in cui tecnologia, circolarità e formazione sono trattate separatamente. La selezione dei casi studio ha seguito un campionamento intenzionale orientato a impatto innovativo ed eterogeneità di filiera all'interno del contesto italiano. A integrazione si è applicata un'analisi lessicale assistita da Python (tokenizzazione, rimozione di stopword, frequenze e ranking) con successiva visualizzazione vettoriale per la mappatura dei termini rilevanti nelle categorie concettualizzate.

Tuttavia il presente studio evidenzia alcuni limiti intrinseci: l'indagine qualitativa ed esplorativa si basa su un campione intenzionale e non statistico, il che limita la generalizzabilità dei risultati; un ulteriore limite risiede nel focalizzarsi su realtà particolarmente virtuose e innovative, il che potrebbe sottostima-

re le difficoltà che imprese meno avanzate incontrerebbero. Si manifestano inoltre barriere strutturali che frenano la scalabilità delle innovazioni: i lock-in distrettuali e le reti di conoscenza tacita delle micro-imprese inibiscono cambiamenti radicali; gli investimenti iniziali richiesti (retrofit dei macchinari e acquisizione di competenze specialistiche) gravano sulle PMI; persiste un gap di competenze digitali nella forza lavoro; il quadro regolativo della Responsabilità Estesa del Produttore tessile introduce nuovi oneri organizzativi; la carenza di infrastrutture di riciclo e di coordinamento di filiera limita la diffusione delle pratiche virtuose.

Il riconoscimento di tali ostacoli orienta azioni mirate – incentivi economici, programmi di formazione continua e piattaforme collaborative multi-attore – necessarie per abilitare l'adozione su larga scala. Si propone di seguito una lettura sistemica di tali dimensioni del Made in Italy alla luce delle doppie transizioni – ecologica e digitale – che ne stanno ridefinendo le stesse traiettorie.

Sistemi circolari | Nell'ambito della ricerca la traiettoria circolare è stata affrontata come una dimensione di trasformazione sistemica (Barbero and Ferrulli, 2023; Fletcher and Tham, 2019; Whitty, 2021) che investe l'intero assetto produttivo, organizzativo e culturale del Made in Italy. Questo approccio ha orientato l'analisi, spostando l'attenzione dall'adozione di soluzioni puntuali all'esplorazione delle condizioni sistemiche – materiali e immateriali – che consentono o, al contrario, ostacolano l'effettiva integrazione dei principi dell'economia circolare (Kirchherr et alii, 2023; Koszewska, 2018).

Una transizione circolare efficace implica la coprogettazione di prodotti, servizi e infrastrutture lungo l'intero ciclo di vita, con LCA e modelli del tipo Social Product-Service System che riallineano gli incentivi verso durabilità, riuso e intensificazione d'uso (Vezzoli et alii, 2022). In particolare sono stati esaminati i fattori infrastrutturali (ad esempio disponibilità di impianti di smistamento, capacità logistiche), i fattori relazionali (forme di cooperazione tra aziende, autorità locali, reti territoriali) e i fattori normativi (coerenza tra normative nazionali e sovranazionali, sistemi di incentivi, barriere amministrative). In questo paragrafo saranno esaminati i risultati delle interviste con l'azienda Beste per il progetto Beredo e il fornitore di rifiuti DIFE.

Per garantire la confrontabilità con un quadro internazionale, la selezione dei casi si è basata su mappature di filiera e analisi documentale integrate da interviste semi-strutturate; sono stati privilegiati attori con dati verificabili (tracciabilità dei flussi, bilanci di massa, certificazioni / audit), dimensione d'impresa rappresentativa (PMI), ruolo chiaro lungo la catena del valore, maturità organizzativa e sistemi di governance, apertura all'interlocuzione e accessibilità informativa. Entrambi i casi selezionati offrono una prospettiva privilegiata per analizzare modelli di circolarità in grado di ridefinire il ruolo degli attori, le relazioni tra le fasi della catena di approvvigionamento e le logiche organizzative nella transizione ecologica del sistema moda italiano.

L'azienda Beste[2], attiva nel Distretto Tessile di Prato e con una consolidata esperienza nella produzione di tessuti di alta qualità, ha sviluppato il progetto Beredo come piattaforma sperimentale dedicata alla rigenerazione dei rifiuti tessili pre-consumo. L'iniziativa fa parte di una più ampia strategia aziendale volta a promuovere la sostenibilità ambientale, culturale e organizzativa, basata sull'idea che la circolarità debba essere incorporata nei processi a monte, fin dalla progettazione del prodotto e dalla definizione delle filiere (Fig. 4). Beredo si configura come un modello di simbiosi industriale avanzata e, allo stesso tempo, come un sistema di riciclo a ciclo chiuso, in cui i rifiuti generati internamente all'azienda vengono selezionati, rigenerati e reintrodotti nel ciclo produttivo.

Questo approccio consente di mantenere la continuità dei flussi di materiali all'interno della stessa catena del valore, riducendo la dipendenza da input esterni. La verticalizzazione delle competenze

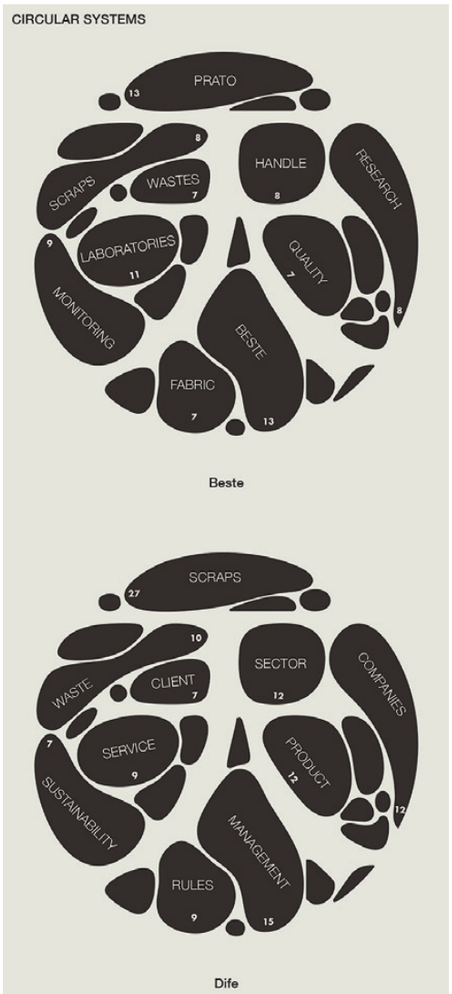


Fig. 1 | Display of the results of the text mining analysis of the Circular Systems category (credit: A. Quartu, 2025).

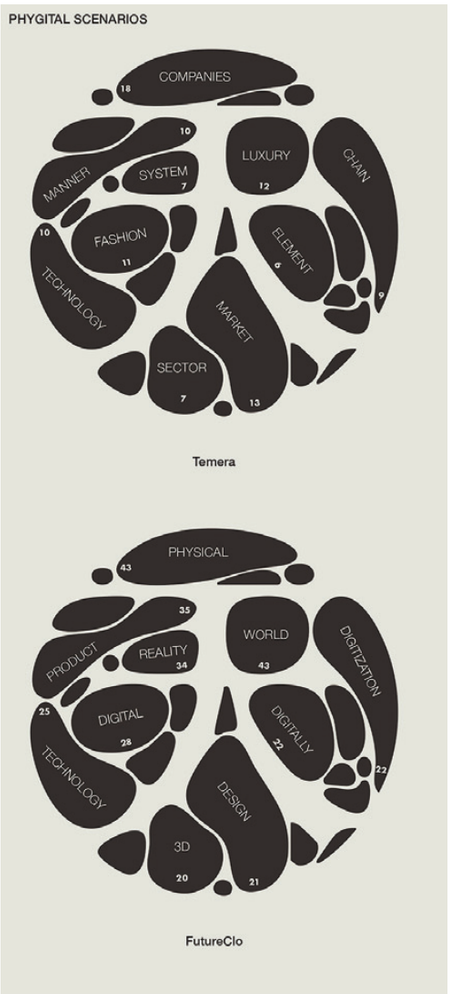


Fig. 2 | Display of the results of the text mining analysis of the Phygital Scenarios category (credit: A. Quartu, 2025).

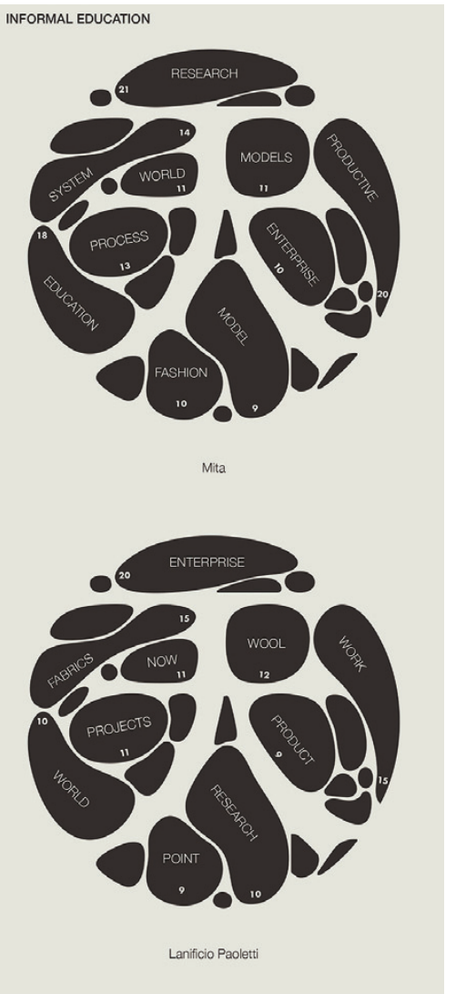


Fig. 3 | Display of the results of the text mining analysis of the Informal Education category (credit: A. Quartu, 2025).

e delle infrastrutture consente a Beste di gestire internamente tutte le fasi del processo, dalla raccolta alla finitura, garantendo elevati standard qualitativi, completa tracciabilità e trasparenza operativa. Questa configurazione rappresenta anche una forma di innovazione organizzativa, orientata alla resilienza e all'autonomia del sistema produttivo. Attraverso Beredo l'azienda ha sviluppato una serie di pratiche che integrano conoscenze tradizionali e tecnologie a basso impatto, come il recupero di fibre nobili dagli scarti di produzione, la creazione di nuovi composti tessili e l'utilizzo di scarti tessili in nuove filiere come quella della carta. Il caso di Beste mostra come la circolarità possa essere integrata strutturalmente nella governance aziendale, generando effetti positivi su diversi livelli (Fig. 5). Attraverso il progetto Beredo propone un laboratorio di innovazione sistemica, ponendosi come riferimento replicabile per altre realtà del Made in Italy impegnate nella transizione ecologica.

A completamento di questa prospettiva produttiva, il secondo caso studio DIFE[3], un fornitore specializzato nella gestione dei rifiuti industriali, ci permette di portare l'attenzione su un segmento spesso trascurato nelle analisi sulla transizione circolare: quello relativo alla raccolta, selezione e smistamento dei rifiuti tessili pre-consumo. La decisione di includere DIFE (Fig. 6) tra i casi studiati risponde alla necessità di riconoscere il ruolo crescente che i gestori dei rifiuti stanno progressivamente assumendo nei processi di transizione ecologica e circolare nel settore della moda, anche se raramente è oggetto di studi approfonditi nei contributi scientifici e progettuali dedicati all'argomento. DIFE funge da nodo intermedio tra le infrastrutture di produzione e quelle di riciclo (Fig. 7), contribuendo alla costruzione di connessioni operative e infrastrutturali indispensabili per l'efficace attuazione delle strategie circolari.

L'intervista condotta ha permesso di evidenziare il valore strategico attribuito alla tracciabilità dei flussi e alla qualità della consegna: elementi considerati essenziali per garantire la funzionalità delle catene di riciclo e la loro conformità agli standard richiesti, sia in termini ambientali che tecnici. Questi casi evidenziano le condizioni abilitanti – infrastrutturali, normative e relazionali – necessarie affinché l'innovazione circolare possa sostenere un'occupazione dignitosa e sostenibile.

Scenari phygital | Un secondo aspetto analizzato riguarda la crescente integrazione tra dimensione fisica e digitale nei processi progettuali e produttivi della moda e il manifestarsi di forme di lavoro ibride. È ormai consolidato come l'attuale espansione tecnologica e l'esponenziale integrazione dell'intelligenza artificiale nei processi e nei metodi del fashion design determinano profonde trasformazioni teoriche e pratiche, influenzando le modalità con cui la moda viene progettata, prodotta, comunicata e conosciuta (Franzo, Quartu and Cianfanelli, 2024).

In questo contesto, il fashion design italiano si configura sempre più come una realtà 'phygital' (Bertola and Teunissen, 2018), neologismo che denota la profonda e indissolubile integrazione tra dimensione fisica e digitale (Vergine et alii, 2019), resa possibile dalla sinergia tra produzione artigianale, design digitale e AI. Qui il rapporto tra il Made in Italy e la tecnologia trascende il livello meramente funzionale per entrare nella sfera esistenziale, permeando ogni manufatto e dando origine a nuove forme di interazione e trasformazione: nuove espressioni del mondo (Quartu, 2024; Smelik, 2021). Inoltre la moda emerge come una forza dirompente, capace di ridefinire profondamente le categorie ontologiche dei manufatti e del Made in Italy stesso (Savi, 2023). Con la smaterializzazione della moda in reami digitali il valore non risiede più esclusivamente nel manufatto fisico (Kawamura, 2023), ma viene trasportato in iperrealtà senza precedenti (Baudrillard, 1981) capaci di riscriverlo, ricertificarlo e rinarrarlo. In un'ottica comparabile sul piano internazionale la selezione dei casi si è fondata su mappature di filiera e interviste semi-strutturate a imprese con





Figg. 4, 5 | Beste SpA, sustainability as a shared practice upstream: from the field to the supply chain (credit: Beste, 2025); integrated supply chain management, circularity as an organisational structure (credit: Beste, 2023).

elevata esposizione tecnologica; l'inclusione è stata condizionata da disponibilità e qualità dei dati (innovazione dei flussi progettuali, documentazione tecnica, registri operativi), profilo dimensionale con prevalenza di micro, piccole e medie imprese, ruolo definito lungo la catena del valore, livello di maturità digitale in termini di pipeline 3D, gemelli digitali, campionatura virtuale e sistemi RFID / IoT per tracciabilità e anticontraffazione, robustezza della governance, apertura all'interlocuzione e potenziale di replicabilità e trasferibilità. La comparazione ha privilegiato configurazioni in cui l'integrazione fisico-digitale fosse osservabile in modo diretto e sostenuta da evidenze operative interne, così da garantire coerenza e verificabilità dei riscontri.

Ciò si manifesta in maniera più puntuale nell'intervista condotta con l'azienda FutureClo[4]. Fondata nel 2021, la PMI – come sottolineato dal CEO German Picco – nasce dall'esigenza di colmare il divario tecnologico che ha storicamente caratterizzato l'industria della moda, tradizionalmente resistente all'innovazione digitale. Il suo modello operativo è articolato secondo una logica phygital, che sintetizza il patrimonio artigianale italiano con soluzioni tecnologiche all'avanguardia, una sintesi resa possibile dall'origine settoriale dei fondatori, che affondano le loro radici nella tradizione manifatturiera della moda. FutureClo (Fig. 8) esemplifica perfettamente il sublimarsi dell'abbigliamento dal dominio materiale a quello iperreale, in quanto inverte la sequenza tradizionale del progetto di moda: l'oggetto digitale precede e legittima quello fisico.

Come emerge dall'intervista il flusso creativo di FutureClo (Fig. 9) si origina dalla smaterializzazione del prodotto moda: dapprima attraverso l'elaborazione di avatar parametrici, poi mediante l'iterazione di texture e digital twins che ne anticipano l'esistenza materiale; solo in una fase successiva questa dimensione immateriale si oggettivizza nel primo capo fisico. Il prototipo tangibile non viene eliminato, ma l'intera fase di sviluppo si evolve in un processo di supervisione e ottimizzazione collaborativa. Questa inversione metodologica non costituisce tuttavia una rottura con la tradizione manifatturiera italiana. Come osserva Caroline Evans (2023) ciò che è più moderno si rivela sempre in relazione a ciò che è più antico, ed è proprio ciò che recuperiamo dal passato che può offrirci la chiave per interpretare le contraddizioni del presente.

L'approccio phygital di FutureClo esemplifica questo principio: il design digitale non sostituisce, ma dialoga costantemente con le eredità artigianali italiane. Il digital fashion e la modellistica tradizionale collaborano e generano un processo virtuoso in cui fisico e digitale si contaminano a vicenda. L'intervista esplicita apertamente tale contaminazione rivelando come la moda tridimensionale sia orchestrata da modellisti e fashion designer che, attraverso un'ibridazione di competenze radicate nei saperi materiali e immateriali della moda, sono capaci di plasmare il digitale e traslarlo perfettamente nel mondo fisico; questa sinergia non solo preserva l'identità del Made in Italy, ma la eleva.

Nel contesto analizzato i file 3D e i rendering non agiscono come semplici segni ma come agenti produttivi che, dialogando con la fisicità, generano un'iper-realtà espansa. Il gemello digitale non simula il capo, ma lo co-produce, mutando il tradizionale rapporto originale-copia, tuttavia questo capovolgimento non assoggetta semplicemente il fisico al digitale piuttosto stabilisce una co-dipendenza ontologica in cui entrambe le realtà si determinano reciprocamente.

Il secondo caso studio indagato è Temera[5], un'azienda fondata nel 2009 e specializzata nell'implementazione di tecnologie RFID lungo l'intera filiera della moda di lusso. L'azienda (Fig. 10), caratterizzata da una strategia di specializzazione verticale, affronta le questioni critiche della tracciabilità, dell'anticontraffazione e del controllo dei mercati paralleli attraverso un approccio basato sui processi: la mappatura dei flussi di produzione precede e informa la personalizzazione tecnica, ribaltando la consueta logica basata sulla tecnologia. Ancora una volta questo carattere iperreale espanso diventa un'arena di interazione tra più entità attraverso l'integrazione informativa. In questo senso l'oggetto non esiste più solo nella sua materialità, ma diventa un mediatore tra il tangibile e l'intangibile. Arcangelo D'Onofrio, Amministratore Delegato dell'azienda, nell'intervista condotta nell'ambito del progetto sottolinea come la trasformazione digitale degli artefatti di moda rappresenti oggi un aspetto cruciale. Secondo D'Onofrio, il processo di digitalizzazione che trasforma la materia attraverso l'elaborazione dei dati costituisce il cuore del paradigma phygital: gli oggetti materiali che ci circondano devono acquisire la capacità di comunicare e veicolare contenuti informativi, diventando così elementi interattivi capaci di stabilire un dialogo con l'utente (Fig. 11). L'oggetto che comunica rappresenta la manifestazione concreta di questo nuovo rapporto tra materiale e immateriale, in cui l'esperienza fisica e quella digitale si fondono, trasformando il manufatto in un nodo di significati e processi.

Si delinea così un ambiente ibrido in cui virtuale e materiale coesistono in un processo di negoziazione reciproca che ridefinisce i confini stessi del Made in Italy e della moda in Italia. Entrambe le aziende dimostrano come l'innovazione possa generare nuove forme di lavoro qualificato e creazione di valore, piuttosto che sostituire le competenze esistenti.

Formazione informale | La terza traiettoria indagata riguarda l'emergere in Italia di nuove modalità di formazione al di fuori dei canali istituzionali tradizionali; in un contesto caratterizzato dalla transizione digitale e dalla crescente attenzione alla sostenibilità, si assiste a una progressiva ibridazione tra luoghi di produzione e luoghi di formazione, che si manifesta attraverso pratiche informali (Franzo and Moradei, 2021), collaborazioni intersettoriali e processi educativi basati sull'esperienza diretta.

In un'ottica comparabile sul piano internazionale, la selezione dei casi per la traiettoria della formazione informale si è fondata su mappature delle interfacce produzione, formazione, interviste semi-strutturate e osservazioni in situ delle attività didattico-produttive; l'inclusione ha richiesto disponibilità e qualità dei dati (programmi e calendari pubblici, materiali didattici, documentazione dei processi, indicatori di partecipazione ed esiti formativi quando presenti), accessibilità a visita e interlocuzione, profilo dimensionale con prevalenza di PMI radicate nei distretti e Istituzioni formative territoriali, grado di integrazione tra processi produttivi e dispositivi pedagogici (laboratori on-site, apprenticeship, work-integrated learning), intensità del trasferimento intergenerazionale, maturità di governance e rete partenariale, nonché potenziale di replicabilità e trasferibilità del modello oltre il contesto locale.

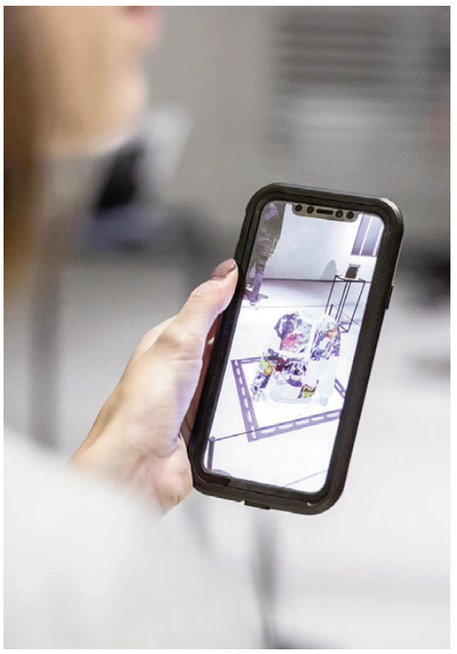
La scelta di Lanificio Paoletti[6] e ITS MITA[7] risponde a tali requisiti: il primo come impresa manifatturiera che struttura aperture pubbliche e apprendimento situato lungo la linea produttiva; la seconda come nodo istituzionale capace di orchestrare un laboratorio distribuito scuola / impresa / territorio con dotazioni tecnologiche avanzate e traiettorie professionalizzanti documentate.





Fig. 6 | DIFE SpA: post-consumer textiles destined for regeneration (credit: DIFE, 2023).

Fig. 7 | DIFE SpA: wheel and waste materials at DIFE; symbolic image of circular logistics connecting production and recycling (credit: DIFE, 2022).



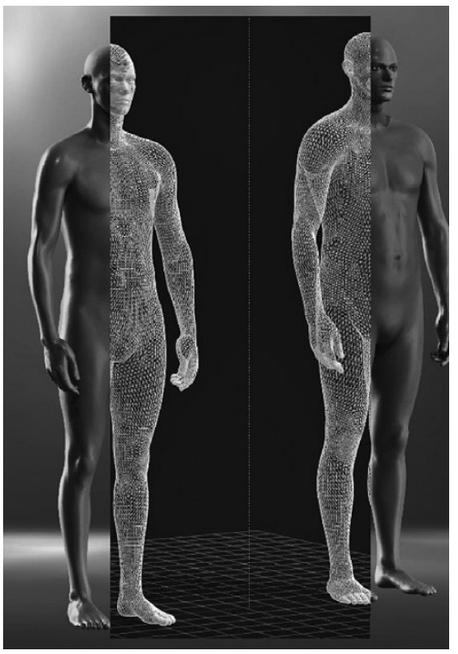


Fig. 8 | FutureCLO: fashion artefacts in dynamic environments (credit: FutureClo, 2025).

Fig. 9 | FutureCLO: visualisation of the start of the digital design process through the parametric definition of the avatar (credit: FutureClo, 2023).

Il Lanificio Paoletti (Fig. 12), situato a Follina nel Distretto Tessile di Treviso, è un esempio virtuoso di questa riconfigurazione. Fondato nel 1795, il lanificio è oggi un'azienda a conduzione familiare specializzata nella produzione a ciclo completo di filati e tessuti di lana cardata. Nel corso del tempo è riuscito a mantenere vive le tecniche di lavorazione tradizionali, integrandole con strumenti e linguaggi contemporanei. Come emerso durante l'intervista, dal 2013, con l'iniziativa La Via della Lana, il lanificio apre periodicamente i suoi spazi al pubblico, offrendo visite guidate, mostre, seminari e attività didattiche che coinvolgono designer, artigiani, studenti e comunità locale (Fig. 13). In questo contesto la fabbrica assume la valenza di incubatore temporaneo di conoscenza, dove il pubblico può osservare da vicino le fasi della produzione tessile e, allo stesso tempo, partecipare a momenti di riflessione collettiva sulla moda contemporanea, le sue sfide e le sue potenzialità.

L'iniziativa fa parte del fenomeno sempre più diffuso dell'apertura al pubblico di numerosi siti di produzione di moda, situati principalmente nelle province italiane (Franzo, 2022). Questi spazi, storicamente legati alla dimensione manifatturiera, si riconfigurano come ambienti di apprendimento non convenzionali, in grado di accogliere studenti, ricercatori, designer, ma anche cittadini, turisti e consumatori, offrendo opportunità di contatto diretto con il sapere tecnico e progettuale della produzione di moda. Questo cambiamento riflette anche una strategia di comunicazione dei marchi di lusso, sempre più orientata alla promozione di una cultura della trasparenza rispetto ai processi produttivi, nel tentativo di sensibilizzare l'opinione pubblica sull'impatto ambientale e sociale delle scelte di acquisto.

Le fabbriche del XXI secolo non sono più solo luoghi di produzione, ma diventano spazi aperti al dialogo, ambienti esperienziali in cui la trasmissione del sapere avviene attraverso l'osservazione, l'interazione e la condivisione. Durante La Via della Lana, la trasformazione non riguarda solo le pratiche ospitate, ma coinvolge anche l'architettura stessa del sito produttivo, che da contenitore diventa contenuto e mezzo di apprendimento. Il Lanificio Paoletti agisce così come attore culturale responsabile nel proprio territorio, costruendo relazioni dialogiche tra produzione, cultura e comunità alla ricerca di una visione rinnovata di prosperità. Come sottolineato da Rinaldi e Testa (2013) questa integrazione tra valore estetico e culturale si traduce in una nuova proposta di valore per il Made in Italy, per cui il prodotto diventa anche veicolo di narrazioni territoriali, memorie artigianali e consapevolezza etica.

Un secondo caso studio è l'ITS MITA Academy (Fig. 14), una Fondazione che opera in Toscana nel campo dell'istruzione tecnica superiore per l'industria della moda. ITS MITA si distingue per l'offerta di corsi di formazione altamente professionalizzati, volti a colmare il divario tra la preparazione scolastica e le competenze richieste dalle aziende. In un'area storicamente dedita alla produzione tessile e conciaria, ITS MITA ha contribuito alla costruzione di un vero e proprio ecosistema educativo e produttivo, articolato in una rete che comprende Scuole secondarie, Università, imprese, Enti locali e attori istituzionali.

Il risultato è un 'laboratorio distribuito' sul territorio toscano, dove studenti, docenti, professionisti e aziende lavorano insieme, favorendo l'apprendimento esperienziale, la sperimentazione interdisciplinare e la contaminazione delle conoscenze (Fig. 15). Qui gli studenti hanno accesso a tecnologie avanzate, esplorano pratiche di sostenibilità, innovazione e design circolare e sviluppano competenze immediatamente spendibili nel mondo del lavoro. Il laboratorio funge da catalizzatore per l'innovazione educativa, promuovendo un insegnamento attivo e contestualizzato, in grado di rispondere alle esigenze in continua evoluzione dell'industria della moda.

Queste realtà, nonostante la diversità delle loro configurazioni, dimostrano la capacità di reinterpretare il proprio ruolo e i propri confini di azione, fungendo da piattaforme di apprendimento dinamiche. Grazie alla loro competenza tecnica e al loro radicamento territoriale, si configurano come luoghi di 'craft of combination' (Lundvall and Johnson, 1994), ovvero come spazi in cui convergono competenze diverse, si favoriscono le relazioni tra attori eterogenei e si generano nuove forme di conoscenza collettiva. Da questo punto di vista, i Distretti Industriali delle province italiane, spesso descritti come in declino dal punto di vista produttivo, si rivelano oggi contesti ideali per sperimentare nuovi percorsi formativi. La loro trasformazione in poli culturali evoluti (Sacco and Tavano Blessi, 2005) si basa sulla riconfigurazione del rapporto tra prodotto e territorio, in cui la produzione materiale si intreccia con quella simbolica e relazionale. La formazione non è più solo trasmissione cognitiva, ma diventa un processo situato, radicato nell'esperienza e nella pratica (Faiferri, Bartocci and Pusceddu, 2017), rispondendo all'urgenza di formare figure professionali capaci di leggere criticamente la complessità del presente.

Il paradigma della formazione informale nella moda attuale rappresenta un elemento chiave per comprendere le trasformazioni del Made in Italy. Le fabbriche, collegate in rete con altri luoghi fisici e attori sociali, si configurano come ambienti di apprendimento diffusi, in cui vengono sperimentati modelli pedagogici innovativi e costruite nuove visioni del futuro. Questi spazi consentono il trasferimento di conoscenze intergenerazionali e promuovono nuove competenze in linea con la sostenibilità e le transizioni digitali, favorendo l'istruzione inclusiva e rafforzando le economie locali.

Sinergie e compromessi tra gli SDG | Le tre traiettorie trasformative delineate dimostrano un potenziale di ripensamento sistemico del Made in Italy che produce benefici tangibili in relazione all'SDG 8 (lavoro dignitoso e crescita economica). In particolare la transizione verso sistemi circolari nel settore della moda genera nuova occupazione qualificata lungo la catena del valore e incrementa l'efficienza d'uso delle risorse, contribuendo al target 8.4 (efficienza risorse e disaccoppiamento).

Analogamente l'integrazione di scenari phygital (modellazione 3D e digital twins, tracciabilità, IoT) abilita innovazioni di prodotto-servizio (campionatura virtuale, tracciabilità end-to-end) che accrescono la competitività e la produttività coerentemente con il target 8.2 (produttività attraverso diversificazione / tecnologia / innovazione). Questo genera ruoli ibridi capaci di dialogare con il sapere artigianale nel dominio digitale allineandosi in aggiunta al target 8.3 (politiche per imprenditorialità e MPMI).

La formazione informale rafforza le competenze dei lavoratori, la resilienza e la prosperità socioculturale del settore, generando sinergie tra saperi artigianali e competenze digitali, contribuendo ai target 8.5 (occupazione piena e lavoro dignitoso) e 8.6 (riduzione NEET). In via indiretta tale traiettoria attiva anche dinamiche di imprenditorialità e rafforza le MPMI in coerenza con il target 8.3.

Oltre ai benefici specifici per l'SDG 8, l'approccio adottato innesca una fitta rete di sinergie dirette e indirette con gli altri SDG dell'Agenda 2030. I si-

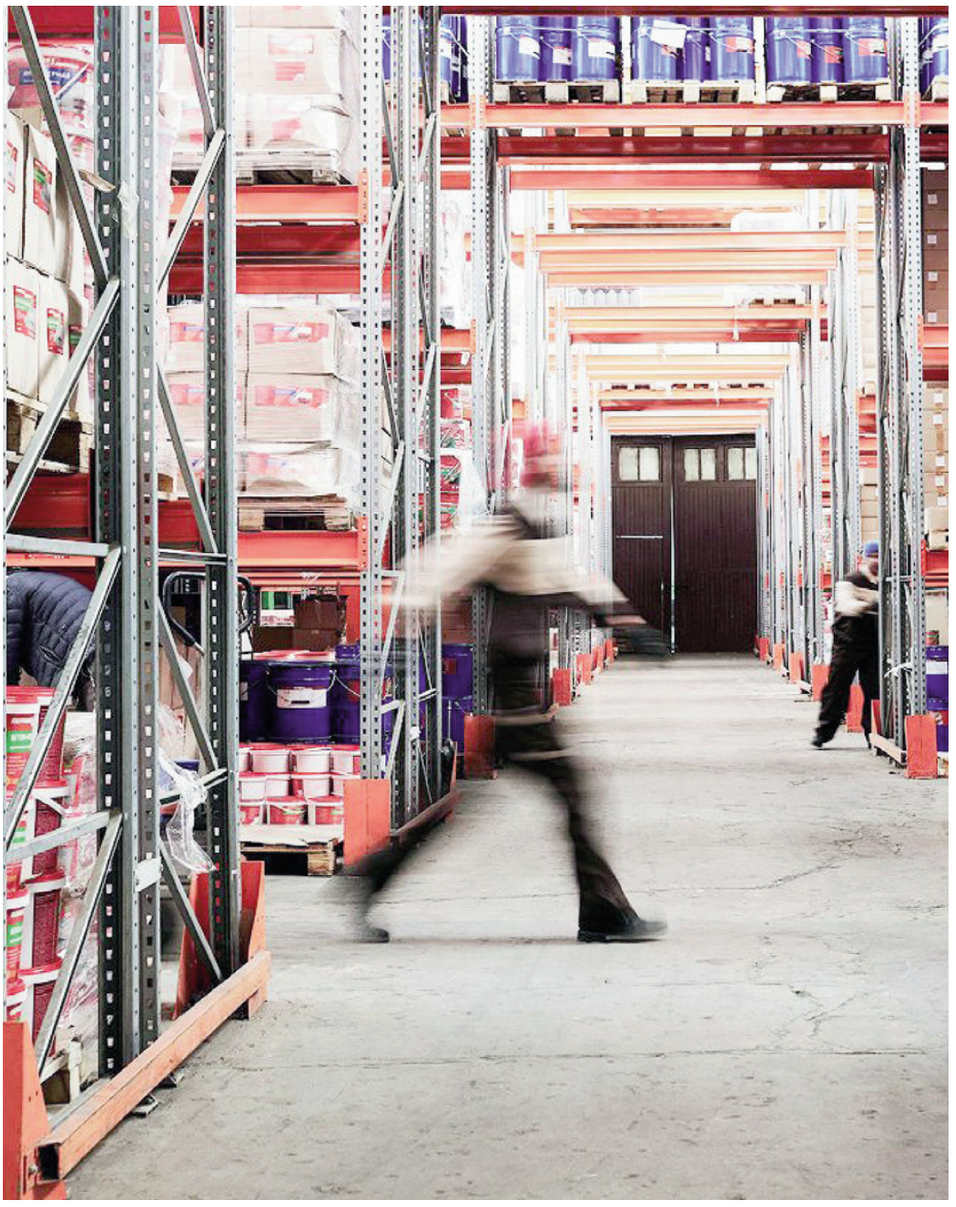


Fig. 10 | Temera: representative image of the logistics space, where the management of material and information flows is integrated with supply chain control systems (credit: Pexels, 2019).

Next page

Fig. 11 | Temera x Acne Studios: digital traceability of Acne Studios products via DPP (credit: Temera, 2025).

stemi circolari garantiscono modelli sostenibili di produzione e consumo (SDG 12) e promuovono azioni per combattere i cambiamenti climatici (SDG 13); in aggiunta generano co-benefici su vita sott'acqua e vita sulla terra (SDG 14 e 15). Gli scenari phygital si allineano all'SDG 9 (infrastrutture resistenti, industrializzazione sostenibile e innovazione) e, ottimizzando dati e processi, incidono su sistemi di energia economici, affidabili, sostenibili e moderni (SDG 7). La formazione informale è sinergica con l'SDG 4, ovvero fornire un'educazione di qualità equa e inclusiva, e opportunità di apprendimento per tutti. Favorisce inoltre inserimento e progressione professionale e può contribuire a ridurre le disuguaglianze e rafforzare la parità di genere (SDG 5 e 10).

Tuttavia permangono tensioni e limiti tra gli obiettivi: in assenza di strategie integrate il perseguimento della crescita economica può entrare in conflitto con i vincoli ecosistemici. In particolare gli scenari phygital contribuiscono all'SDG 7 solo se l'infrastruttura digitale è alimentata da fonti rinnovabili ed energeticamente efficienti. Analogamente i sistemi circolari comportano costi di transizione con impatti potenziali a breve termine su occupazione e competitività, ne consegue la necessità di un coordinamento intersettoriale e sistemico, che gestisca i conflitti tra obiettivi e ottimizzi le sinergie.

Conclusioni | Il contributo ha esplorato le traiettorie evolutive del sistema moda italiano attraverso la lente di tre dimensioni trasformative: sistemi circolari, scenari phygital ed educazione informale. L'analisi di studio emblematica rende evidente che la ridefinizione del Made in Italy non è solo una risposta a pressioni esterne quali la sostenibilità e la digitalizzazione, ma una ridefinizione attiva dei paradigmi culturali, tecnologici e organizzativi. I casi di Beste e DIFE illustrano come la circolarità debba essere affrontata in modo sistemico, integrando flussi di materiali, infrastrutture e quadri normativi. Piuttosto che buone pratiche isolate, essi rappresentano innovazioni strutturali che ridefiniscono la catena del valore e promuovono la resilienza attraverso la conoscenza e la collaborazione locali. L'innovazione phygital, esemplificata da FutureClo e Temera, mostra come i domini digitale e fisico possano co-evolversi, creando modelli ibridi di progettazione e produzione che arricchiscono la dimensione narrativa ed esperienziale della moda.

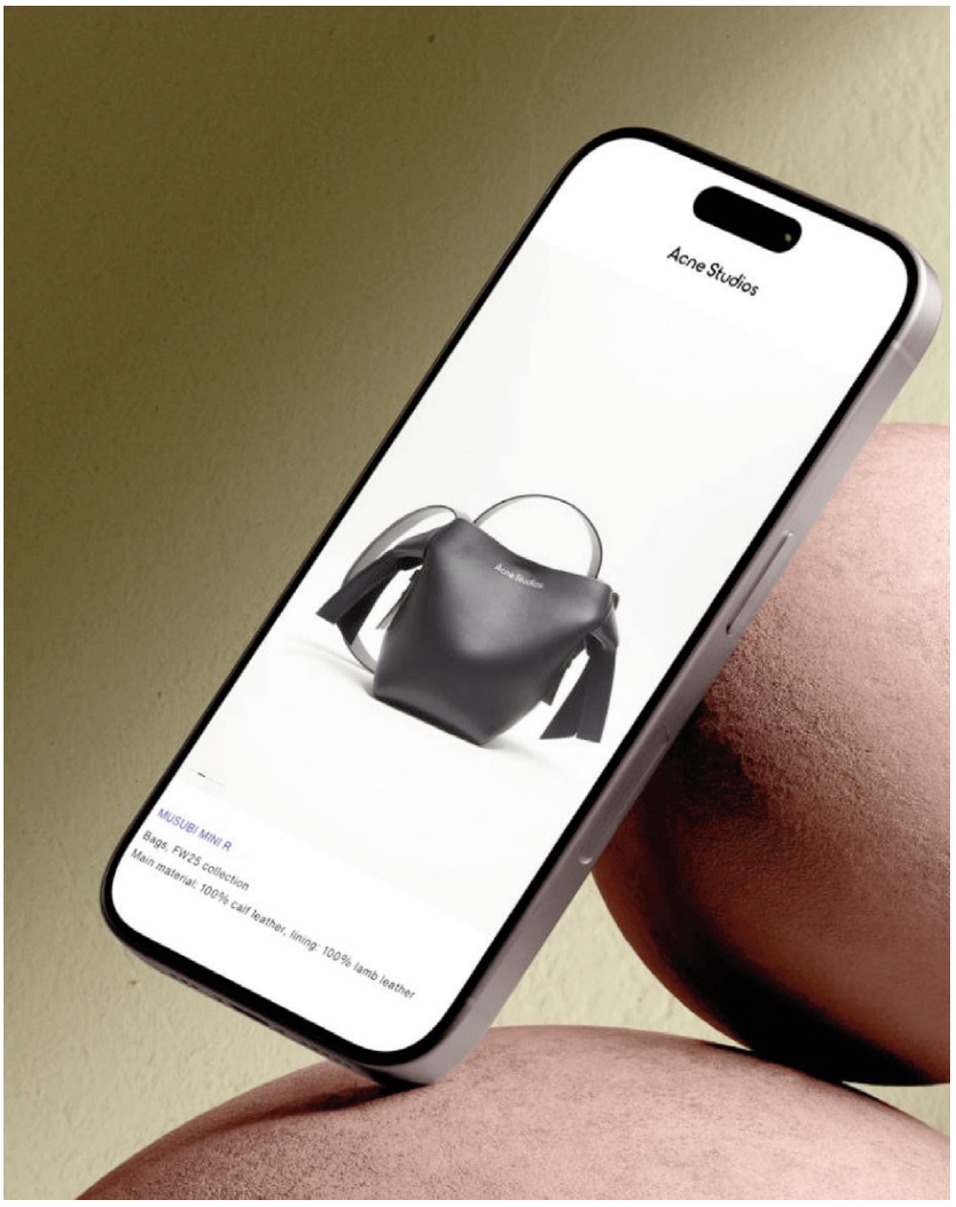
Questi esempi confermano che l'adozione degli strumenti digitali non mina l'artigianato tradizionale, ma piuttosto ne amplifica la rilevanza in un panorama sempre più interconnesso e basato sui dati. L'ascesa delle pratiche di educazione informale, come si vede nel Lanificio Paoletti e nell'ITS MITA Academy, rivela l'emergere di ambienti di apprendimento integrati nei contesti produttivi, attraverso pratiche che offrono spazi dinamici per lo scambio intergenerazionale di conoscenze e l'apprendimento situato, sostenendo lo sviluppo di nuove competenze in linea con le transizioni ecologiche e tecnologiche. Nel complesso la trasformazione del Made in Italy implica ripensare non solo ciò che viene prodotto, ma anche come, da chi e con quali valori. Si evidenzia come il rinnovamento sostenibile del Made in Italy secondo le tre traiettorie esaminate produca una molteplicità di co-benefici allineati con l'Agenda 2030, ma anche la necessità di gestire con visione sistemica le opportunità e i limiti insiti in tale trasformazione. Un approccio transdisciplinare e critico risulta imprescindibile per massimizzare le sinergie – integrando aspetti economici, ambientali, culturali e sociali in un unico quadro di progetto – e per mitigare i compromessi tra obiettivi attraverso politiche concertate, design e innovazione responsabile.

In questa prospettiva la trasformazione della moda italiana funge da laboratorio interdisciplinare, offrendo spunti per ripensare le dinamiche produttive e di consumo in modo da contribuire congiuntamente al lavoro dignitoso, alla crescita sostenibile e al conseguimento integrato di tutti gli obiettivi di sviluppo sostenibile. In aggiunta le tre traiettorie indagate risultano trasferibili oltre il settore moda italiano, purché adattate con attenzione alle specificità socio-culturali, produttive e disciplinari dei contesti di arrivo: gli approcci circolari possono essere declinati in filiere manifatturiere affini (ad esempio mobile e agroalimentare) identificando intersezioni operative e requisiti tecnici; i principi phygital sono applicabili ad altre industrie creative e territori in cui operano comunità disponibili alla sperimentazione; in ambito educativo le forme di apprendimento informale e collaborativo emerse possono informare programmi curriculari ed extra-curriculari, alimentando un dialogo transdisciplinare.

La trasferibilità va intesa come traduzione progettuale, non come replica: le soluzioni vanno ricalibrate su culture materiali, assetti organizzativi e infrastrutture locali per garantire efficacia e sostenibilità. In parallelo emergono implicazioni per le politiche industriali e la trasferibilità pratica dei risultati: i decisori pubblici potrebbero avvalersi delle evidenze emerse per definire percorsi strategici volti a facilitare la transizione del settore moda, implemen-

tando incentivi fiscali e finanziari che favoriscano gli investimenti delle imprese in tecnologie 4.0 e 5.0 sostenibili, snellendo le procedure per l'adeguamento infrastrutturale e introducendo regolamentazioni graduali ma incisive – come quote di materiali riciclati o standard di tracciabilità – accompagnate da opportuni supporti.

Contestualmente il panorama imprenditoriale e formativo può esplorare l'estensione delle pratiche innovative oltre i contesti pionieristici, con particolare attenzione all'applicabilità degli strumenti di design aumentato dall'Intelligenza Artificiale alle micro e piccole imprese diffuse sul territorio e al di fuori dei distretti tradizionali. Promuovere l'adozione di soluzioni IA anche presso questi attori minori contribuirebbe a diffondere i benefici dell'innovazione in modo capillare, riducendo i divari territoriali e dimensionali. Tali prospettive, orientate tanto alla scala macro (politiche di sistema) quanto micro (tecnologie per le PMI), suggeriscono che il dibattito avviato da questa ricerca è tutt'altro che concluso e che le conclusioni vogliono essere un punto di partenza per ulteriori riflessioni e sperimentazioni interdisciplinari, invitando la comunità scientifica a valutare criticamente e sviluppare le idee proposte. Un primo ambito di approfondimento potrebbe riguardare il monitoraggio longitudinale degli impatti prodotti dalle traiettorie individuate: sarebbe ad esempio utile misurare l'evoluzione degli indicatori occupazionali e di competitività nel settore moda italiano nel periodo 2026-2030, per verificare in che misura l'adozione di pratiche circolari e soluzioni phygital contribuisca alla creazione di nuova occupazione qualificata e al rafforzamento del tessuto industriale. Sul versante ambientale una valutazione più estensiva degli effetti delle innovazioni proposte potrebbe essere ottenuta tramite analisi del ciclo di vita complete, al fine di quantificare il reale beneficio in termini di riduzione degli impatti ambientali lungo l'intera filiera e identificare eventuali trade-off nascosti.



The Italian fashion sector is undergoing a profound transformation, shaped by the converging dynamics of the digital and ecological transitions that are redefining production systems, value chains, and design cultures (Niinimäki et alii, 2020). The evolutionary scenario activated by this twin transition exerts a significant impact on fashion, which – while pursuing the objectives of Industry 4.0 (Casciani, Chkanikova and Pal, 2022) and increasingly those of Industry 5.0 – experiments with the convergence of creative and manufacturing practices and enabling technologies (Särmäkari and Vänskä, 2022). Within this hybrid landscape, new ways of conceiving fashion and Made in Italy are emerging, capable of positioning themselves within a network in which creative exchange drives growth and innovation (Di Dio et alii, 2022).

In this context, the paper builds on a national research project involving five Italian universities engaged in fashion education. The project 'ResHaping Made in ITAly (RHITA) – Circular models for Italian fashion heritage and manufactures through digital inclusivity and conscious innovation', aligned with SDG 8 of the 2030 Agenda (Decent Work and Economic Growth), pursues two main objectives. First, it aims to explore new trajectories for regenerating an industrial sector that, while historically representing a key component of Italy's GDP and cultural identity, now shows clear signs of structural decline, exacerbated by production delocalisation and global financial pressures. Second, it seeks to develop a systemic understanding of change, to reconceptualise Made in Italy as a dynamic and situated system rather than a fixed legacy label – highlighting territorial specificities, emerging intersectoral models, and generating, at the same time, qualified employment and inclusive growth.

Following an extensive review of the state of the art on the key themes underpinning the research, three transformative trajectories within the current Italian fashion system were identified and critically examined: circular systems, phygital scenarios, and informal education. A qualitative and multi-scalar approach was adopted, integrating a mapping of regional supply chains with semi-structured video interviews[1] conducted with relevant stakeholders, including researchers, educators, entrepreneurs, artisans, and institutional representatives. The interview corpus was subsequently analysed using text-mining techniques implemented in Python, in order to identify the most significant lexical recurrences (Figg. 1-3).

The three categories are presented and critically discussed through the analysis of case studies representative of each trajectory. The first trajectory – examined through the cases of Beste and DIFE – examines the introduction of circular practices to enhance sustainability. The second trajectory – analysed through FutureClo and Temera – addresses the increasing integration of physical and digital dimensions in design and production processes. The third trajectory – through the cases of Lanificio Paoletti and ITS MITA Academy – focuses on the diffusion of innovative educational models that foster dialogue between learning environments and production spaces.

Taken together, this approach enables a critical and systemic reading of the identified trajectories, revealing areas of intensification and cross-contamination that contribute to redefining the meanings, practices, and values associated with Made in Italy. By intersecting design, technological innovation, environmental sustainability, and ed-

ucation, the study assumes an intrinsically interdisciplinary character – broadening its relevance within the scientific community while providing a tangible contribution to the implementation of SDG 8 in the Italian context.

Ultimately, this paper represents a significant advancement for academic research, as it bridges a gap in the literature by integrating perspectives that have thus far been addressed separately, and by proposing a replicable analytical framework for studying the transformation of traditional manufacturing sectors. Through this holistic and interdisciplinary perspective, the research contributes to a broader theoretical debate on the evolutionary trajectories of Made in Italy, provides a knowledge base for future comparative studies, and enhances the potential impact of design and related disciplines in fostering sustainable, digital, and educational development.

State of the art: Re-shaping Fashion | As explored by numerous scholars (Barile, 2006; Colombi, 2015; Dellapiana, 2022; Fabbri, 2021; Lazzaretti and Oliva, 2022; Mora and Volonté, 2014), the concept of Made in Italy first found its definition within the fashion sector, establishing itself as a key interpretive tool for understanding the Italian productive landscape abroad. This phenomenon developed through the sector's ability to combine artisanal tradition with stylistic innovation, contributing to the construction of a distinctive identity recognised on a global scale. However, the features and practices that took shape and consolidated throughout the twentieth and early twenty-first centuries are now crossing into new transformative territories, making it necessary to implement what Barucco, Bulegato and Vaccari (2020) describe as a 'remanufacturing of thought'. Such a shift is essential to outline new trajectories and reorientation practices suitable for emerging scenarios.

Within these transformative dynamics, the Italian fashion manufacturing system occupies a unique position. Historically built upon a distinctive combination of flexible specialisation, geographic proximity, and tacit knowledge (Becattini, 2004), it has long represented a virtuous model of localised, integrated, and quality-oriented production. Yet, the very characteristics that once defined its success – such as the modularity of micro-enterprises, the segmentation of supply chains, and the informal distribution of skills – are now proving misaligned with the growing demands for traceability, transparency, and circularity (Tebaldi, Brun and Bottani, 2022).

In this context, the ecological and digital transitions are challenging Italian manufacturing in particularly profound ways. The fundamental issue does not lie in the sector's readiness to embrace transformation, but rather in defining a model of transition that is coherent with its structural specificities: a model capable of valorising existing resources – diffused skills, material culture, and proximity-based networks – by reorganising them within a new operational framework oriented toward transformative forms of innovation that are territorially grounded, sustainable, and globally competitive. In this sense, transition should not be conceived merely as a technical or regulatory process, but as a genuinely design-driven act – one that requires vision, awareness, and the capacity to act simultaneously across productive, cultural, and social dimensions. A literature review was conducted covering the period 2019-2025, in both Italian and English, using Scopus and Web of Science as primary databases, complemented by exploratory searches on Google Scholar and targeted consultation of ResearchGate and Academia for preprints and non-indexed conference proceedings. Exceptions before 2019 were admitted only for foundational contributions. Boolean queries combined terms aligned with the three trajectories under investigation (phygital scenarios, informal education, and circular systems), such as 'phygital AND fashion', 'digital twin AND fashion design', 'RFID AND traceability', 'industrial symbiosis OR resource loops', and 'circular transition AND value chain'.

The review reveals that the adoption of Digital Twins for iterative prototyping and modular design (Casciani, 2023), the use of artificial intelligence for concept generation (Mascitti and Paciotti, 2024), and the integration of metaverse technologies in fashion design (Hajahmadi et alii, 2024) are redefining value chains in the fashion industry and, consequently, in Made in Italy. However, research on the application of these technologies remains predominantly operational in scope. Limited attention has been paid to the intersections between such innovations and the tacit knowledge of industrial districts, the semantic and cultural care surrounding fashion objects, and the emergence of hybrid professional profiles that integrate artisanal know-how with digital competencies.

Within the educational context, the literature review reveals that traditional academic programs and technical training pathways continue to serve as reference models in fashion studies (Vaccari, 2023). Yet, emerging hybrid forms of education that connect enterprises, research institutions, and production communities – while fostering digital experimentation and intergenerational exchange of skills – remain largely unexplored. These practices hold significant potential for linking ecological and digital transitions with artisanal knowledge through transformative processes. Moreover, literature on circular economy in the textile and apparel sector predominantly focuses on closed-loop recycling solutions or product-level innovations confined to individual firms (D'Itria, 2023), while system-level implications – such as labour traceability, supply chain governance, and territorial regeneration – receive comparatively less attention. This gap is particularly relevant in light of international commitments that, by 2030, call for improved resource efficiency in production and consumption models and for decoupling economic growth from environmental degradation.

These findings outline a fragmented landscape in which technology, circularity, and education are often addressed as separate domains. The selection of case studies followed a purposeful sampling strategy, oriented toward innovative impact and supply chain heterogeneity within the Italian context. In addition, a Python-assisted lexical analysis was conducted (tokenisation, stopword removal, frequency analysis, and ranking), followed by vector visualisation to map the most relevant terms within the conceptual categories.

However, this study acknowledges several intrinsic limitations. The qualitative and exploratory nature of the investigation relies on a non-statistical, purposive sample, which limits the generalizability of the findings. Another limitation lies in the focus on particularly virtuous and innovative enterprises, which may underestimate the challenges faced by less advanced firms. Moreover, several structural barriers hinder the scalability of innovation: district lock-ins and tacit knowledge networks among micro-enterprises inhibit radical change; high initial investments (such as machinery retrofitting and acquisition of specialised skills) burden small and medium-sized enterprises (SMEs); a persistent digital skills gap affects the workforce; the evolving regulatory framework – for instance, textile EPR (Extended Producer Responsibility) – introduces additional organisational burdens; and the lack of recycling infrastructure and supply-chain coordination constrains the diffusion of best practices.

Recognising these obstacles highlights the need for targeted actions, including economic incentives, continuous training programs, and multi-stakeholder collaborative platforms, which are essential to enable large-scale adoption of transformative practices. The following section offers a systemic interpretation of these dimensions of Made in Italy in light of the dual ecological and digital transitions currently reshaping its developmental trajectories.

Circular systems | Within the framework of this research, the circular trajectory has been approached as a dimension of systemic transformation (Barbero and Ferrulli, 2023; Fletcher and Tham, 2019; Whitty, 2021) that affects the entire productive, organisational, and cultural structure of Made in Italy. This perspective guided the analysis, shifting the focus from the adoption of isolated solutions to the exploration of the systemic conditions – both material and immaterial – that enable, or conversely hinder, the effective integration of circular economy principles (Kirchherr et alii, 2023; Koszewska, 2018).

An effective circular transition requires the co-design of products, services, and infrastructures throughout the entire life cycle, supported by Life Cycle Assessment (LCA) and S.PSS models that realign incentives toward durability, reuse, and use-intensification (Vezzoli et alii, 2022).

The analysis focused on infrastructural factors (e.g., sorting facilities and logistical capacity), relational factors (forms of cooperation among companies, local authorities, and territorial networks), and regulatory factors (alignment between national and supranational frameworks, incentive systems, and administrative barriers). This section examines the results of the interviews with Beste, focusing on the Beredo project, and DIFE, a waste management provider. To ensure international comparability, case selection was based on supply chain mapping and document analysis integrated with semi-structured interviews. The selection privileged actors with verifiable data (flow traceability, mass balance, certifications / audits), representative enterprise size (SME), a clearly defined role along the value chain, organisational maturity and governance structures, openness to dialogue, and informational accessibility. Both cases offer valuable insights into circular models capable of redefining actor roles, supply chain relationships, and organisational logics within the ecological transition of the Italian fashion system.

Beste[2], an established company located in the Prato Textile District and specialising in high-quality fabric production, developed the Beredo project as

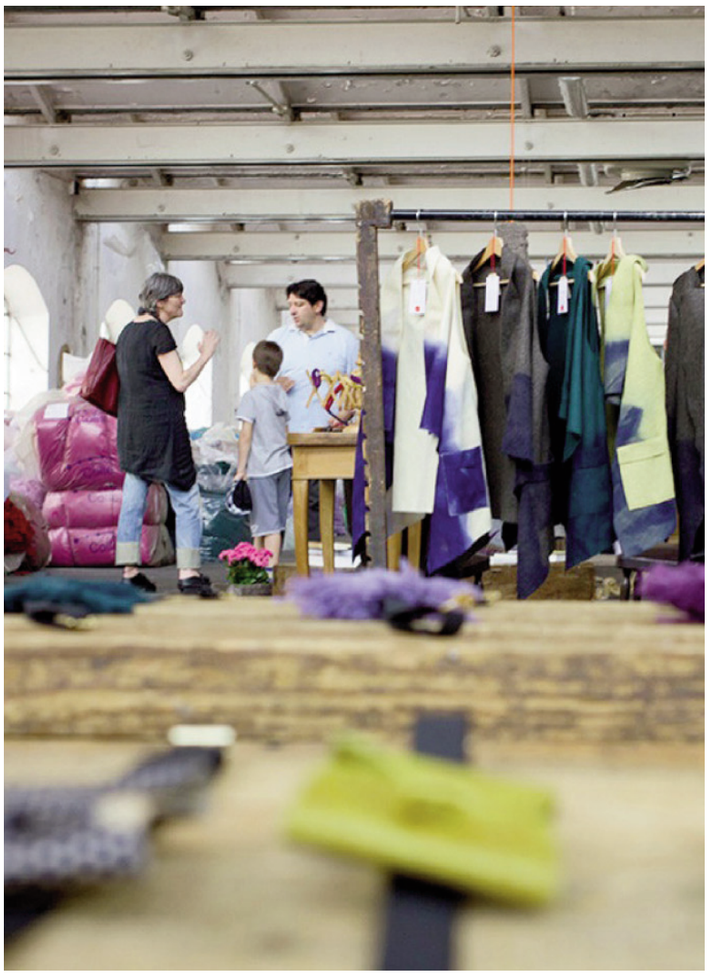


Fig. 12 | Lanificio Paoletti: interior of the company with garments and textiles (credit: M. L. Berlinguer, 2019).



Fig. 13 | Lanificio Paoletti: the wool mill as a space for education and shared experimentation (credit: Lanificio Paoletti, 2025).

an experimental platform dedicated to the regeneration of pre-consumer textile waste. The initiative is part of a broader corporate strategy promoting environmental, cultural, and organisational sustainability, grounded in the belief that circularity must be integrated upstream – at the very stages of product design and supply chain definition (Fig. 4). Beredo represents both a model of advanced industrial symbiosis and a closed-loop recycling system, in which production waste generated internally is sorted, regenerated, and reintroduced into the manufacturing cycle.

This approach enables the continuity of material flows within the same value chain, reducing dependence on external inputs. The vertical integration of skills and infrastructure enables Beste to manage all phases of the process in-house – from collection to finishing – ensuring high-quality standards, full traceability, and operational transparency. Such a configuration also constitutes a form of organisational innovation, aimed at enhancing resilience and autonomy within the production system. Through Beredo, the company has implemented a range of practices that integrate traditional knowledge with low-impact technologies, including the recovery of noble fibres from production scraps, the creation of new textile compounds, and the reuse of textile waste in alternative sectors such as papermaking. The Beste case demonstrates how circularity can be structurally embedded in corporate governance, generating positive effects on multiple levels (Fig. 5). As such, Beredo serves as a laboratory of systemic innovation and a replicable reference model for other Made in Italy enterprises engaged in the ecological transition.

Complementing this production-oriented perspective, the second case study, DIFE[3], a company specialising in industrial waste management, highlights a segment often overlooked in analyses of the circular transition – namely, the collection, sorting, and classification of pre-consumer textile waste. The decision to include DIFE (Fig. 6) among the case studies reflects the growing recognition of the crucial role that waste management providers play in enabling ecological and circular transitions within the fashion sector, despite their limited representation in scholarly and design-oriented literature. DIFE acts as an intermediary node between production and recycling infrastructures (Fig. 7), facilitating the establishment of operational and infrastructural connections indispensable to the effective implementation of circular strategies.

The interview highlighted, in particular, the strategic importance of flow traceability and delivery quality, both of which are essential to ensuring the functionality and compliance of recycling chains with required environmental and technical standards. Taken together, these cases reveal the enabling conditions – infrastructural, regulatory, and relational – necessary for circular innovation to foster decent and sustainable employment, thus reinforcing the transformative potential of the circular economy within the Made in Italy fashion system.

Phygital scenarios | A second key dimension examined in this study concerns the growing integration of physical and digital realms within fashion design and production processes, as well as the emergence of hybrid forms of labour. It is now widely recognised that the current technological expansion and the exponential integration of artificial intelligence into the methods and processes of fashion design are triggering profound theoretical and practical transformations, reshaping how fashion is designed, produced, communicated, and understood (Franzo, Quartu and Cianfanelli, 2024).

Within this context, Italian fashion design increasingly manifests itself as a phygital reality (Bertola and Teunissen, 2018) – a neologism that denotes the deep and inseparable integration of physical and digital dimensions (Vergine et alii, 2019), made possible by the synergy among artisanal production, digital design, and AI. In this domain, the relationship between Made in Italy and technology transcends the functional sphere to enter an existential dimension, permeating every artefact and giving rise to new forms of interaction and transfor-

mation – new expressions of the world (Quartu, 2024; Smelik, 2021). Fashion, in this sense, emerges as a disruptive force, capable of profoundly redefining the ontological categories of both artefacts and Made in Italy itself (Savi, 2023). As fashion becomes increasingly dematerialised within digital realms, value no longer resides solely in the physical object (Kawamura, 2023) but is transferred into unprecedented hyperrealities (Baudrillard, 1981) that rewrite, recertify, and re-narrate it.

For international comparability, case selection was based on supply chain mapping and semi-structured interviews with companies demonstrating high levels of technological exposure. Inclusion criteria encompassed data availability and quality (innovation in design workflows, technical documentation, operational records), enterprise size (primarily micro, small, and medium-sized), clearly defined roles within the value chain, digital maturity (use of 3D pipelines, digital twins, virtual sampling, and RFID / IoT systems for traceability and anti-counterfeiting), robustness of governance, openness to dialogue, and replicability potential. Comparisons focused on configurations in which physical–digital integration could be directly observed and supported by internal operational evidence, ensuring coherence and verifiability of results.

This dynamic is most clearly illustrated in the interview with FutureClo[4], a small- and medium-sized enterprise founded in 2021. As its CEO, German Picco, emphasises, FutureClo was established to bridge the technological gap that has historically characterised the fashion industry – traditionally resistant to digital innovation. Its operational model follows a phygital logic, merging Italian artisanal heritage with cutting-edge technological solutions, a synthesis made possible by the founders' deep roots in the fashion manufacturing tradition. FutureClo (Fig. 8) exemplifies the transcendence of fashion design from the material to the hyperreal domain, inverting the traditional sequence of the fashion process: the digital object precedes and legitimises the physical one.

As emerged during the interview, FutureClo's creative workflow (Fig. 9) begins with the dematerialisation of the fashion product – first through the creation of parametric avatars, followed by the iteration of textures and digital twins that anticipate material existence. Only subsequently does this immaterial dimension become objectified in the first physical prototype. The tangible prototype is not eliminated; instead, it is integrated into a collaborative supervision and optimisation process. This methodological inversion, however, does not represent a rupture with the Italian manufacturing tradition. As Caroline Evans (2023) observes, what is most modern always reveals itself in relation to what is most ancient. It is precisely what we recover from the past that offers the key to interpreting the present's contradictions.

FutureClo's phygital approach exemplifies this principle: digital design does not replace but dialogues with Italian artisanal legacies. Digital fashion and traditional pattern-making operate in concert, generating a virtuous process of mutual contamination between physical and digital dimensions. The interview highlights how 3D fashion practices are orchestrated by pattern makers and designers who, through a hybridisation of material and immaterial competences, can shape the digital realm and seamlessly translate it into the physical one. This synergy not only preserves but also enhances the identity of Made in Italy.

In this context, 3D files and renderings do not act merely as representational signs but as productive agents that, through their dialogue with materiality, generate an expanded hyperreality. The digital twin does not simulate the garment – it co-produces it, transforming the traditional relationship between original and copy. Yet this inversion does not subordinate the physical to the digital; instead, it establishes an ontological co-dependence in which both realms mutually define and reinforce one another.

The second case study, Temera[5], founded in 2009, specialises in implementing RFID technologies across the entire luxury fashion supply chain. Characterised by a vertically specialised strategy, the company (Fig. 10) addresses the critical challenges of traceability, anti-counterfeiting, and parallel market control through a process-based approach, in which the mapping of production flows precedes and informs technical customisation – reversing the conventional technology-first logic. Once again, this expanded hyperreal dimension becomes an arena of interaction among multiple entities, enabled by informational integration.

In this sense, the fashion artefact no longer exists solely in its materiality but becomes a mediator between the tangible and the intangible. As noted by Temera's CEO, Arcangelo D'Onofrio, in the interview conducted for this study, the digital transformation of fashion artefacts represents a crucial contemporary shift. According to D'Onofrio, the process of data-driven material transformation constitutes the core of the phygital paradigm: material objects must acquire the ability to communicate and convey information, becoming interactive elements capable of establishing a dialogue with the user (Fig. 11). The communicative object thus embodies this new relationship between the material and immaterial, where physical and digital experiences merge, transforming the artifact into a node of meanings and processes.

In such a hybrid environment, virtual and material dimensions coexist in a process of reciprocal negotiation, redefining the very boundaries of Made in Italy and of the Italian fashion system. Both companies demonstrate how innovation can generate new forms of skilled labour and value creation, rather than replacing existing competencies – confirming the potential of phygital transformation as both a technological and cultural project for the future of Italian fashion.

Informal education | The third trajectory explored in this study concerns the emergence in Italy of new forms of learning taking place outside traditional institutional channels. In a context shaped by digital transition and increasing attention to sustainability, a progressive hybridisation between production and learning spaces is unfolding, manifesting through informal practices (Franzo and Moradei, 2021), cross-sector collaborations, and experiential forms of education.

For international comparability, case selection for the informal education trajectory was based on mapping of the interfaces between production and training, semi-structured interviews, and on-site observations of teaching and production activities. Inclusion criteria included data availability and quality (public programs and calendars, teaching materials, process documentation, participation indicators, and training outcomes when available), accessibility for visits and dialogue, a focus on SMEs embedded in local industrial districts and territorial training institutions, the degree of integration between production processes and pedagogical devices (on-site laboratories, apprenticeships, and work-integrated learning), intensity of intergenerational knowledge transfer, maturity of governance and partnerships, and the potential for model replication and transferability beyond the local context.

The cases of Lanificio Paoletti[6] and ITS MITA[7] met these criteria. The former represents a manufacturing company that structures public engagement and situated learning along its production line, while the latter functions as an institutional node orchestrating a distributed school-enterprise-territory laboratory, equipped with advanced technologies and documented professionalisation pathways.

Located in Follina, within the Treviso Textile District, Lanificio Paoletti (Fig. 12) provides a paradigmatic example of this transformation. Founded in 1795, the mill remains a family-owned enterprise specialising in the complete-cycle production of carded wool yarns and fabrics. Over time, it has managed to preserve traditional techniques while integrating contemporary tools and design languages. As emerged during the interview, since 2013, through the initiative La Via della Lana, the company periodically opens its spaces to the public, offering guided tours, exhibitions, seminars, and educational activities involving designers, artisans, students, and the local community (Fig. 13). Within this context, the factory becomes a temporary incubator of knowledge, allowing the public to observe textile production processes firsthand while engaging in collective reflection on contemporary fashion, its challenges, and its potential.

This initiative is part of a growing phenomenon in Italy: the public opening of fashion production sites, primarily located in provincial areas (Franzo, 2022). These historically industrial spaces are being reconfigured as non-traditional learning environments, welcoming students, researchers, designers, as well as citizens, tourists, and consumers, and offering opportunities for direct engagement with the technical and design knowledge embedded in fashion manufacturing. This shift also reflects a communication strategy among luxury brands increasingly oriented toward promoting a culture of transparency in production processes, aiming to raise public awareness of the environmental and social implications of consumption choices.

The factories of the twenty-first century are no longer solely sites of production; they are open, dialogic environments, experiential spaces where knowledge transmission occurs through observation, interaction, and sharing. During La Via della Lana, the transformation concerns not only the hosted activities but also the architecture of the production site itself, which becomes both content and medium for learning. Lanificio Paoletti thus acts as a culturally responsible actor within its territory, building dialogic relationships among production, culture, and community in pursuit of a renewed vision of prosperity. As Rinaldi and Testa (2013) observe, this integration of aesthetic and cultural values results in a new value proposition for Made in Italy, where the product becomes a vehicle for territorial narratives, artisanal memories, and ethical awareness.



Fig. 14 | ITS MITA academy: experimentation with traditional leatherworking techniques as a tool for learning and knowledge transfer (credit: ITS MITA academy, 2024).



Fig. 15 | ITS MITA academy: students learn the principles of textile knowledge through hands-on experience (credit: ITS MITA academy, 2024).

The second case study, ITS MITA Academy (Fig. 14), is a foundation based in Tuscany specialising in higher technical education for the fashion industry. ITS MITA distinguishes itself through a portfolio of highly professional training programs designed to bridge the gap between formal education and the skills demanded by companies. In a region historically dedicated to textile and leather manufacturing, ITS MITA has helped shape a regional educational and productive ecosystem, connecting high schools, universities, enterprises, local authorities, and institutional stakeholders.

The result is a distributed laboratory across Tuscany, where students, teachers, professionals, and companies work together, fostering experiential learning, interdisciplinary experimentation, and knowledge exchange (Fig. 15). Students access advanced technologies, explore practices of sustainability, innovation, and circular design, and develop skills that are immediately applicable in the labour market. The laboratory thus functions as a catalyst for educational innovation, promoting active, contextualised teaching that responds to the evolving needs of the fashion industry.

Despite their differing configurations, both cases demonstrate the capacity to reinterpret their roles and action boundaries, functioning as dynamic learning platforms. Grounded in technical expertise and strong territorial roots, they operate as a combination of crafts (Lundvall and Johnson, 1994) – spaces where diverse competencies converge, fostering relationships among heterogeneous actors and generating new forms of collective knowledge.

From this perspective, Italian industrial districts, often described as declining from a production standpoint, emerge today as ideal contexts for experimenting with new training pathways. Their transformation into advanced cultural hubs (Sacco and Tavano Blessi, 2005) rests on a reconfiguration of the relationship between product and territory, where material production intertwines with symbolic and relational dimensions. Education is no longer limited to cognitive transmission but becomes a situated process, rooted in experience and practice (Faiferri, Bartocci and Pusceddu, 2017), responding to the urgent need to train professionals capable of critically engaging with contemporary complexity.

The informal education paradigm in contemporary fashion thus represents a key interpretive lens for understanding the ongoing transformation of Made in Italy. Factories, connected through networks of physical spaces and social actors, are redefined as distributed learning environments, where innovative pedagogical models are tested and new visions of the future are constructed. These spaces enable intergenerational knowledge transfer, promote skills aligned with sustainability and digital transitions, and foster inclusive education, ultimately strengthening local economies and the cultural resilience of the Italian fashion system.

Synergies and trade-offs among SDGs | The three transformative trajectories outlined in this study demonstrate the systemic rethinking potential of Made in Italy, generating tangible benefits for SDG 8 (Decent Work and Economic Growth). Specifically, the transition toward circular systems within the fashion sector fosters new qualified employment along the value chain. It enhances resource-use efficiency, thereby contributing to Target 8.4 (Improve resource efficiency and decouple economic growth from environmental degradation).

Similarly, the integration of phygital scenarios – including 3D modelling, digital twins, traceability systems, and IoT – enables product / service innovations (such as virtual sampling and end-to-end traceability) that enhance competitiveness and productivity, in line with Target 8.2 (Achieve higher levels of productivity through diversification, technological upgrading, and innovation). This trajectory also generates hybrid professional roles that bridge artisanal expertise and digital skills, thereby supporting Target 8.3 (Promote entrepreneurship and the growth of micro-, small-, and medium-sized enterprises).

The informal education trajectory strengthens workers' competencies, sectoral resilience, and socio-cultural prosperity by fostering synergies between craft knowledge and digital capabilities, contributing to Targets 8.5 (Achieve full and productive employment and decent work for all) and 8.6 (Reduce the proportion of youth not in employment, education, or training – NEET). Indirectly, this trajectory also stimulates entrepreneurial dynamics and reinforces MSMEs, again contributing to Target 8.3. Beyond the direct benefits associated with SDG 8, the proposed approach activates a dense network of direct and indirect synergies with other Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda. Circular systems support sustainable production and consumption models (SDG 12) and promote climate action (SDG 13), while also generating co-benefits for life below water and life on land (SDGs 14 and 15). Phygital scenarios align with SDG 9 (Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialisation, and foster innovation) and, by optimising data and processes, contribute to SDG 7 (Ensure access to affordable, reliable, sustainable, and modern energy). Informal education, meanwhile, directly supports SDG 4 (Ensure inclusive and equitable quality education and promote lifelong learning opportunities for all), while fostering professional inclusion and career progression, contributing to the reduction of inequalities and gender gaps (SDGs 5 and 10).

Nevertheless, several tensions and trade-offs persist among these objectives. In the absence of integrated strategies, the pursuit of economic growth may conflict with ecosystemic constraints. Specifically, phygital scenarios contribute to SDG 7 only when digital infrastructures are powered by renewable and energy-efficient sources. Similarly, implementing circular systems entails short-term transition costs that may temporarily affect employment and competitiveness. These considerations underscore the need for intersectoral and systemic coordination capable of managing goal conflicts and optimising synergies to ensure that the transformation of Made in Italy aligns coherently with the principles of sustainable development.

Conclusions | This paper has explored the evolutionary trajectories of the Italian fashion system through the lens of three transformative dimensions: circular systems, phygital scenarios, and informal education. The analysis of emblematic case studies demonstrates that the redefinition of Made in Italy is not merely a reaction to external pressures such as sustainability and digitalisation, but rather an active reconfiguration of cultural, technological, and organisational paradigms. The cases of Beste and DIFE illustrate that circularity must be addressed systemically, integrating material flows, infrastructures, and regulatory frameworks. Rather than representing isolated best practices, they embody structural innovations that redefine the value chain and promote resilience through local knowledge and collaboration.

The phygital innovation exemplified by FutureClo and Temera shows how digital and physical domains can co-evolve, generating hybrid models of design and production that enrich the narrative and experiential dimensions of fashion. These cases confirm that adopting digital tools does not undermine traditional craftsmanship but instead amplifies its relevance in an increasingly interconnected, data-driven landscape. The rise of informal educational practices, as seen in Lanificio Paoletti and ITS MITA Academy, reveals the emergence of learning environments embedded within production contexts, where situated and intergenerational exchanges foster the development of new skills aligned with both ecological and technological transitions.

Taken together, these findings suggest that the transformation of Made in Italy requires rethinking not only what is produced, but also how, by whom, and according to which values. The sustainable renewal of Made in Italy, as articulated through the three trajectories examined, generates a multiplicity of co-benefits aligned with the 2030 Agenda, while also exposing the need for systemic governance to manage the opportunities and inherent constraints of such transformation. A transdisciplinary and critical approach is thus essential to maximise synergies – integrating economic, environmental, cultural, and social dimensions within a unified design framework – and to mitigate trade-offs through coordinated policies, design-led strategies, and responsible innovation.

From this perspective, the transformation of Italian fashion serves as an interdisciplinary laboratory, offering insights to rethink production and consumption dynamics and advance decent work, sustainable growth, and the integrated achievement of all Sustainable Development Goals. Furthermore, the three trajectories identified are transferable beyond the Italian fashion sector, provided that they are adapted to the socio-cultural, productive, and disciplinary specificities of the target contexts. Circular approaches can be applied to related manufacturing industries (e.g., furniture and agri-food) by identifying operational intersections and technical requirements; phygital principles can be extended to other creative industries and territories where communities of practice are open to experimentation; and informal, collaborative learning models can inform both curricular and extracurricular programs, fostering a transdisciplinary educational dialogue. Transferability, however, should be conceived as project-based translation, not replication: solutions must be recalibrated to local material cultures, organisational structures, and infrastructural conditions to ensure both effectiveness and sustainability. Moreover, the research suggests important implications for industrial policy and the practical scalability of results. Policymakers could leverage the evidence presented here to design strategic roadmaps that facilitate the sector's transition through fiscal and financial incentives supporting investment in sustainable Industry 4.0 technologies, streamlined procedures for infrastructural adaptation, and the introduction of progressive yet effective regulations (e.g., recycled-material quotas and traceability standards) accompanied by appropriate support mechanisms.

At the same time, the entrepreneurial and educational ecosystem can extend these innovations beyond pioneering contexts, with particular attention to the applicability of AI-enabled design tools for micro and small enterprises, including those located outside traditional industrial districts. Promoting the adoption of AI solutions among these smaller actors would help diffuse innovation more equitably, thereby reducing territorial and structural disparities. These prospects – spanning both the macro scale (system-level policies) and micro scale (technological empowerment of SMEs) – indicate that the debate initiated by this research is far from concluded. The conclusions presented here are intended as a starting point for further interdisciplinary inquiry and experimentation, inviting the scientific community to engage with and critically expand upon the ideas proposed.

A promising direction for future research could involve the longitudinal monitoring of impacts generated by the identified trajectories. For instance, it would be valuable to assess changes in employment and competitiveness indicators in the Italian fashion sector between 2026 and 2030, to determine the extent to which the adoption of circular practices and phygital solutions contributes to the creation of new qualified jobs and the strengthening of the industrial fabric. On the environmental side, a more extensive evaluation of the proposed innovations' effects could be achieved through comprehensive Life Cycle Assessment (LCA) studies that quantify the actual benefits in terms of reduced environmental impacts across the entire supply chain and identify potential hidden trade-offs.

Acknowledgements

This research was funded by the Italian Ministry of Universities and Research (MUR) within the framework of the PRIN 2022 – PNRR programme, for the project 'ResHaping Made in ITAly (RHITA) – Circular models for Italian fashion heritage and manufactures through digital inclusivity and conscious innovation' (Project Code P20225PHBW_004, University of Florence). The project is supported by the Italian Recovery and Resilience Plan (PNRR), Mission 4 'Education and Research', Component C2, Investment 1.1 'Fund for the National Research Program and Projects of Significant National Interest (PRIN)', pursuant to Italian Ministerial Decree No. 1409 of September 14, 2022.

This paper is the result of a shared reflection among the Authors. Nevertheless, the introductory section, 'State of the art: Re-shaping Fashion', 'Synergies and trade-offs among SDGs', and 'Conclusions' are to be attributed to P. Franzo, A. Quartu, and M. Tufarelli, 'Circular systems' to M. Tufarelli, 'Phygital scenarios' to A. Quartu and the 'Informal education' to P. Franzo.

Notes

1) The mapping was jointly conducted by the 'Luigi Vanvitelli' University of Campania, Politecnico di Milano, 'Iuav' University of Venezia, University of Florence, and

University of Siena within the framework of the RHITA research project. It outlines an initial national survey of 290 companies operating in the fashion macro-sector. Based on this dataset, each University selected a sub-sample to be interviewed through semi-structured video interviews. The research prioritised cases characterised by a high degree of innovation (in processes and/or products), heterogeneity along the supply chain, and transformative potential across the three axes of investigation: phygital scenarios, informal education, and circular systems.

2) Online interview conducted by A. Quartu and M. Tufarelli on 4 March 2025.

3) Online interview conducted by A. Quartu and M. Tufarelli on 6 March 2025.

4) Online interview conducted by A. Quartu and P. Franzo on 24 March 2025.

5) Online interview conducted by A. Quartu and P. Franzo on 12 March 2025.

6) Online interview conducted by A. Quartu on 1st April 2025.

7) Online interview conducted by A. Quartu and M. Tufarelli on March 25, 2025.

References

Barbero, S. and Ferrulli, E. (2023), "Transizione ecologica e digitale – Il Design Sistemico nei processi di innovazione aperta delle PMI | Ecological and digital transition – Systemic Design in SMEs open innovation processes", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 13, pp. 269-280. [Online] Available at: doi. org/10.19229/2464-9309/13232023 [Accessed 18 September 2025].

Barile, N. (2006), "Made in Italy – Da 'Country of Origin' a Metabrand", in Colaiacono, P. (ed.), *Fatto in Italia – La cultura del Made in Italy (1960-2000)*, Meltemi, Milano, pp. 133-157.

Baudrillard, J. (1981), *Simulacres et simulation*, Éditions Galilée, Paris.

Barucco, M. A., Bulegato, F. and Vaccari, A. (eds) (2020), *Remanufacturing Italy – L'Italia nell'epoca della postproduzione*, Mimesis Edizioni, Milano. [Online] Available at: mimesisbooks.com/index.php/mim/catalog/view/39/633/3420-1 [Accessed 18 September 2025].

Becattini, G. (2004), *Industrial Districts – A new approach to industrial change*, Edward Elgar Publishing, Cheltenham.

Bertola, P. and Teunissen, J. (2018), "Fashion 4.0 – Innovating Fashion Industry through Digital Transformation", in *Research Journal of Textile and Apparel*, vol. 22, issue 4, pp. 352-369. [Online] Available at: doi.org/10.1108/RJTA-03-2018-0023 [Accessed 18 September 2025].

Casciani, D. (2023), "Moda e Design Modulare – Modularità come strategia di design per la sostenibilità | Fashion and Modular Design – Modularity as a design strategy for sustainability", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 326-337. [Online] Available at: doi org/10.19229/2464-9309/14282023 [Accessed 18 September 2025].

Casciani, D., Chkanikova, O. and Pal, R. (2022), "Exploring the nature of digital transformation in the fashion industry – Opportunities for supply chains, business models, and sustainability-oriented innovations", in *Sustainability | Science, Practice and Policy*, vol. 18, issue 1, pp. 773-795. [Online] Available at: doi.org/10.1080/15487733.2022.2125640 [Accessed 18 September 2025].

Colombi, C. (2015), "Made in Italy – Rethinking a Century of Italian Design", in *Journal of Modern Italian Studies*, vol. 20, issue 1, pp. 140-142. [Online] Available at: dx.doi.org/10.1080/1354571x.2015.974912 [Accessed 18 September 2025].

Dellapiana, E. (2022), *Il Design e l'invenzione del Made in Italy*, Einaudi, Torino.

Di Dio, S., Inzerillo, B., Monterosso, F. and Russo, D. (2022), "Design e transizione digitale – Nuove sfide design-driven per l'innovazione tecno-sociale | Design and digital transition – New design-driven challenges for techno-social innovation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 12, pp. 212-225. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/12192022 [Accessed 18 September 2025].

D'Itria, E. (2023), "Circular fashion – Evolving practices in a changing industry", in *Sustainability | Science, Practice and Policy*, vol. 19, issue 1, article 2220592, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1080/15487733.2023.2220592 [Accessed 18 September 2025].

Evans, C. (2023), *Fashion at the edge – Spectacle, Modernity and Deathliness*, Yale University Press, New Haven.

Fabbri, F. (2021), *La moda contemporanea – II – Arte e stile dagli anni Sessanta alle ultime tendenze*, Einaudi, Torino.

Faiferri, M., Bartocci, S. and Pusceddu, F. (2017), "Spazi urbani d'apprendimento", in Galdini, R. and Marata, A. (eds), *La città creativa – Spazi pubblici e luoghi della quotidianità*, CNAPPC, Roma, pp. 205-214. [Online] Available at: cittacreative.eu/wp-content/uploads/2017/04/La_citt%C3%A0_creativa_2017.pdf [Accessed 18 September 2025].

Fletcher, K. and Tham, M. (2019), *Earth logic – Fashion action research plan*, JJ Charitable Trust, London. [Online] Available at: katefletcher.com/wp-content/uploads/2019/10/Earth-Logic-plan-FINAL.pdf [Accessed 18 September 2025].

Franzo, P. (2022), "Showing fashion production – Le nuove identità dei luoghi della manifattura in Italia", in *AND | Rivista di Architetture, Città e Architetti*, vol. 42, issue 2, pp. 30-37. [Online] Available at: and-architettura.it/index.php/and/article/view/589 [Accessed 18 September 2025].

Franzo, P. and Moradei, C. (2021), "Imparare in provincia – Le fabbriche della moda come luoghi dell'apprendimento", in *Officina**, vol. 34, pp. 96-99. [Online] Available at: officinajournal.it/officina/index.php/journal/issue/view/officina34/officina34 [Accessed 18 September 2025].

Franzo, P., Quartu, A. and Cianfanelli, E. (2024), "Co-Designing Fashion with AI in the Phygital Scenario", in *Convergências | Revista de Investigação e Ensinodas Artes*, vol. 17, issue 4, pp. 79-90. [Online] Available at: doi.org/10.53681/c1514225187514391s.34.269 [Accessed 18 September 2025].

Hajahmadi, S., Calvi, I., Stacchiotti, E., Cascarano, P. and Marfia, G. (2024), "Heritage elements and Artificial Intelligence as storytelling tools for virtual retail environments", in *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, vol. 34, article e00368, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00368 [Accessed 18 September 2025].

Kawamura, Y. (2023), *Fashion-ology – Fashion Studies in the Postmodern Digital Era*, Bloomsbury, London.

Kirchherr, J., Yang, N.-H. N., Schulze-Spüntrup, F., Heerink, M. J. and Hartley, K. (2023), "Conceptualising the circular economy (Revisited) – An analysis of 221 definitions", in *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 194, article 107001, pp. 1-32. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001 [Accessed 18 September 2025].

Koszewska, M. (2018), "Circular economy – Challenges for the textile and clothing industry", in *AUTEX Research Journal*, vol. 18, issue 4, pp. 337-347. [Online] Available at: doi.org/10.1515/aut-2018-0023 [Accessed 18 September 2025].

Lazzaretti, L. and Oliva, S. (2022), "Exploring the marriage between fashion and Made in Italy and the key role of G. B. Giorgini", in *European Planning Studies*, vol 30, issue 9, pp. 1717-1735. [Online] Available at: doi.org/10.1080/09654313.2020.1833842 [Accessed 18 September 2025].

Lundvall, B. and Johnson, B. (1994), "The Learning Economy", in *Journal of Industry Studies*, vol. 1, issue 2, pp. 23-42. [Online] Available at: doi.org/10.1080/1366271940 0000002 [Accessed 18 September 2025].

Mascitti, J. and Paciotti, D. (2024), "Verbal Design Modelling – Complessità, IA e innovazione di prodotto | Verbal Design Modelling – Complexity, AI and product innovation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 344-353. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16292024 [Accessed 18 September 2025].

Mora, E. and Volonté, P. (2014), "Local Culture and Global Market – A Conversation with Protagonists of the Italian Fashion System", in *Fashion Practice | The Journal of Design, Creative Process & Fashion Industry*, vol. 6, issue 2, pp. 263-272. [Online] Available at: doi.org/10.2752/175693814X14035303880795 [Accessed 18 September 2025].

Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T. and Gwilt, A. (2020), "The environmental price of fast fashion", in *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 1, pp. 189-200. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9 [Accessed 18 September 2025].

Quartu, A. (2024), "Identità metamorfiche – Le trasformazioni della moda con l'intelligenza artificiale", in *AND | Rivista di Architetture, Città e Architetti*, vol. 45, issue 1, pp. 75-81. [Online] Available at: and-architettura.it/index.php/and/article/view/624 [Accessed 18 September 2025].

Rinaldi, F. R. and Testa, S. (2013), *L'impresa moda responsabile – Integrare etica ed estetica nella filiera*, Egea, Milano.

Sacco, P. L. and Tavano Blessi, G. (2005), "Verso un nuovo modello di sviluppo sostenibile – Distretti culturali e aree urbane", in *Meridiana | Rivista di Storia e Scienze Sociali*, vol. 54, pp. 187-209. [Online] Available at: doi.org/10.140 0/78440 [Accessed 18 September 2025].

Särmäkari, N. and Vänskä, A. (2022), "Just hit a button! – Fashion 4.0 designers as cyborgs, experimenting and designing with generative algorithms", in *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, vol. 15, issue 2, pp. 211-220. [Online] Available at: doi.org/10.1080/17543266.2021.1991005 [Accessed 18 September 2025].

Savi, L. (2023), *A New History of Made in Italy – Fashion and Textiles in Post-War Italy*, Bloomsbury, London. [Online] Available at: bloomsburyfashioncentral.com/encyclopedia?docid=b-9781350247789 [Accessed 18 September 2025].

Smelik, A. (2021), "A Posthuman Turn in Fashion", in Paulicelli, E., Manlow, V. and Wissinger, E. (eds), *The Routledge Companion to Fashion Studies*, Routledge, London, pp. 57-64. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9780429264 405-6 [Accessed 18 September 2025].

Tebaldi, L., Brun, A. and Bottani, E. (2022), "Evidences on sustainability issues in the Fashion Supply Chain – An empirical study in Italy", in *Sustainable Production and Consumption*, vol. 33, pp. 651-663. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.spc.2022.07.032 [Accessed 18 September 2025].

Vaccari, A. (2023), "Learned in Italy – An Approach to Made in Italy Through the Lens of Fashion Education", in Cunha, J., Broega C. A., Carvalho, H. and Providência, B. (eds), *Advances in Fashion and Design Research II, Proceedings of the 6th International Fashion and Design Congress, CIMODE 2023, Mexico City, Mexico, October 4-6, 2023*, Springer, Cham, pp. 280-286. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-031-43937-7_25 [Accessed 18 September 2025].

Vergine, I., Brivio, E., Fabbri, T., Gaggioli, A., Leoni, G. and Galimberti, C. (2019), "Introducing and implementing phygital and augmented reality at work", in *Studi Organizzativi*, vol. 21, issue 2, pp. 137-163. [Online] Available at: digital.casalini.it/10.3280/SO2019-002006 [Accessed 18 September 2025].

Vezzoli, C., Conti, G. M., Macrì, L. and Motta, M. (2022), *Designing Sustainable Clothing Systems – The design for environmentally sustainable textile clothes and its Product-Service Systems,* FrancoAngeli, Milano. [Online] Available at: series.francoangeli.it/index.php/oa/catalog/book/804 [Accessed 14 October 2025].

Whitty, J. (2021), "Fashion Design for Holistic Systems", in Gardetti, M. A. and Muthu, S. S. (eds), *Sustainable Design in Textiles and Fashion*, Springer, Cham, pp. 1-22. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-981-16-2466-7_1 [Accessed 18 September 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 358-369
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18222025

Article Info

Received 10 September 2025
Revised 20 October 2025
Accepted 22 October 2025
Published 30 December 2025

REINTERPRETARE IL RUOLO ECOLOGICO DELL'ACQUA
Materiali viventi e design inclusivo

REINTERPRETING WATER'S ECOLOGICAL ROLE
Integrating living materials for inclusive design

Elif Süyük Makaklı, Ebru Yücesan Altay

Abstract

L'acqua ha storicamente agito come catalizzatore culturale dello spazio, plasmando la vita collettiva attraverso la sua presenza ecologica e sensoriale. In tale ottica l'articolo reinterpreta il ruolo ecologico dell'acqua attraverso un approccio 'ricerca attraverso il design' che sviluppa un quadro concettuale per la progettazione di interventi di micro-architetture. Lo studio esplora come i materiali a base biologica, e in particolare i compositi di micelio e i sistemi bioluminescenti, possano migliorare il coinvolgimento multisensoriale e la consapevolezza ecologica negli spazi pubblici. Attingendo alla recente letteratura internazionale e alla ricerca nel campo del progetto il contributo individua parametri per le prestazioni luminose, il comportamento dei materiali e la reattività ambientale. La proposta che ne risulta posiziona l'acqua come un mezzo spaziale attivo, percettibile e inclusivo, contribuendo ai dibattiti attuali sul design multispecie, l'urbanistica sensoriale e il legame tra gli SDG 6, 11 e 13.

Water has historically acted as a cultural catalyst for space, shaping collective life through its ecological and sensory presence. With this in mind, the article reinterprets the ecological role of water through a 'research-through-design' approach that develops a conceptual framework for micro-architectural design. The study explores how bio-based materials, particularly mycelium composites and bioluminescent systems, can enhance multisensory engagement and ecological awareness in public spaces. Drawing on recent international literature and design research, the contribution identifies parameters for luminous performance, material behaviour, and environmental responsiveness. The resulting proposal positions water as an active, perceptible, and inclusive spatial medium, contributing to current debates on multispecies design, sensory urbanism, and the link between SDGs 6, 11, and 13.

Keywords

acqua e spazio pubblico, urbanistica sensoriale, ricerca attraverso il design, micro-architetture, resilienza ecologica e sociale

water and public space, sensory urban planning, research-through-design, micro-architectures, ecological and social resilience



Elif Süyük Makaklı, Architect and PhD, is an Associate Professor and Vice Dean at the Faculty of Art, Design and Architecture, Department of Architecture, Işık University in Istanbul (Turkey). Her research focuses on architectural design, design education, and technology in architecture, with publications in national and international journals and conferences. E-mail: elif.suyuk@isikun.edu.tr

Ebru Yücesan Altay, MSc Interior Architect, is a Research Assistant and PhD Candidate at the Department of Interior Architecture and Environmental Design, Hacettepe University (Turkey). Her research focuses on responsive architecture, living architecture, living materials, and interactive spaces. E-mail: ebruyucesann@gmail.com

Storicamente le qualità multisensoriali dell'acqua – visive, acustiche e termiche – hanno plasmato la vita collettiva e rafforzato la coesione sociale al di là del suo ruolo infrastrutturale. Nei contesti urbani contemporanei questo rapporto si è tuttavia indebolito, poiché l'acqua diventa spesso decorativa o nascosta, riflettendo una crescente distanza dall'ecosistema naturale: questa condizione richiede approcci progettuali che ridefiniscano l'acqua come mezzo attivo di percezione e consapevolezza ecologica. Anche la letteratura internazionale sottolinea il ruolo dell'acqua nella definizione dello spazio pubblico: Norberg-Schulz (1980) inquadra le forze elementari, tra cui l'acqua, come ancore dell'identità collettiva, collocandole all'interno della fenomenologia della creazione di luoghi in quanto agenti centrali dell'identità spaziale; contributi nel settore dell'urbanistica evidenziano l'importanza delle esperienze multisensoriali legate all'acqua per la resilienza urbana (Pallasmaa, 2005; Bille and Sorensen, 2016; Gruosso et alii, 2025); studi sul paesaggio urbano dimostrano che l'acqua contribuisce alla creazione di ambienti rigeneranti, favorendo sia i sistemi ecologici che il benessere umano (Önge, 1997; White et alii, 2013; Selman, 2012; Lu et alii, 2025).

Il ruolo dell'acqua nello spazio pubblico si sviluppa attraverso diversi livelli concettuali: 1) Vita e Natura come fonte di vita che collega gli insediamenti ai sistemi ecologici e simboleggia la vitalità; 2) Purificazione e Tranquillità che incarnano la purificazione fisica e metafisica creando luoghi di ristoro fisico e mentale; 3) Rituale sociale e Aggregazione fungendo da infrastruttura in cui le fonti d'acqua diventano teatri di interazione sociale, favorendo incontri e rituali collettivi (Manni and Valzano, 2023). Nonostante la crescente enfasi sulle infrastrutture blu-verdi (Fletcher et alii, 2015; Newman, 2020; Corradi et alii, 2024), l'acqua nelle città rimane spesso nascosta o con valenza ornamentale, priva di risonanza sensoriale e sociale (Kaika, 2005). In linea con quanto evidenziato da Cesare Sposito (2017), l'acqua ha agito a lungo come componente sia materiale che simbolico dell'architettura e come mediazione tra il dominio ambientale e quello percettivo, che è la prospettiva centrale nell'inquadramento concettuale di questo studio.

All'interno di questo quadro caratterizzato dalla perdita di molteplici valori e significati dell'acqua il contributo illustra il progetto di una micro-architettura che ha l'obiettivo di far riappropriare l'acqua del suo ruolo di catalizzatore di benessere e aggregazione sociale. Concettualizzando e riformulando principi spaziali e sociali dell'antichità il progetto si allinea alle più ampie sfide globali e agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) delle Nazioni Unite (UN, 2015): in particolare contribuisce all'SDG 6 (Acqua pulita e servizi igienico-sanitari), mettendo in primo piano l'accessibilità dell'acqua e il suo ruolo di sostegno alla vita, all'SDG 11 (Città e comunità sostenibili), migliorando l'inclusività e la qualità degli spazi pubblici, all'SDG 12 (Consumo e produzione responsabili), attraverso l'uso di materiali a base biologica, e all'SDG 13 (Azione per il clima), inquadrando l'acqua come regolatore microclimatico nel contesto della resilienza ecologica.

Lo studio reinterpreta il ruolo ecologico dell'acqua attraverso una prospettiva di ricerca-progetto che collega prestazioni ambientali e percezione spaziale, proponendo un quadro concettuale per interventi di micro-architetture che utilizzano materiali a base biologica, e in particolare compositi di micelio e sistemi bioluminescenti, come mediatori di coinvolgimento multisensoriale. Basandosi sui parametri prestazionali desunti da studi recenti la ricerca delinea un modello metodologico per la progettazione sensibile al clima, riposizionando l'acqua come mezzo percettivo attivo che amplia il dibattito sulla progettazione multispecie e sull'urbanistica sensoriale. Dal punto di vista strutturale l'articolo si sviluppa collocando l'acqua in contesti storici, delineando la metodologia di 'ricerca attraverso la progettazione', presentando il caso di studio e la strategia dei materiali e concludendo con alcune riflessioni sui limiti e sulla replicabilità della progettazione sensibile al clima.

Approcci simili nella recente letteratura scientifica hanno esplorato l'innovazione nell'ambito dell'uso dell'acqua e dei materiali in ambito urbano a diverse scale: Solarek (2021) indaga la gestione dello spazio idrico a livello urbano, ponendo l'accento sulle strategie di pianificazione piuttosto che sulla progettazione specifica del sito, Cortesão e Lenzholzer (2022) delineano il potenziale più ampio della 'ricerca attraverso il design' nella pratica urbana e paesaggistica, mentre Langie, Rybak-Niedziółka e Hubacíková (2022) hanno studiato le tipologie e i valori culturali delle fontane pubbliche, fornendo una base preziosa per comprenderne il ruolo sociale ed ecologico. Il presente studio implementa queste intuizioni sviluppando una micro-architettura che comprende acqua e 'materiali a base biologica', riformulandone la lettura tipologica in una proposta adattabile e orientata al design per lo spazio pubblico contemporaneo.

Casi studio | Le pratiche internazionali che integrano acqua e materiali biologici sono state analizzate, comparate e organizzate in base a scala, strategia idrica, integrazione dei biomateriali e trasferibilità, delineando i criteri di valutazione per i diversi approcci sperimentali e applicati (Tab. 1). La revisione comparativa rivela due tendenze principali: i progetti sperimentali (quali Fungal Sensing Skin e Bioluminescent Wood) promuovono prevalentemente il potenziale sensoriale ed ecologico dei materiali viventi, ma devono affrontare limiti di durata, manutenzione e costo, mentre gli interventi a scala urbana (ad esempio Watersquare e Building on the Water) traducono efficacemente l'acqua in un'esperienza collettiva, ma mancano di innovazione materiale e di un feedback ecologico a lungo termine. I progetti a scala intermedia come Aguahoja e 3D WASP Living Bio-based Materials dimostrano invece una capacità di sintesi promettente che unisce sensibilità ambientale e sperimentazione progettuale.

In questo panorama lo studio proposto si posiziona come micro-architettura della scala intermedia, combinando le qualità performative e sensoriali dei materiali a base biologica e l'inclusività dello spazio pubblico. Le risultanze derivanti da questa analisi comparativa hanno informato il quadro metodologico e i criteri di prestazione (configurazione dei componenti, intensità luminosa, resistenza dei materiali e neutralità del pH), con l'obiettivo di stabilire un modello replicabile per una progettazione in spazi pubblici sensibile al clima.

Metodologia e fasi della ricerca | Il presente studio si basa sulla metodologia 'ricerca attraverso il design' che considera il processo progettuale non solo come percorso verso un risultato, ma come una modalità primaria di indagine e produzione di conoscenza. L'approccio si basa su pratiche esplorative e orientate ai principi delineati da studiosi quali quelli di Gaver (2012), Cortesão e Lenzholzer (2022) e Uzunkaya e Kahvecioglu (2022), e in particolare su sperimentazioni comparabili nel settore della progettazione ambientale e idrica, come quella di Valente et alii (2022) su infrastrutture verdi e acque piovane, che evidenziano la rilevanza dell'acqua per l'integrazione dei sistemi ecologici nell'indagine guidata dal design. In questo quadro la domanda centrale della ricerca su 'come reintegrare l'acqua con la funzione di catalizzatore culturale, ecologico e sensoriale negli spazi pubblici contemporanei' viene esplorata attraverso una sequenza integrata di fasi analitiche e generative di 'ricerca attraverso il design', dall'analisi contestuale e dalla reinterpretazione tipologica ai principi modulari e alla sintesi spaziale (Fig. 1).

Il Campus Sile dell'Università FMV Işık (Turchia) è stato scelto come sede principale di questa sperimentazione in quanto rappresenta una micro-città multifunzionale immersa nella natura. Il Campus ospita una vasta gamma di utenti, tra cui studenti, personale accademico e amministrativo e visitatori, integrando al contempo diverse funzioni quali istruzione, sport, ristorazione e ricreazione. Questa pluralità di utenti e funzioni determina una simultanea presenza di svariate esigenze socio-spaziali e offre preziosi stimoli per la progettazione degli spazi pubblici. L'analisi, che ha mappato nel Campus gli elementi d'acqua (attivi e passivi), i percorsi, i sistemi di collegamento (rampe, scale, terrazze) e i flussi di utenti, ha rivelato che quasi tutte le vasche d'acqua si trovano lungo percorsi, rampe e scale, eccetto una, che è nella piazza principale ed isolata. L'analisi dei luoghi restituisce quindi relazioni frammentate e deboli tra acqua, spazio e vita sociale, che hanno costituito il tema centrale del progetto.

I criteri di progettazione sono stati modellati sulla base delle interazioni tra acqua e uomo che intercorrevano nell'antichità, trasferendone i principi fondamentali di convivialità, socialità e multisensorialità in chiave contemporanea, attraverso una rilettura dei tre ruoli principali dell'acqua nella vita pubblica: sociale (riunire le persone e promuovere esperienze condivise), sensoriale (arricchire l'esperienza spaziale attraverso suono, materia e luce) ed ecologico (regolare i microclimi e dare visibilità alla presenza ciclica dell'acqua).

Il processo di produzione impiega stampi e fabbricazione digitale per i componenti in micelio, garantendo precisione e scalabilità e generando al contempo geometrie organiche che si adattano alla topografia del sito. I materiali viventi – compositi di micelio e sistemi bioluminescenti – sono elementi fondamentali del progetto per le loro prestazioni ecologiche e sensoriali misurabili attraverso indicatori specifici.

Lo sviluppo del progetto è strutturato in cinque fasi: 1) Mappatura del contesto attraverso l'identificazione delle vasche d'acqua, dei percorsi, dei flussi di utenti e dei dati microclimatici; 2) Reinterpretazione dei 'luoghi dell'acqua' del passato e loro adattamento al contesto del Campus; 3) Definizione del quadro di riferimento delle prestazioni per stabilire criteri misurabili che colleghino le dimensioni ecologiche, materiali e sensoriali; 4) Restituzione dei concept progettuali attraverso diagrammi, prospettive, sezioni e modelli 3D come strumenti metodologici per la valutazione; 5) Sintesi per l'in-

	Case Study	Scale / Typology	Water Strategy / Technology	Bio-based Material Integration	Governance & Monitoring Data	Strengths	Limitations	Barriers (Cultural, Technical, Economic)	Transferability (Mediterranean context, health standards, costs)	References / Links
1	Fungal Sensing Skin – Living Mycelium Interface	Material-scale experimental prototype	Moisture-responsive sensing through fungal hyphae	Living mycelium network integrated as a bio-sensing material	Academic research supervision	Living responsive material enabling real-time environmental sensing	Fragile and humidity-dependent	Technical complexity and scalability	Low outdoor applicability, Limited transfer to architecture	Adamatzky, Gandia and Chiolerio (2021)
2	Designing with Biomaterials for Responsive Architecture	Building envelope / responsive façade prototype	Hygro-responsive surface swelling and contraction	Hydrogel-biomaterial composites integrated into facade panels	Academic research team monitoring humidity / response cycles	Dynamic adaptation to moisture changes	Slow response time under rapid climate shifts	Technical complexity, cost of materials, and lack of industry acceptance	Potential in Mediterranean climates but limited by cost and durability constraints	Koi Khoo and Shin (2018)
3	The Aguahoja Water-Based Fabrication project by Oxman	Architectural-component hybrid at material and facade scale	Water-sensitive hydrogel extrusion forming responsive structures	Chitosan, alginate, and cellulose are used in graded biocomposites	The MIT Media Lab led research team monitors humidity, structural change and decay behaviour	Adaptive, recyclable, and highly programmable system	Limited structural stability and long-term durability	High cost, technical complexity, and low market adoption	Promising in Mediterranean climates but limited by durability and cost	oxman.com/projects/water-based-fabrication?utm_source
4	3D WASP – Living bio-based materials	Porous microclimate modules at urban / neighbourhood scale	Porosity and water retention manage humidity and distribute moisture	Mixtures of seeds, mycelium, dredged materials, and clay are bioprinted into living composites	Urban Reef startup tracks moisture absorption and biological growth in prototypes	Promotes biodiversity and microclimates through living infrastructure	Long-term durability and structural integrity under variable climates remain uncertain	High fabrication costs, technical complexity, and lack of mainstream acceptance	Conceptually viable for Mediterranean climates, though constrained by material resilience and cost	3dwasp.com/en/3d-printing-living-bio-based-materials-with-urban-reef/?utm_source
5	Lumínico – Bioluminescent Habitat to Enhance the Biodiversity	Module-scale habitat units designed for indoor / urban environments	Humidity control and mist injection sustain fungal bioluminescence	Living fungal cultures embedded in printed biomaterial substrates	Research by Fabricademy projects using sensors (humidity, lux) to monitor performance	Produces low-intensity light sustainably via living organisms	Uncertain lifespan and dependence on controlled conditions	High production cost, limited biological knowledge, and low market readiness	Potential for Mediterranean indoor use, but limited outdoors by durability and climate constraints	Ruiz Galloza (2025)
6	Bioluminescent Wood Created Using Fungi	Material-scale bioluminescent wooden element prototypes	Moisture rehydration cycles trigger bioluminescent emission in fungal-wood composites	Fungi (Desarmillaria tabescens) colonise balsa wood blocks to form living bioluminescent material	Conducted by Empa researchers, performance was measured in moisture content vs. light emission	Produces light without external power using living materials	Glow fades as lignin degrades and depends on high moisture levels	High maintenance, limited lifespan, and material cost issues	Promising for indoor or shaded Mediterranean settings, but outdoor durability is limited	Violo (2025)
7	Watersquare in Benthemplein, Rotterdam (The Netherlands)	Urban-scale plaza combining leisure and flood control	Collects rainwater in stepped basins for temporary storage	Uses planted zones and green edges for infiltration	Managed by Rotterdam Climate Initiative with citizen input	Makes stormwater management visible and interactive	Limited capacity and high maintenance needs	High cost, technical complexity, and user adaptation	Replicable for other flood-prone cities with strong governance support	urbanisten.nl/work/benthemplein
8	Building on the Water in Huai'An (China)	An urban-scale floating theatre typology on the Dongyang River	The design treats water as a stage by placing the building above the river surface	The structure emphasises glass sails rather than explicit bio-based materials	Commissioned by Yiwu's Silk Road New District and Culture Bureau, with public access from all directions	Creates a landmark that engages with the riverfront and offers an immersive urban public space	Focuses on architectural gesture rather than measurable ecological water mechanisms	High technical complexity and cost of floating glass canopy in dense urban context	Conceptually replicable for waterfront cities, but requires strong budget and infrastructure support	archdaily.com/541173/the-building-on-the-water-alvaro-siza-carlos-castanheira
9	The project reinterprets water's ecological and sensory role through a micro-architectural intervention at Işık University's Şile Campus (Turkey)	Micro-architectural modular seating and shading units around an existing water pool	Water is integrated as a tactile and social medium, supported by drinking and ecological access points for humans and animals	Bioluminescent bacteria and mycelium composites are combined to create living, low-energy, biodegradable structures	Developed through Research-through-Design methodology under academic supervision, with iterative prototyping and site observation	Enhances sensory experience, conviviality, and ecological awareness through living materials and adaptive design	Limited durability and maintenance requirements due to the sensitivity of living materials and climatic exposure	High fabrication cost, need for biological expertise, and limited public familiarity with living materials	Adaptable to various climatic and cultural contexts, particularly suitable for Mediterranean environments and small-scale public spaces	

Tab. 1 | Comparative framework of international and experimental practices integrating water and bio-based material strategies (credit: the Authors, 2025).

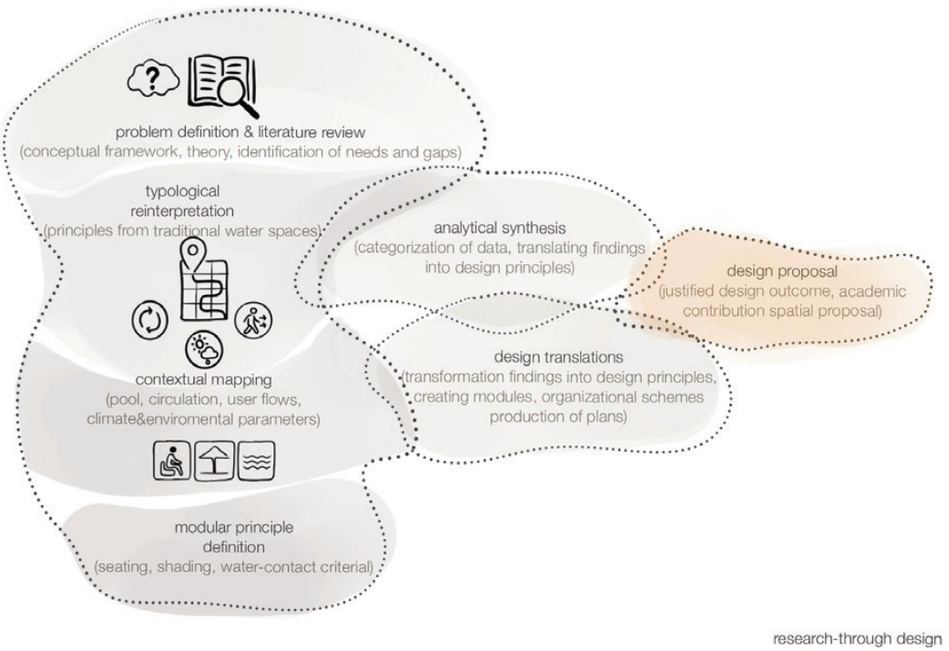


Fig. 1 | Research-through-Design methodology diagram (credit: the Authors, 2025).

tegrazione di quanto sopra in un progetto coerente e sensibile al sito. La Tabella 2 illustra il quadro di riferimento delle prestazioni e dei criteri di valutazione presi in esame nell'ambito del processo di ricerca e sviluppo. I parametri ricavati da recenti ricerche sui materiali a base biologica e sulla progettazione ambientale, forniscono indicatori consolidati in letteratura per valutare le prestazioni ambientali e la qualità sensoriale durante lo sviluppo del progetto; in particolare si segnalano l'intensità luminosa, la resistenza alla compressione, la neutralità del pH, il carbonio incorporato, la conducibilità termica, il ciclo di manutenzione e l'interazione sensoriale. Il framework nell'ambito del processo di 'ricerca attraverso il design' funge da modello metodologico trasferibile a diversi contesti climatici e culturali al di là del sito della presente sperimentazione.

Materiali 'viventi' a base biologica e loro integrazione nel progetto | Il progetto si basa su due materiali a base biologica, e in particolare su micelio e batteri bioluminescenti, in coerenza con la nozione di 'design che abbraccia l'azione biologica' (Moschetti, 2020; Mascitti and Paciotti, 2024) e in linea con gli studi emergenti che impiegano nella progettazione 'organismi viventi' (Chayaamor-Heil et alii, 2024). Questa scelta risponde non solo a questioni estetiche, ma contribuisce alla realizzazione di strategie improntate a materiali innovativi a base biologica che sono sempre più visti come promotori di responsabilità ecologica e qualità esperienziale (Berretta, Desideri and Staltari, 2024; Camere and Karana, 2018): essi infatti rafforzano in chiave olistica il ruolo sensoriale dell'acqua nello spazio pubblico, aprendo al contempo a possibili interventi low-tech e circolari.

I compositi a base di micelio sono ottenuti attraverso la bioproduzione di rifiuti agricoli lignocellulosici con il micelio fungino, un processo che non impiega prodotti sintetici ma elementi completamente biodegradabili, compostabili e a basse emissioni di carbonio (Holt et alii, 2012; Elsacker et alii, 2020), come evidenziato dalla letteratura scientifica che ne sottolinea anche la leggerezza e l'adattabilità a diverse forme (Appels et alii, 2019; Aiduang et alii, 2022; Alaneme, 2023). Le sue proprietà di isolamento termico e di regolazione dell'umidità sono significative per il comfort all'aperto, anche se la resistenza meccanica e l'impermeabilità rimangono variabili a seconda della specie, del substrato e dei metodi di lavorazione. Nel design il micelio è stato sempre più riconosciuto come un 'materiale vivente' che modella tanto la forma dell'oggetto quanto la sua interazione con l'utente (Karana et alii, 2015); se Camere e Karana (2018) ne esaltano il potenziale, descrivendo la crescita biologica come generatrice di qualità spaziali e sensoriali, recenti pratiche sperimentali hanno enfatizzato il micelio come parte di un'economia circolare più ampia, in cui la valorizzazione dei rifiuti si integra con l'estetica speculativa. Tra i vantaggi del suo impiego si segnalano la compostabilità, la bassa energia incorporata e la varietà di texture, mentre i limiti riguardano la durata e l'uniformità della produzione (Sydor et alii, 2022).

Nella proposta progettuale i limiti dei materiali a base biologica sono stati affrontati attraverso rivestimenti protettivi, stampa 3D, modularità e ombreggiatura dei componenti; con questi accorgimenti la texture organica migliora il comfort tattile, mettendo in primo piano l'acqua come agente esperienziale. Per consolidare ulteriormente questa strategia 'materiale' si è esaminato il processo di produzione delle strutture in micelio (Fig. 2), a partire dalle fasi di preparazione dei rifiuti organici e di inoculazione del micelio fino al posizionamento negli stampi, crescita e asciugatura e indurimento finali.

L'altro materiale a base biologica impiegato si caratterizza per la bioluminescenza, una luce visibile (Fig. 3) che non produce calore emessa da particolari specie batteriche durante l'attività metabolica. Coltivabili in bioreattori o terreni nutritivi, questi organismi offrono una potenziale alternativa all'illuminazione convenzionale (Haddock, Moline and Case, 2010). Basandosi su questo principio biologico, sperimentazioni come Living Architecture (Fig. 4a) e Glowee (Fig. 4b) hanno analizzato gli effetti luminosi (Armstrong, 2012; Myers, 2012): il bagliore blu-verde emesso (circa 490 nm) genera un'atmosfera rilassante ed effimera, con intensità e durata della luce che variano a seconda delle condizioni ambientali; tuttavia questa variabilità è stata assunta dal progetto come un punto di forza, in quanto produce effetti temporanei e dinamici.

Il potenziale 'circolare' del materiale è ulteriormente enfatizzato da un ciclo di manutenzione speculativo, che inquadra la riparazione come parte della vita naturale del materiale piuttosto che come un'attività post-produzione. Il diagramma di Figura 5 illustra un processo rigenerativo in sei fasi (osservazione, rilevamento dei danni, preparazione, riparazione, monitoraggio e ricorrenza) attraverso il quale la durata è concepita come un processo continuo di rinnovamento. Questo modello speculativo, che è in linea con l'etica della cura e della riparazione nel design circolare, evidenzia la manutenzione come parte integrante della narrativa del design piuttosto che come fase tecnica separata.

Al di là dei benefici ecologici prodotti, i sistemi bioluminescenti alimentano l'empatia tra gli utenti e il loro ambiente, determinando ciò che Myers (2012) chiama 'intimità biologica'. In risposta alla loro 'fragilità', che richiede un'attenta progettualità, e 'vitalità', che necessita di particolari condizioni ambientali, i batteri bioluminescenti – selezionati e coltivati in condizioni ambientali controllate e poi iniettati in un terreno nutritivo per avviare la produzione di luce – sono incapsulati in moduli di plexiglass posizionati nella parte superiore della struttura, che funge sia da elemento di ombreggiamento durante il giorno sia da fonte di illuminazione tenue durante la notte, aumentando anche la percezione dell'acqua nelle ore notturne (Fig. 6). In linea con gli approcci sperimentali che promuovono il 'design a base biologica', gli effetti effimeri prodotti riposizionano l'acqua come un catalizzatore dinamico e attivo per stimolare convivialità, coinvolgimento sensoriale e riflessione sul tema della sostenibilità ambientale (Armstrong, 2012).

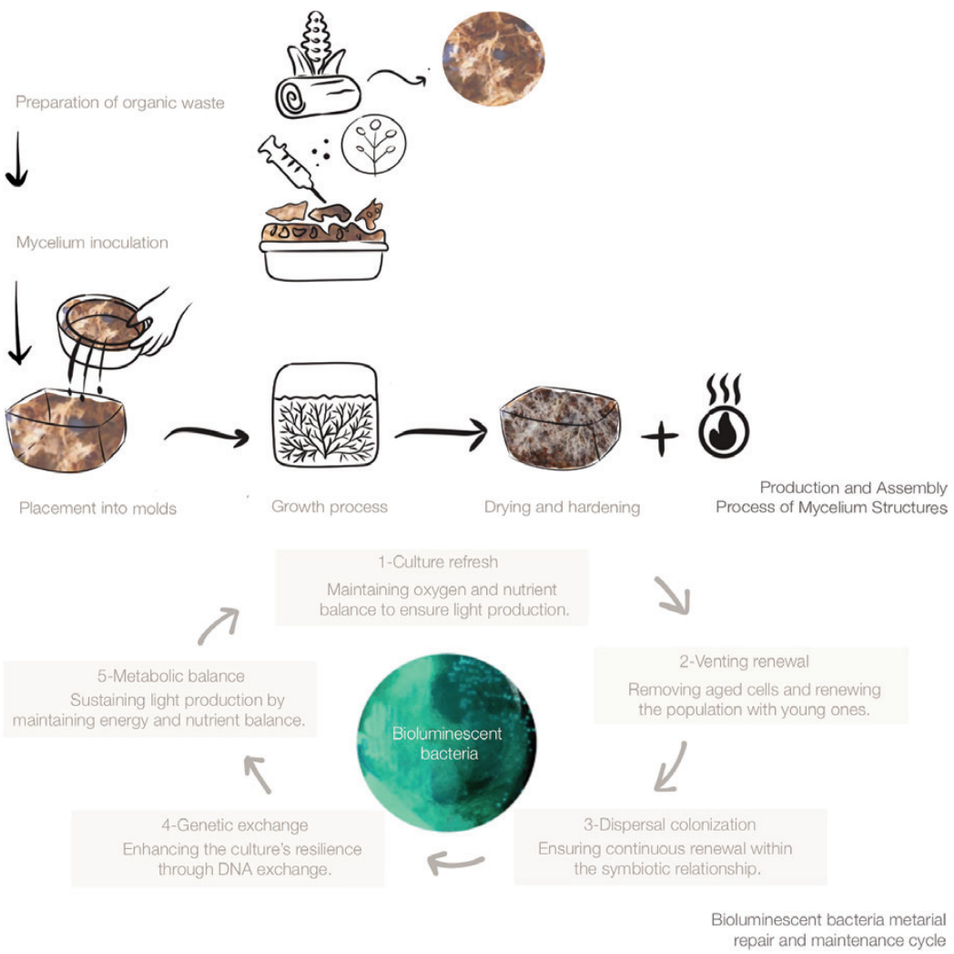
Sito e contesto del progetto | Il sito in cui si colloca la sperimentazione è stato concepito negli anni 2003-2004 come Campus universitario multifunzionale in

Criterion	Indicator / Parameter	Unit / Value	Reference / Source	Notes / Remarks
Component configuration	Surface element for fabrication and assembly	20 × 30 cm (indicative)	Design specification (this study)	Defines the approximate dimensional logic of components produced through mould-based fabrication; adaptable to site-specific geometries
Light intensity	A dim illumination visible from a close view of the water surface (≈0.5–1 m)	Light intensity (control): ~1.0 × 10^6 RLU (Relative Light Units)	Kaku et alii (2021)	A faint glow may appear close to the water surface, creating an artistic and atmospheric illumination
Mycelium compressive strength	high-density fungal species, cold pressing, and sawdust substrate	An average range of 198.84–340.31 kg/m³	Aiduang et alii (2022)	Adequate for non-structural elements such as seating and cladding surfaces
Surface neutrality	pH of the mycelium substrate after growth	≈ 5-8 pH	Aiduang et alii (2024)	Ensures compatibility with bioluminescent organisms and avoids microbial imbalance
Environmental impact	Embodied carbon emission factor	0.3668 kg CO_{2eq} / kg MBC (EN 15804 + A2)	Wattanavichean et alii (2025)	Derived from LCA data for bio-based composites; indicates low embodied carbon compared to conventional materials
Thermal conductivity	Material insulation capacity	0.04–0.06 W/m·K	Gezer and Kuştaş (2024)	Contributes to passive microclimatic comfort in outdoor settings
Maintenance interval	Renewal cycle of bioluminescent medium	2 days	Williams et alii (2019)	Corresponds to bacterial viability and sustained light emission; replacement interval is dependent on humidity and nutrient conditions
User interaction	Sensory engagement (light, texture, sound of water)	Qualitative	Scenario simulation within Research-through-Design	Evaluated through reflective, comparative, and observational methods within the research-through-design process

Tab. 2 | Performance framework and evaluation criteria for bio-based and water-integrated components (credit: the Authors, 2025).

Fig. 2 | Production and Assembly Process of Mycelium Structures (credit: the Authors, 2025).

Fig. 3 | Bioluminescent Bacteria repair and maintenance (credit: the Authors, 2025).



un contesto naturale nella parte asiatica di Istanbul. Con una superficie di 490 mila metri quadri, di cui 74 mila di spazio edificato e 65 mila di aree verdi paesaggistiche, il Campus integra funzioni educative, residenziali, ricreative e sociali che si sviluppano su una topografia con pendenze tra l'11 e il 15%, in cui edifici e cortili terrazzati, che si adagiano parallelamente alle curve di livello, sono collegati da un sistema di rampe e scale: l'impianto planimetrico riflette così sia le potenzialità che i limiti del sito, bilanciando le esigenze di integrazione con il contesto e quelle di accessibilità (Fig. 7).

Anche l'esposizione ha giocato un ruolo decisivo nell'articolazione dell'impianto planimetrico del Campus: i cortili orientati a sud migliorano l'illuminazione solare e le relazioni sociali all'aperto, l'attenta distribuzione dei volumi mitiga i venti freddi prevalenti da nord-est, mentre la presenza del bosco limitrofo, preservato nella sua consistenza originaria, rafforza la resilienza ecologica dell'insediamento. Le aree esterne fungono contemporaneamente da zone cuscinetto e spazi di aggregazione, inquadrando il Campus come una rappresentazione in scala della complessità urbana.

L'acqua è presente in sei vasche ornamentali di diverse dimensioni e configurazioni, ma mentre la maggior parte è collocata lungo i percorsi, una vasca è isolata in una piazza, sottoutilizzata e con limitate opportunità di interazione sociale e sensoriale; quest'ultima è stata scelta come caso studio per rigenerare l'area e promuovere una maggiore interazione sociale attraverso l'acqua (Fig. 8). Se da una prospettiva più ampia il Campus incarna le sfide che gli spazi pubblici contemporanei devono affrontare nel conciliare la sostenibilità ambientale con l'uso quotidiano, attraverso questa sperimentazio-

ne progettuale il Campus Sile si configura come un laboratorio vivente in cui integrare le dimensioni sensoriali ed ecologiche del design in linea con gli SDG 6, 11 e 13.

Proposta progettuale | La proposta progettuale risponde alle criticità di fruizione dello spazio e cerca di valorizzare le potenzialità individuate nell'analisi del sito; in particolare mira a trasformare la vasca isolata da elemento puramente estetico a punto focale sensoriale, ecologico e sociale. L'intervento consiste in una seduta organica che segue il profilo della vasca e che è sostenuta da una struttura leggera (Fig. 9) concepita con un sistema a telaio in acciaio o legno, materiali scelti per la loro durabilità e facilità di realizzazione. I piani della seduta variano in altezza, consentendo agli utenti di interagire con l'acqua sia da vicino che da posizioni più distanti; la configurazione modulare garantisce flessibilità, adattabilità e trasferibilità in contesti diversi (Fig. 10).

I compositi biodegradabili a base di micelio sono impiegati per arricchire l'esperienza spaziale grazie alla loro texture organica e per ridurre l'impatto ambientale del manufatto; le capsule bioluminescenti integrate forniscono un'illuminazione a consumo energetico nullo, valorizzando la presenza dell'acqua, in particolare durante le ore notturne (Fig. 11). Ogni componente della struttura modulare presenta miceli colati in stampi con la fabbricazione digitale; dopo essere stati essiccati a temperature controllate, i moduli vengono assemblati tramite inserti in legno; per la parte superiore del manufatto, che ha la funzione di una tettoia bioluminescente, si prevede un assemblaggio con tubi in plexiglass (Fig. 12).

Una delle innovazioni chiave del progetto è la valorizzazione dell'acqua non come elemento estetico, ma come risorsa, pertanto un piccolo erogatore, incorporato nel bordo della vasca, consente agli utenti di bere, richiamando così il ruolo di elemento vitale ed essenziale nello spazio pubblico: questa strategia reinserisce la dimensione funzionale dell'acqua nella vita collettiva contemporanea. Inoltre il progetto, che riconosce anche la presenza di altri abitanti del Campus, in particolare gatti e uccelli, prevede alcune vaschette adiacenti alle sedute che rafforzano il ruolo dell'acqua come mezzo per la 'coesistenza dell'ecosistema'; con questi accorgimenti l'intervento connota lo spazio pubblico come ambiente condiviso di interazione non solo tra studenti, docenti, personale amministrativo e visitatori, ma anche tra specie diverse.

La proposta nel suo insieme è quindi guidata da tre principi fondamentali: 1) integrazione con la topografia (trasformare le differenze di livello intorno alla piscina in un'esperienza spaziale); 2) adattamento climatico (migliorare il comfort attraverso strutture ombreggianti); 3) esperienza multiutente (consentire l'interazione con l'acqua sia per gli esseri umani che per le specie non umane). Questi principi sono stati sviluppati concettualmente nell'ambito del quadro di 'ricerca attraverso il design', garantendo la coerenza tra comfort ambientale, esperienza dell'utente e intento sensoriale. Il rinnovo periodico della materia bioluminescente (circa ogni 7-10 giorni) è previsto come parte della strategia di manutenzione del progetto, rafforzando l'idea di cura continua come atto di progettazione.

Seguendo questi principi l'intervento ridefinisce la vasca d'acqua come uno spazio pubblico attivo che favorisce il coinvolgimento sensoriale, la condivisione di un bene vitale tra tutti gli esseri viventi del Campus e l'aggregazione sociale, piuttosto che rimanere un elemento paesaggistico passivo. Concepito come un sistema modulare e leggero, dal carattere inclusivo e low-tech e in linea con gli obiettivi più ampi di un design sostenibile e sensibile al clima (SDG 6, 11 e 13), il progetto è adattabile a condizioni climatiche e tessuti urbani differenti dove sono richiesti interventi ecologici su piccola scala.

La Figura 13 è una rappresentazione concettuale del progetto in ambiente sia diurno che notturno: gli elementi bioluminescenti integrati di notte si trasformano in una luce guida, fornendo orientamento e migliorando l'individuazione dei percorsi e dopo il tramonto incoraggiano l'uso della vasca d'acqua da parte di esseri umani e animali, estendendo la presenza ecologica e sociale del manufatto fino all'alba.

Conclusioni | Il presente studio contribuisce al dibattito sul valore dell'acqua come catalizzatore culturale, sensoriale ed ecologico negli spazi pubblici contemporanei: attraverso la proposta di una micro-architettura, si dimostra come la convivialità, il coinvolgimento multisensoriale e la consapevolezza ecologica possano essere promossi attraverso strategie che utilizzano 'materiali viventi'. In questo modo l'intervento ridefinisce l'acqua non solo come elemento decorativo o infrastrutturale, ma come mezzo attivo di reciprocità ecologica e di aggregazione sociale, stimolando il dibattito su come il design possa fungere da mediatore di resilienza nella condizione urbana.

L'integrazione di compositi di micelio e batteri bioluminescenti riflette un approccio speculativo e allo stesso tempo di stimolo all'innovazione dei materiali. Il micelio si caratterizza per biodegradabilità, regolazione termica ed esperienza tattile, ma solleva questioni di durabilità e standardizzazione, mentre i sistemi bioluminescenti forniscono un'illuminazione a consumo energetico nullo e atmosfere sensoriali effimere, ma rimangono fragili e richiedono una manutenzione continua. Nonostante i limiti questi materiali sono esplorati come agenti sperimentali che attivano riflessione e aprono nuovi dialoghi tra biologia, design e architettura, confortati da ricerche recenti che mostrano come i compositi a base biologica e l'estetica effimera possano fungere da ponte tra responsabilità ecologica e sperimentazione progettuale (Berretta, Desideri and Staltari, 2024). Oltre ad allinearsi con gli SDG 6, 11, 12 e 13, il progetto determina sinergie con l'SDG 3 (benessere) attraverso esperienze sensoriali rigeneranti e con l'SDG 15 (ecosistemi terrestri) attraverso l'accesso all'acqua per più specie. Tuttavia l'impiego di sistemi bioluminescenti oltre a mettere in luce il potenziale innovativo del progetto evidenzia alcuni compromessi con l'SDG 9 (industria, innovazione e infrastrutture) perché pur garantendo un'emissione luminosa priva di consumo elettrico diretto, i batteri necessitano di un ambiente termico stabile, di un pH controllato e di periodici apporti 'nutritivi': tali fattori, se non gestiti con rigore, riducono l'affidabilità dell'installazione e ne limitano la scalabilità industriale.

Rispetto ai requisiti di resilienza dell'SDG 9, la proposta funge dunque da dimostratore di filiere biodigitali ancora in via di definizione e richiede l'adozione di protocolli di manutenzione automatizzati, nonché l'integrazione di fonti LED di cortesia a basso consumo che garantiscano un livello minimo di sicurezza illuminotecnica in caso di spegnimento batterico. Sul piano della governance l'introduzione di 'materiali viventi' apre un confronto con l'SDG 16, che richiama la necessità di norme univoche in materia di biosicurezza e gestione di microrganismi non patogeni in spazi pubblici che specifichino ruoli, azioni di monitoraggio, procedure di smaltimento e percorsi partecipativi per informare in modo trasparente utenti e comunità, riducendo paure o resistenze culturali. Rendere espliciti questi aspetti dimostra che l'innovazione biomateriale non è soltanto un vantaggio ambientale immediato, ma anche un banco di prova per nuove infrastrutture resilienti e per l'evoluzione di standard normativi condivisi.

L'approccio proposto invita quindi a considerare il progetto non solo come un'esperienza sensoriale, ma anche come piattaforma sperimentale capace di stimolare la redazione di protocolli tecnici, gestionali e istituzionali replicabili in altri contesti urbani, valutando al contempo le prestazioni ecologiche a lungo termine, la fattibilità tecnica e l'accettazione sociale dei materiali viventi in diversi contesti climatici, sperimentando anche linguaggi innovativi come il Verbal Design Modelling (Mascitti and Paciotti, 2024) per interfacce multispecie.

Historically, the multisensory qualities of water – visual, acoustic, and thermal – have shaped collective life and strengthened social cohesion beyond its infrastructural role. In contemporary urban contexts, however, this relationship has weakened, as water often becomes decorative or hidden, reflecting a growing distance from the natural ecosystem. This

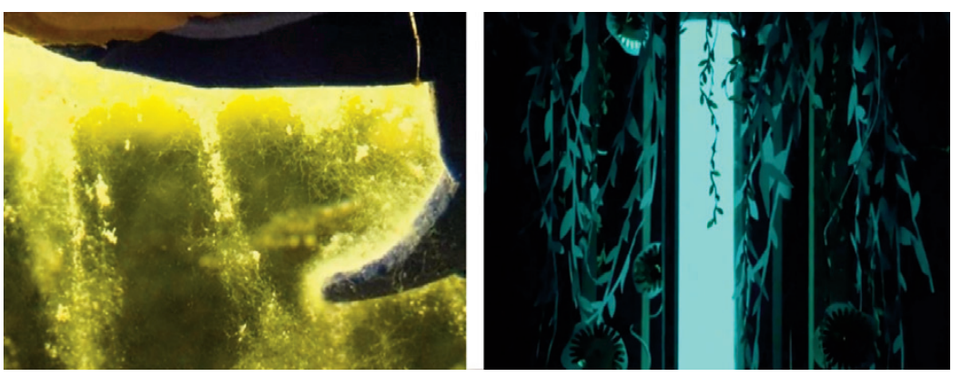


Fig. 4 | Examples of bioluminescent design prototypes: a) Living Architecture bio-reactor brick; b) Glowee façade lighting experiment (sources: glowee.com; ncl.ac.uk).



Fig. 5 | Mycelium-based material repair and maintenance cycle (credit: the Authors, 2025).

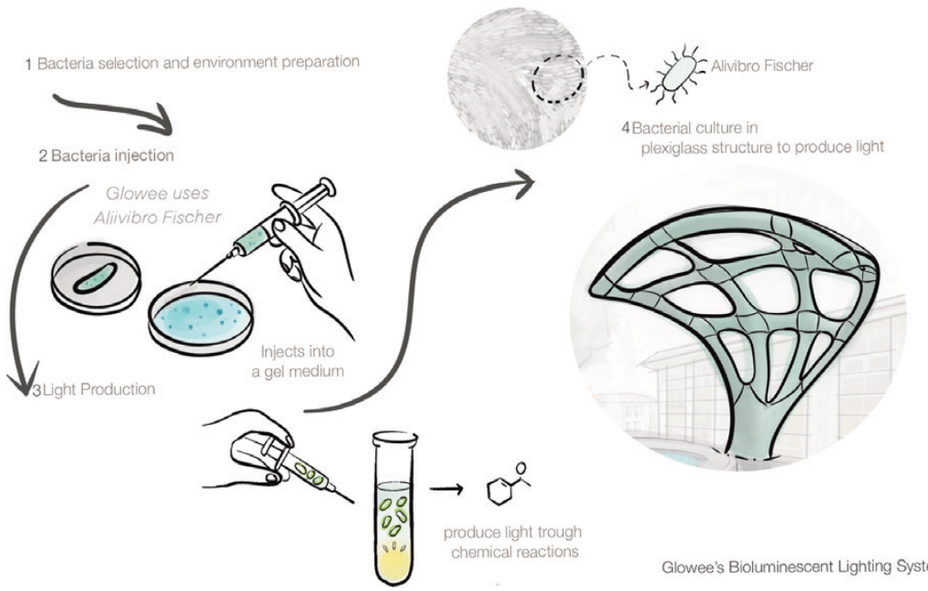


Fig. 6 | Production and Application Process of Bioluminescent Bacteria (credit: the Authors, 2025).

condition requires design approaches that redefine water as an active means of perception and ecological awareness.

International literature also emphasizes the role of water in defining public space: Norberg-Schulz (1980) frames elemental forces, including water, as anchors of collective identity, placing them within the phenomenology of place-making as central agents of spatial identity; contributions in the field of urban planning highlight the importance of multisensory experiences related to water for urban resilience (Pallasmaa, 2005; Bille and Sorensen, 2016; Gruosso et alii, 2025); studies on the urban landscape show that water contributes to the creation of regenerative environments, promoting both ecological systems and human well-being (Önge, 1997; White et alii, 2013; Selman, 2012; Lu et alii, 2025).

The role of water in public spaces develops across several conceptual levels: 1) Life and Nature, as a source of life that connects settlements to ecological systems and symbolizes vitality; 2) Purification and Tranquillity, which embody physical and metaphysical purification by creating places of physical and mental refreshment; 3) Social Ritual and Aggregation, serving as infrastructure in which water sources become theatres of social interaction, fostering collective encounters and rituals (Manni and Valzano, 2023). Despite the growing emphasis on blue-green infrastructure (Fletcher et alii, 2015; Newman, 2020; Corradi et alii, 2024), water in cities often remains hidden or ornamental, lacking sensory and social resonance (Kaika, 2005). In line with the findings of Cesare Sposito (2017), water has long served as both a material and a symbolic component of architecture and as a mediator between the environmental and perceptual domains, which is the central perspective of this study's conceptual framework.

Within this context, characterized by the loss of multiple values and meanings of water, the contribution illustrates a micro-architecture project that aims to restore water's role as a catalyst for well-being and social aggregation. By conceptualizing and reformulating spatial and social principles of antiquity, the project aligns itself with broader global challenges and the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs; UN, 2015): in particular, it contributes to SDG 6 (Clean Water and Sanitation), highlighting the accessibility of water and its role in sustaining life, SDG 11 (Sustainable cities and communities) by improving the inclusiveness and quality of public spaces, SDG 12 (Responsible consumption and production) through the use of bio-based materials, and SDG 13 (Climate action) by framing water as a microclimate regulator in the context of ecological resilience.

The study reinterprets the ecological role of water through a research-project perspective that links environmental performance and spatial perception, proposing a conceptual framework for micro-architectural interventions that use bio-based materials, particularly mycelium composites and bioluminescent systems, as mediators of multisensory engagement. Based on performance parameters derived from recent studies, the research outlines a methodological model for climate-sensitive design, repositioning water as an active perceptual medium that broadens the debate on multispecies design and sensory urbanism. From a structural point of view, the article develops by situating water in a historical context, outlining the methodology of 'research-through-design', presenting the case study and materials strategy, and concluding with reflections on the limitations and replicability of climate-sensitive design.

Similar approaches in recent scientific literature have explored innovation in the use of water and materials in urban settings at different scales: Solarek (2021) investigates water space management at the urban level, emphasizing planning strategies rather than specific site design, Cortesão and Lenzholzer (2022) outline the broader potential of 'research-through-design' in urban and landscape practice, while Langie, Rybak-Niedziółka and Hubacíková (2022) have studied the typologies and cultural values of public fountains, providing a valuable basis for understanding their social and ecological role. The present study implements these insights by developing a micro-architecture that incorporates water and 'bio-based materials', reformulating their typological reading into an adaptable, design-oriented proposal for contemporary public space.

Case studies | International practices integrating water and biological materials were analyzed, compared and organized according to scale, water strategy, biomaterial integration and transferability, outlining the evaluation criteria for the different experimental and applied approaches (Tab. 1). The comparative review reveals two main trends: experimental projects (such as Fungal Sensing Skin and Bioluminescent Wood) mainly promote the sensory and ecological potential of living materials, but face limitations in terms of durability, maintenance and cost, while urban-scale interventions (e.g., Watersquare and Building on the Water) effectively translate water into a collective experience, but lack material innovation and long-term ecological feedback. Intermediate-scale projects such as Aguahoja and 3D WASP Living Bio-based Materials, on the other hand, demonstrate a promising capacity for syn-

thesis that combines environmental sensitivity and design experimentation.

In this landscape, the proposed study positions itself as micro-architecture on an intermediate scale, combining the performative and sensory qualities of bio-based materials with the inclusiveness of public space. The findings from this comparative analysis informed the methodological framework and performance criteria (component configuration, light intensity, material resistance, and pH neutrality), intending to establish a replicable model for climate-sensitive design in public spaces.

Methodology and phases of the research | This study is based on the 'research-through-design' methodology, which considers the design process not only as a path to a result, but also as a primary mode of investigation and knowledge production. The approach is based on exploratory practices guided by the principles outlined by scholars such as Gaver (2012), Cortesão and Lenzholzer (2022), and Uzunkaya and Kahvecioglu (2022), and in particular on comparable experiments in the field of environmental and water design, such as that of Valente et alii (2022) on green infrastructure and rainwater, which highlight the relevance of water for the integration of ecological systems in design-led investigation. In this context, the central question of the research on 'how to reintegrate water as a cultural, ecological and sensory catalyst in contemporary public spaces' is explored through an integrated sequence of analytical and generative phases of 'research-through-design', from contextual analysis and typological reinterpretation to modular principles and spatial synthesis (Fig. 1).

The Sile Campus of FMV Işık University (Turkey) was chosen as the location for this experiment because it represents a multifunctional micro-city surrounded by nature. The Campus hosts a wide range of users, including students, academic and administrative staff, and visitors, while integrating various functions such as education, sports, catering, and recreation. This plurality of users and functions shapes the simultaneous presence of diverse socio-spatial needs and provides valuable stimuli for the design of public spaces. The analysis, which mapped the water features (active and passive), paths, connection systems (ramps, stairs, terraces), and user flows on the Campus, revealed that almost all the water basins are located along paths, ramps, and stairs, except for one, which is in the main square and isolated. The analysis of the sites, therefore, reveals fragmented and weak relationships between water, space, and social life, which formed the central theme of the project.

The design criteria were modelled on the interactions between water and humans that existed in ancient times, transferring the fundamental principles of conviviality, sociability and multisensory experience to a contemporary context, through a reinterpretation of the three leading roles of water in public life: social (bringing people together and promoting shared experiences), sensory (enriching the spatial experience through sound, matter and light) and ecological (regulating microclimates and giving visibility to the cyclical presence of water).

The production process uses moulds and digital manufacturing for the mycelium components, ensuring precision and scalability while generating organic geometries that adapt to the site's topography. Living materials – mycelium composites and bioluminescent systems – are fundamental elements of the project due to their ecological and sensory performance, which can be measured using specific indicators.

The project development is structured in five phases: 1) Mapping of the context, through the identification of water basins, paths, user flows and microclimatic data; 2) Reinterpretation of the 'water places' of the past and their adaptation to the context of the Campus; 3) Definition of the performance framework to establish measurable criteria linking ecological, material and sensory dimensions; 4) Restitution of

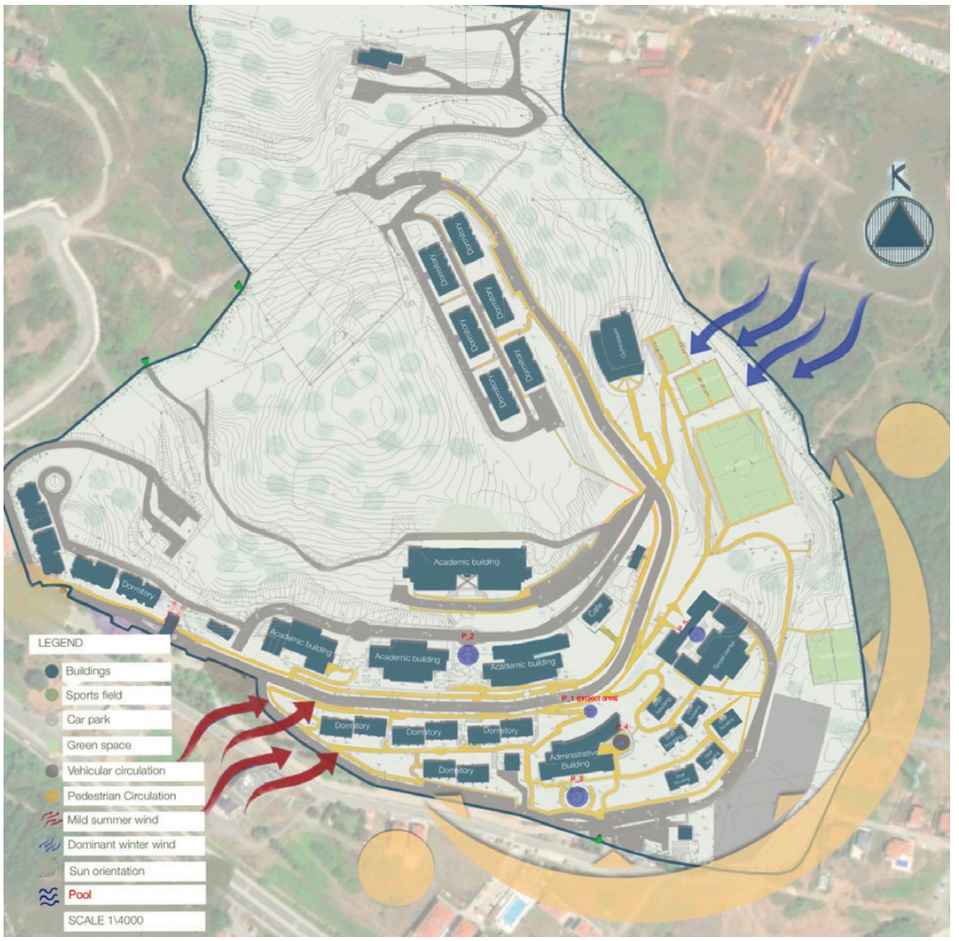




Fig. 7 | Campus Site Plan (credit: S. Sevinç, 2022).

Fig. 8 | The pools and Main Pedestrian Axes (credit: the Authors, 2025).

design concepts through diagrams, perspectives, sections and 3D models as methodological tools for evaluation; 5) Synthesis, for the integration of the above into a coherent and site-sensitive design.

Table 2 illustrates the performance framework and evaluation criteria considered in the research and development process. The parameters, derived from recent research on bio-based materials and environmental design, provide established indicators in the literature for evaluating ecological performance and sensory quality during project development; in particular, light intensity, compressive strength, pH neutrality, embodied carbon, thermal conductivity, maintenance cycle, and sensory interaction are noteworthy. The framework within the 'research-through-design' process serves as a methodological model that can be transferred to different climatic and cultural contexts beyond the site of the present experiment.

Bio-based 'living' materials and their integration into the design | The project is based on two biologically-based materials, namely mycelium and bioluminescent bacteria, in line with the notion of 'design that embraces biological action' (Moschetti, 2020; Mascitti and Paciotti, 2024) and in line with emerging studies that use 'living organisms' in design (Chayaamor-Heil et alii, 2024). This choice not only responds to aesthetic considerations, but also contributes to the implementation of strategies based on innovative bio-based materials that are increasingly seen as promoters of ecological responsibility and experiential quality (Berretta, Desideri and Staltari, 2024; Camere and Karana, 2018): in fact, they holistically reinforce the sensory role of water in public spaces, while opening up possibilities for low-tech and circular interventions.

Mycelium-based composites are obtained through the bioproduction of lignocellulosic agricultural waste with fungal mycelium, a process that does not use synthetic products but completely biodegradable, compostable and low-carbon elements (Holt et alii, 2012; Elsacker et alii, 2020), as highlighted in scientific literature, which also emphasizes its lightness and adaptability to different shapes (Appels et alii, 2019; Aiduang et alii, 2022; Alaneme, 2023). Its thermal insulation and moisture regulation properties are significant for outdoor comfort, although mechanical strength and impermeability vary depending on the species, substrate, and processing methods.

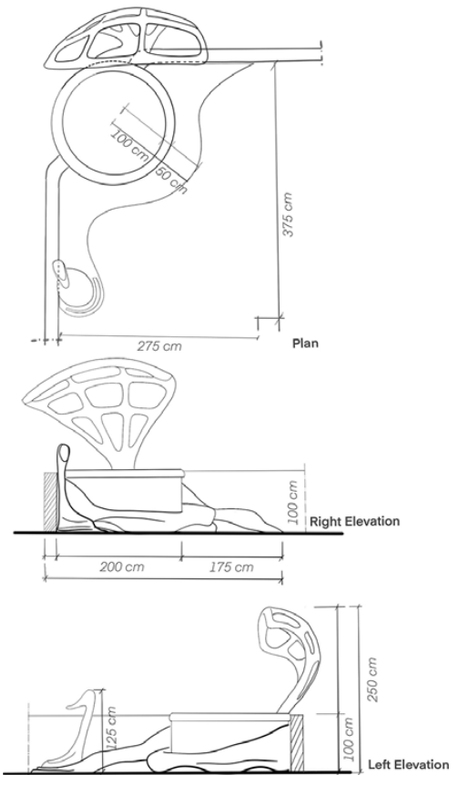
In design, mycelium has increasingly been recognized as a 'living material' that shapes both the form of the object and its interaction with the user (Karana et alii, 2015). While Camere and Karana (2018) highlight its potential, describing biological growth as a generator of spatial and sensory qualities, recent experimental practices have emphasised mycelium as part of a broader circular economy, in which waste recovery is integrated with speculative aesthetics. Among the advantages of its use are compostability, low embodied energy, and variety of textures, while the limitations concern durability and the uniformity of production (Sydor et alii, 2022).

In the project proposal, the limitations of bio-based materials were addressed through protective coatings, 3D printing, modularity, and component shading; with these measures, the organic texture improves tactile comfort, foregrounding water as an experiential agent. To further consolidate this 'material' strategy, the production process of mycelium structures was examined (Fig. 2), from the preparation of organic waste and mycelium inoculation to placement in moulds, growth, drying, and final hardening.

The other bio-based material used is characterized by bioluminescence, a visible light (Fig. 3) that does not produce heat, emitted by particular bacterial species during metabolic activity. Cultivable in bioreactors or nutrient media, these organisms offer a potential alternative to conventional lighting (Haddock, Moline and Case, 2010). Based on this biological principle, experiments such as Living Architecture (Fig. 4a) and Glowee (Fig. 4b) have analysed the lighting effects (Armstrong, 2012; Myers, 2012): the blue-green glow emitted (approximately 490 nm) creates a relaxing and ephemeral atmosphere, with the intensity and duration of the light varying according to environmental conditions; however, this variability has been taken up by the project as a strength, as it produces temporary and dynamic effects.

The 'circular' potential of the material is further emphasised by a speculative maintenance cycle that frames repair as part of the material's natural life rather than a post-production activity. The diagram in Figure 5 illustrates a six-stage regenerative process (observation, damage detection, preparation, repair, monitoring, and recurrence) through which durability is conceived as a continuous process of renewal. This speculative model, aligned with the ethics of care and repair in circular design, highlights maintenance as an integral part of the design narrative rather than as a separate technical stage.

Beyond the ecological benefits they produce, bioluminescent systems foster empathy between users and their environment, creating what Myers (2012) calls 'biological intimacy'. In response to their 'fragility', which requires careful design, and 'vitality', which necessitates specific environmental conditions, bioluminescent bacteria – selected and cultivated in controlled environmental conditions and then injected into a nutrient medium to initiate light production – are encapsulated in plexiglass modules positioned at the top of the structure, which acts both as a shading element during the day and a source of soft lighting at night, also enhancing the perception of water at night (Fig. 6). In line with experimental approaches that promote 'biologically based design', the ephemeral effects produced re-



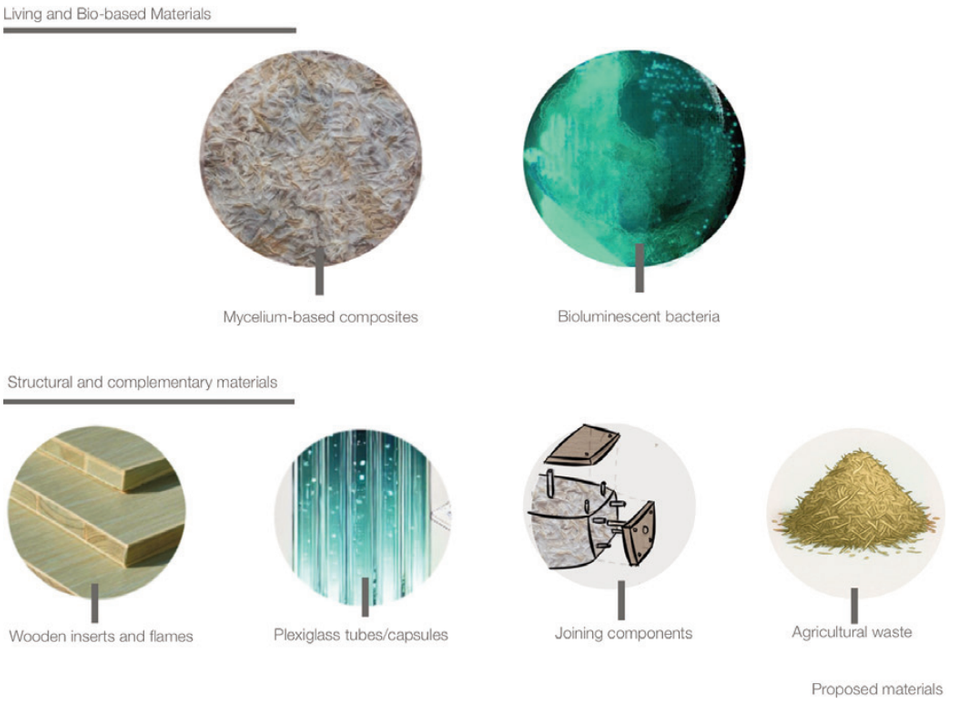


Fig. 9 | Technical Drawings of the design proposal (credit: the Authors, 2025).

Fig. 10 | Proposed Materials (credit: the Authors, 2025).

Fig. 11 | Assembly Processes of Proposed Design (credit: the Authors, 2025).

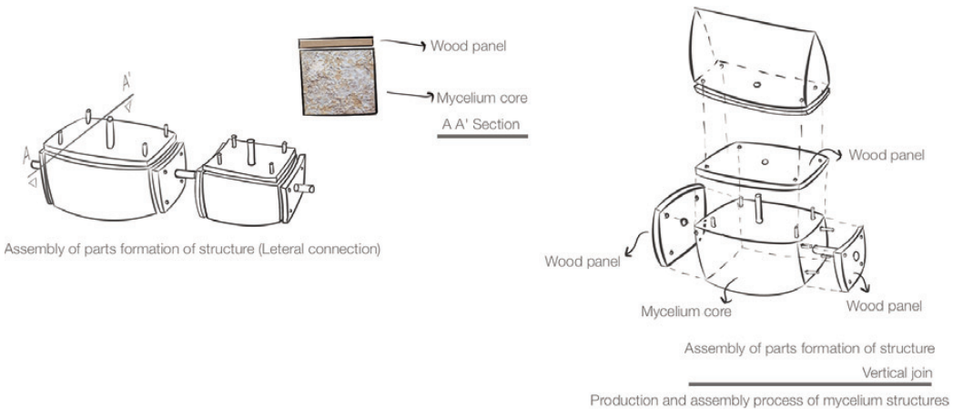


Fig. 12 | Structural Assembly of Modular Mycelium Seating and Bioluminescent Canopy (credit: the Authors, 2025).

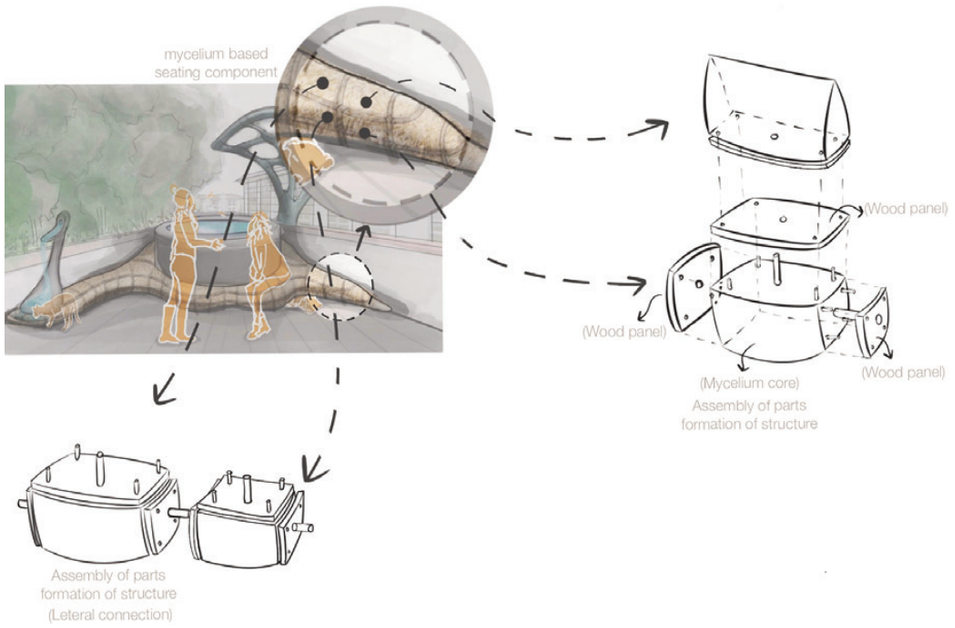
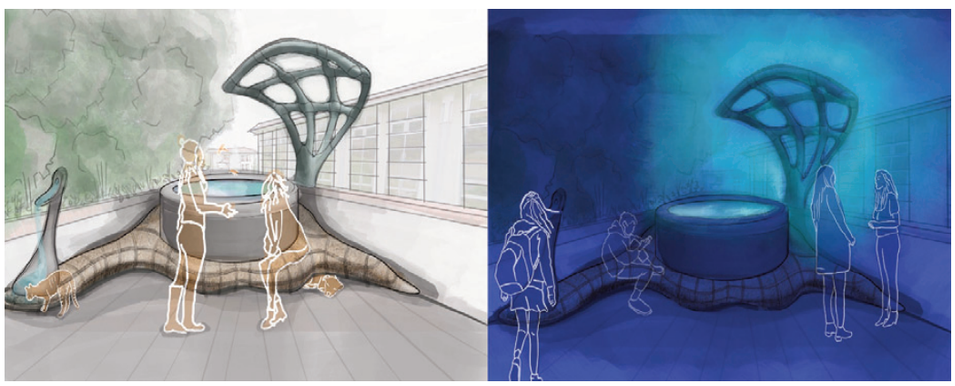


Fig. 13 | Conceptual Visualisation of the proposal day and night (credit: the Authors, 2025).



position water as a dynamic and active catalyst for stimulating conviviality, sensory engagement and reflection on the theme of environmental sustainability (Armstrong, 2012).

Site and design context | The site where the experiment is taking place was designed in 2003-2004 as a multifunctional university campus in a natural setting on the Asian side of Istanbul. Covering an area of 490,000 square metres, of which 74,000 are built-up space and 65,000 are landscaped green areas, the campus integrates educational, residential, recreational and social functions on a topography with slopes between 11 and 15%, where buildings and terraced courtyards, which lie parallel to the contour lines, are connected by a system of ramps and stairs: the layout thus reflects both the potential and the limitations of the site, balancing the need for integration with the context and accessibility (Fig. 7). Exposure also played a decisive role in the layout of the Campus: south-facing courtyards improve sunlight and outdoor social relations, the careful distribution of volumes mitigates the prevailing cold northeasterly winds, while the presence of the neighbouring forest, preserved in its original form, reinforces the ecological resilience of the settlement. The outdoor areas serve as both buffer zones and gathering spaces, framing the Campus as a scale representation of urban complexity.

Water is present in six ornamental pools of different sizes and configurations, but while most are located along the paths, one pool is isolated in a square, underused and with limited opportunities for social and sensory interaction; the latter was chosen as a case study to regenerate the area and promote greater social interaction through water (Fig. 8). From a broader perspective, the Campus embodies the challenges that contemporary public spaces face in reconciling environmental sustainability with

everyday use. Through this design experiment, the Sile Campus is configured as a living laboratory to integrate the sensory and ecological dimensions of design in line with the SDGs 6, 11, and 13.

Design Proposal | The project proposal addresses the critical issues of space utilization and seeks to enhance the potential identified in the site analysis. In particular, it aims to transform the isolated pool from a purely aesthetic element into a sensory, ecological, and social focal point. The intervention consists of an organic seat that follows the pool's profile and is supported by a lightweight structure (Fig. 9) with a steel or wooden frame, using materials chosen for their durability and ease of construction. The seat surfaces vary in height, allowing users to interact with the water both up close and from more distant positions; the modular configuration ensures flexibility, adaptability, and transferability to different contexts (Fig. 10).

Biodegradable mycelium-based composites are used to enrich the spatial experience thanks to their organic texture and to reduce the environmental impact of the structure; integrated bioluminescent capsules provide zero-energy lighting, enhancing the presence of water, particularly at night (Fig. 11). Each component of the modular structure features mycelium cast in moulds using digital manufacturing; after being dried at controlled temperatures, the modules are assembled using wooden inserts; for the upper part of the structure, which functions as a bioluminescent canopy, assembly with Plexiglas tubes is planned (Fig. 12).

One of the key innovations of the project is the enhancement of water not as an aesthetic element but as a resource. A small dispenser, incorporated into the edge of the tank, allows users to drink, thus recalling the role of water as an essential element in public spaces. This strategy reintroduces the functional dimension of water into contemporary collective life. Furthermore, the project, which also recognizes the presence of other inhabitants of the Campus, in particular cats and birds, includes many basins adjacent to the seats that reinforce the role of water as a means of 'ecosystem coexistence'; with these measures, the intervention characterizes the public space as a shared environment for interaction not only between students, teachers, administrative staff and visitors, but also between different species.

Three fundamental principles, therefore, guide the proposal as a whole: 1) integration with the topography (transforming the differences in level around the pool into a spatial experience); 2) climate adaptation (improving comfort through shading structures); 3) multi-user experience (enabling interaction with water for both humans and non-human species). These principles were developed conceptually within the framework of 'research-through-design', ensuring consistency between environmental comfort, user experience, and sensory intent. The periodic renewal of the bioluminescent material (approximately every 7-10 days) is planned as part of the project's maintenance strategy, reinforcing the idea of continuous care as a design act.

Following these principles, the intervention redefines the water basin as an active public space that encourages sensory engagement, the sharing of a vital resource among all living beings on the Campus, and social aggregation, rather than remaining a passive landscape element. Conceived as a modular, lightweight system with an inclusive, low-tech character and aligned with the broader objectives of sustainable, climate-sensitive design (SDGs 6, 11, and 13), the project is adaptable to diverse climatic conditions and urban fabrics that require small-scale ecological interventions.

Figure 13 is a conceptual representation of the project in both daytime and nighttime environments: at night, the integrated bioluminescent elements transform into a guiding light, providing orientation and improving the identification of paths, and after sunset, they encourage the use of the water basin by humans and animals, extending the ecological and social presence of the structure until dawn.

Conclusion | This study contributes to the debate on the value of water as a cultural, sensory, and ecological catalyst in contemporary public spaces. The proposal of a micro-architecture demonstrates how conviviality, multisensory involvement, and ecological awareness can be promoted through strategies that use 'living materials'. In this way, the intervention redefines water not only as a decorative or infrastructural element but also as an active means of ecological reciprocity and social aggregation, stimulating debate on how design can act as a mediator of resilience in the urban environment.

The integration of mycelium composites and bioluminescent bacteria reflects a speculative approach that also stimulates innovation in materials. Mycelium is characterized by biodegradability, thermal regulation, and tactile experience. However, it raises questions of durability and standardization, while bioluminescent systems provide zero-energy lighting and ephemeral sensory atmospheres, but remain fragile and require continuous maintenance. Despite their limitations, these materials are being explored as experimental agents that stimulate reflection and open new dialogues between biology, design, and architecture, supported by recent research showing how bio-based composites and ephemeral aesthetics can bridge the gap between ecological responsibility and design experimentation (Berretta, Desideri and Staltari, 2024).

In addition to aligning with SDGs 6, 11, 12, and 13, the project creates synergies with SDG 3 (good health and well-being) through regenerative sensory experiences and with SDG 15 (life on land) through access to water for multiple species. However, the use of bioluminescent systems, in addition to highlighting the innovative potential of the project, also highlights some compromises with SDG 9 (industry, innovation and infrastructure) because, although they guarantee light emission without direct electricity consumption, the bacteria require a stable thermal environment, controlled pH, and periodic 'nutritional' inputs. If these factors are not rigorously managed, they reduce the installation's reliability and limit its industrial scalability.

Concerning the resilience requirements of SDG 9, the proposal therefore serves as a demonstrator of bio-digital supply chains that are still being defined and requires the adoption of automated maintenance protocols, as well as the integration of low-consumption LED courtesy sources that guarantee a minimum level of lighting safety in the event of bacterial shutdown.

In terms of governance, the introduction of 'living materials' opens up a comparison with SDG 16, which calls for clear rules on biosafety and the management of non-pathogenic microorganisms in public spaces, specifying roles, monitoring actions, disposal procedures, and participatory processes to inform users and communities transparently, reducing fears or cultural resistance. Making these aspects explicit demonstrates that biomaterial innovation is not only an immediate environmental benefit but also a testing ground for new resilient infrastructures and the evolution of shared regulatory standards.

The proposed approach therefore invites us to consider the project not only as a sensory experience, but also as an experimental platform capable of stimulating the drafting of technical, managerial and institutional protocols that can be replicated in other urban contexts, while evaluating long-term ecological performance, the technical feasibility and social acceptance of living materials in different climatic contexts, while also experimenting with innovative languages such as Verbal Design Modelling (Mascitti and Paciotti, 2024) for multispecies interfaces.

Acknowledgements

This contribution is the result of joint reflection by the Authors. This study was initiated in 2022 as part of a graduate-level course at FMV Işık University (Turkey) and subsequently developed independently through observations and user feedback. No external funding was used.

References

Adamatzky, A., Gandia, A. and Chiolerio, A. (2021), "Towards fungal sensing skin", in *Fungal Biol Biotechnol*, vol. 8, issue 6, pp. 1-7. [Online] Available at: doi.org/10.1186/s40694-021-00113-8 [Accessed 11 October 2025].

Aiduang, W., Jatuwong, K., Luangharn, T., Jinanukul, P., Thamjaree, W., Teeraphantuvat, T., Waroonkun, T. and Lumyong, S. (2024), "A Review Delving into the Factors Influencing Mycelium-Based Green Composites (MBCs) Production and Their Properties for Long-Term Sustainability Targets", in *Biomimetics*, vol. 9, issue 6, article 337, pp. 1-25. [Online] Available at: doi.org/10.3390/biomimetics9060337 [Accessed 11 October 2025].

Aiduang, W., Kumla, J., Srinuanpan, S., Thamjaree, W., Lumyong, S. and Suwannarach, N. (2022), "Mechanical, Physical, and Chemical Properties of Mycelium-Based Composites Produced from Various Lignocellulosic Residues and Fungal Species", in *Journal of Fungi*, vol. 8, issue 11, article 1125, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/jof8111125 [Accessed 11 October 2025].

Alaneme, K. K., Anaele, J. U., Oke, T. M., Kareem, S. A., Adediran, M., Ajibuwa, O. A. and Anabaranze, Y. O. (2023), "Mycelium based composites – A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications", in *Alexandria Engineering Journal*, vol. 83, pp. 234-250. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.012 [Accessed 11 October 2025].

Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., Krijgsheld, P. and Wösten, H. A. B. (2019), "Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites", in *Materials and Design*, vol. 161, pp. 64-71. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027 [Accessed 11 October 2025].

Armstrong, R. (2012), *Living Architecture – How Synthetic Biology Can Remake Our Cities and Reshape Our Lives*, TED Conferences, New York.

Berretta, T., Desideri, F. and Staltari, M. (2024), "Il progetto dello spazio pubblico, tra complessità e crisi ecologica – Da sfida a opportunità per la rigenerazione urbana | Public space project, between complexity and ecological crisis – From challenge to opportunity for urban regeneration", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 74-87. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1662024 [Accessed 11 October 2025].

Bille, M. and Sorensen, T. F. (eds) (2016), *Elements of Architecture – Assembling archaeology, atmosphere and the performance of building spaces*, Routledge, London.

Camere, S. and Karana, E. (2018), "Fabricating materials from living organisms – An emerging design practice", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 186, pp. 570-584. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.081 [Accessed 11 October 2025].

Chayaamor-Heil, N., Houette, T., Demirci, Ö. and Badarnah, L. (2024), "The Potential of Co-Designing with Living Organisms – Towards a New Ecological Paradigm in Architecture", in *Sustainability*, vol. 16, issue 2, article 673, pp. 1-36. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su16020673 [Accessed 11 October 2025].

Corradi, M., Stevens, T., Macaione, I., Raffa, A. and Andaloro, B. (2024), "Rigenerazione climatica green degli streetscapes – L'esperienza di De Urbanisten ad Anversa | Green climate-adaptive streetscapes regeneration – The De Urbanisten Experience in Antwerp", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 60-73. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1652024 [Accessed 11 October 2025].

Cortesão, J. and Lenzholzer, S. (2022), "Research through design in urban and landscape design practice", in *Journal of Urban Design*, vol. 27, issue 6, pp. 617-633. [Online] Available at: doi.org/10.1080/13574809.2022.2062313 [Accessed 11 October 2025].

Elsacker, E., Vandelook, S., Van Wylick, A., Ruytinx, J., De Laet, L. and Peeters, E. (2020), "A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites", in *Science of The Total Environment*, vol. 725, article 138431, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138431 [Accessed 11 October 2025].

Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D. and Viklander, M. (2015), "SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage", in *Urban Water Journal*, vol. 12, issue 7, pp. 525-542. [Online] Available at: doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314 [Accessed 11 October 2025].

Gaver, W. (2012), "What should we expect from Research Through Design?", in Konstan, J. A., Chi, E. H. and Höök, K. (eds), *CHI'12 – Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Austin, Texas, May 5-10, 2012*, Association for Computing Machinery, New York (NY), pp. 937-946. [Online] Available at: dl.acm.org/doi/10.1145/2207676.2208538 [Accessed 11 October 2025].

Gezer, E. D. and Kuştaş, S. (2024), "Acoustic and Thermal Properties of Mycelium-based Insulation Materials Produced from Desilicated Wheat Straw – Part B", in *BioResources*, vol. 19, issue 1, pp. 1348-1364. [Online] Available at: doi.org/10.15376/biores.19.1.1348-1364 [Accessed 11 October 2025].

Gruosso, S., Del Signore, M. and Di Cinzio, S. (2025), "The extended mind of public space: how urban design shapes human experience", in *Frontiers in Built Environment*, vol. 10, article 1504549, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fbuil.2025.1504549 [Accessed 16 October 2025].

Haddock, S. H. D., Moline, M. A. and Case, J. F. (2010), "Bioluminescence in the sea", *in Annual Review of Marine Science*, vol. 2, pp. 443-493. [Online] Available at: doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081028 [Accessed 11 October 2025].

Holt, G. A., McIntyre, G., Flagg, D., Bayer, E., Wanjura, J. D. and Pelletier, M. G. (2012), "Fungal mycelium and cotton plant materials in the manufacture of biodegradable molded packaging material – Evaluation study of select blends of cotton byproducts", in *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, vol. 6, issue 4, pp. 431-439. [Online] Available at: doi.org/10.1166/jbmb.2012.1241 [Accessed 11 October 2025].

Kaika, M. (2005), *City of Flows – Modernity, Nature, and the City*, Routledge, New York.

Kaku, T., Sugiura, K., Entani, T., Osabe, K. and Nagai, T. (2021), "Enhanced Brightness of Bacterial Luciferase by Bioluminescence Resonance Energy Transfer", in *Scientific Reports*, vol. 11, article 14994, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41598-021-94551-4 [Accessed 11 October 2025].

Karana, E., Barati, B., Rognoli, V. and Zeeuw van der Laan, A. (2015), "Material Driven Design (MDD) – A method to design for material experiences", in *International Journal of Design*, vol. 9, issue 2, pp. 35-54. [Online] Available at: ijdesign.org/index.php/IJDesign/article/viewFile/1965/687 [Accessed 11 October 2025].

Koi Khoo, C. and Shin, J.-W. (2018), "Designing with Biomaterials for Responsive Architecture – A soft responsive bio-structural hydrogel skin", in *Material Studies*, vol. 2, pp. 285-292. [Online] Available at: papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2018_125.pdf?utm_source [Accessed 11 October 2025].

Langie, K., Rybak-Niedźiółka, K. and Hubačíková, V. (2022), "Principles of Designing Water Elements in Urban Public Spaces", in *Sustainability*, vol. 14, issue 11, article 6877, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su14116877 [Accessed 11.10 2025].

Lu, P., Sani, N. M., Li, Y. and Wang, Y. (2025), "How does urban blue space affect human well-being? A study based on the stimulus-organism-response theory", in *Frontiers in Psychology*, vol. 16, article 1553296, pp. 1-20. [Online] Available at: doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1553296 [Accessed 16 October 2025].

Manni, V. and Valzano, L. S. (2023), "Modularità e architettura adattiva – Una strategia per la gestione di sistemi d'involucro complessi | Modularity and adaptive architecture – A strategy for managing complex envelope systems", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 134-151. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14112023 [Accessed 11 October 2025].

Mascitti, J. and Paciotti, D. (2024), "Verbal Design Modelling – Complessità, IA e innovazione di prodotto | Verbal Design Modelling – Complexity, AI and product innovation", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 344-353. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16292024 [Accessed 16 October 2025].

Moschetti, V. (2020), "Avamposti – Inventari progettuali per un future possible tra natura e artefatto | Outposts – Design inventories for a possible future between biology and the artefact", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 8, pp. 94-105. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/892020 [Accessed 11 October 2025].

Myers, W. (2012), *Bio Design – Nature, Science, Creativity*, MoMA, New York. [Online] Available at: moma.org/momaorg/shared/pdfs/docs/publication_pdf/3167/BioDesign_PREVIEW.pdf?1349967238 [Accessed 11 October 2025].

Newman, P. (2020), "Cool planning – How urban planning can mainstream responses to climate change", in *Cities*, vol. 103, article 102651, pp. 1-14. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cities.2020.102651 [Accessed 11 October 2025].

Norberg-Schulz, C. (1980), *Genius Loci – Towards a Phenomenology of Architecture*, Rizzoli, New York.

Önge, Y. (1997), *Türk Mimarisinde Selçuklu ve Osmanlı*, Türk Tarih Kurumu, Ankara.

Pallasmaa, J. (2005), *The Eyes of the Skin – Architecture and the Senses*, John Wiley and Sons, Hoboken.

Ruiz Galloza, G. (2025), *Lumínico – Bioluminescent Habitat to Enhance the Biodiversity*, Fab Lab Barcelona Institute for Advanced Architecture of Catalonia. [Online] Available at: class.textile-academy.org/2025/germarilis-ruiz/images/home/RevGermarilisRuizFabricademy25.pdf?utm_source [Accessed 11 October 2025].

Selman, P. (2012), *Sustainable landscape planning – The reconnection agenda*, Taylor and Francis, Hoboken.

Solarek, K., Pudełko, A., Mierzwicki, K., Solarek, K., Bartosik, Z. and Pyjor, A. (2022), "The potential of the Research by Design method in balancing water problems – An integrated water and space management program for a part of the Warsaw agglomeration", in *Cities*, vol. 121, article 103455, pp. 1-7. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.cities.2021.103455 [Accessed 11 October 2025].

Sposito, C. (2017), "Costruire con l'acqua – Nuovi paradigmi dell'architettura sostenibile | Building with Water – New standards of sustainable architecture", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 2, pp. 117-126. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/2162017 [Accessed 11 October 2025].

Sydor, M., Bonenberg, A., Doczekalska, B. and Cofta, G. (2022), "Mycelium-Based Composites in Art, Architecture, and Interior Design – A Review", in *Polymers*, vol. 14, issue 1, article 145, pp. 1-21. [Online] Available at: doi.org/10.3390/polym14010145 [Accessed 11 October 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development.* [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication [Accessed 11 October 2025].

Uzunkaya, A. and Paker Kahvecioğlu, N. (2022), "Architectural design research through reflection – A sub-approach under 'research by design'", in *Open House International*, vol. 47, issue 4, pp. 688-709. [Online] Available at: doi.org/10.1108/OHI-07-2021-0155 [Accessed 11 October 2025].

Valente, R., Bosco, R., Giacobbe, S. and Losco, S. (2022), "Il progetto di infrastrutture verdi per le acque piovane – Note di metodo da un caso studio | Green stormwater infrastructures research through design – Method notes from a case study", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 11, pp. 192-201. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/11172022 [Accessed 11 October 2025].

Violo, M. (2025), "Bioluminescent Wood Created Using Fungi – A New Sustainable Lighting Material", in *mycostories*, 13/06/25. [Online] Available at: mycostories.com/post/bioluminescent-wood-created-using-fungi-a-new-sustainable-lighting-material?utm_source [Accessed 11 October 2025].

Wattanavichean, N., Phanthuwongpakdee, J., Koedrith, P., Laoratanakul, P., Thaithatgoon, B., Somrithipol, S., Kwantong, P., Nuankaew, S., Pinruan, U., Chuaseeharonnachai, C. and Boonyuen, N. (2025), "Mycelium-Based Breakthroughs – Exploring Commercialization, Research, and Next-Gen Possibilities", in *Circular Economy and Sustainability*, vol. 5, pp. 3211-3253. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s43615-025-00539-x [Accessed 15 October 2025].

White, M. P., Alcock, I., Wheeler, B. W. and Depledge, M. H. (2013), "Would you be happier living in a greener urban area? – A fixed-effects analysis of panel data", in *Psychological Science*, vol. 24, issue 6, pp. 920-928. [Online] Available at: doi.org/10.1177/0956797612464659 [Accessed 11 October 2025].

Williams, C. F., Geroni, G. M., Lloyd, D., Choi, H., Clark, N., Pirog, A., Lees, J. and Porch, A. (2019), "Bioluminescence of Vibrio fischeri – Bacteria respond quickly and sensitively to pulsed microwave electric (but not magnetic) fields", in *Journal of Biomedical Optics*, vol. 24, issue 5, article 051412, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1117/1.JBO.24.5.051412 [Accessed 11 October 2025].

DESIGN
Research & Experimentation

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 370-383
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18232025

Article Info

Received	12 September 2025
Revised	19 October 2025
Accepted	20 October 2025
Published	30 December 2025

PUNTONET H_2O
Dall'indagine sul campo al prototipo di una stazione multifunzionale per l'acqua

PUNTONET H_2O
From field investigation to the prototype of a multifunctional water station

Ilaria Fabbri

Abstract

Un'adeguata disponibilità di acqua potabile in città può migliorare la qualità della vita e degli spazi pubblici, nonché favorire modelli di mobilità sostenibile e abitudini sane ed ecologiche; tuttavia le fontane per bere sono attualmente una 'specie urbana in via d'estinzione', spesso dismesse o guardate con diffidenza, largamente ignorate dalla comunità scientifica e dalla sperimentazione progettuale. Il contributo presenta parte di una ricerca che ha portato al progetto, alla prototipazione e alla dimostrazione in ambienti reali di una delle possibili soluzioni per rinnovare l'immagine del punto d'acqua e attribuirgli nuove funzioni a servizio del quartiere. Si illustrano in particolare gli esiti e il ruolo della fase preliminare di ascolto e di osservazione sul campo nella definizione del brief di progetto di PUNTOnet H_2O, arredo urbano multifunzionale e senziente che estende l'accesso all'acqua potabile negli spazi aperti collettivi.

Adequate availability of drinking water in cities can improve the quality of life and public spaces, while also encouraging sustainable mobility models and healthy, eco-friendly habits. However, drinking fountains are currently an 'urban species in danger of extinction', often dismissed or regarded with suspicion, largely ignored by both the scientific community and design experimentation. This paper presents part of a research project that led to the design, prototyping, and real-world demonstration of one possible solution to reinvent the image of the urban water point and assign it new functions that serve the neighbourhood. In particular, it illustrates the results and the role of the preliminary listening and field observation phase in defining the design brief for PUNTOnet H_2O, a multifunctional, sentient piece of urban furniture that extends access to drinking water in collective open spaces.

Keywords

arredo urbano, acqua potabile, spazio pubblico, progetto pilota, comportamenti pro-ambientali virtuosi

urban furniture, drinking water, public space, pilot project, virtuous pro-environmental behaviours



Ilaria Fabbri, PhD, is a Researcher at the School of Architecture and Design, University of Camerino (Italy). Her work focuses mainly on innovative spaces and services designed to encourage virtuous behaviours. During her research activities, she has patented and developed several prototypes of urban and furniture elements, which the community has tested in real urban contexts. E-mail: ilaria.fabbri@unicam.it

In Italia sussistono una serie di contraddizioni che evidenziano la necessità di un dibattito scientifico approfondito sulla risorsa idrica. Nonostante l'85% dell'acqua di rete provenga da falde sotterranee di qualità superiore alla media europea, con 249 litri pro-capite annui gli italiani sono i più grandi consumatori in Europa di acque minerali e al mondo secondi solo a chi abita in Paesi come il Messico (The European House – Ambrosetti, 2025), dove ciò che esce dal rubinetto non è sempre potabile. Il radicato pregiudizio nei confronti dell'acqua di rete è tanto più paradossale se si aggiungono i costi – la spesa media familiare per l'acquisto annuo di acqua imbottigliata è superiore alla bolletta del servizio idrico in un terzo dell'Italia (D'Angelis and Grassi, 2024) – e la sicurezza – le acque minerali hanno limiti normativi su 16 sostanze, mentre quelle potabili di rete non devono superare il valore di soglia per oltre 40 elementi, oltretutto recentemente rivisti con limiti più severi per i contaminanti emergenti dal Decreto Legislativo n. 102/2025.

È specialmente nel contesto fuori casa che l'acqua minerale si conferma il mezzo più diffuso per la nostra idratazione giornaliera. Certamente la pervasiva offerta di bottigliette usa e getta e l'infodemia pubblicitaria accattivante influenzano le scelte dei consumatori; tuttavia, anche l'assenza di una valida e capillare alternativa nello spazio pubblico è fortemente condizionante: negli ultimi decenni sono gradualmente scomparse da molte città le fontanelle per bere e, quando si incontrano, spesso sono dismesse, arrugginite, apparentemente con lo stesso destino delle cabine telefoniche (Salzman, 2012).

Solo di recente alcune città stanno ripristinando questo essenziale componente del corredo urbano a fronte di una maggiore consapevolezza dei costi ambientali dell'acqua in bottiglia e della progressiva trasformazione degli stili di vita. Il punto d'acqua ha un grande potenziale se adeguatamente ripensato, non solo nella modalità di erogazione del servizio di base, ma anche nelle sue capacità, spesso solo latenti, di arricchire l'esperienza di chi vive lo spazio pubblico, di promuovere stili di vita virtuosi e di riordinare, combinandoli tra loro, alcuni dei piccoli oggetti urbani presenti nel quartiere.

Da queste considerazioni prende avvio la ricerca condotta dall'autrice nell'ambito del Dottorato Internazionale IDAUP (Università di Ferrara e POLIS University), che ha portato al deposito di tre brevetti d'invenzione, al progetto e alla prototipazione di PUNTOnet H_2O, arredo urbano multifunzionale accessibile a persone e animali, apparentemente senza precedenti sul mercato italiano e internazionale, che estende l'accesso all'acqua potabile negli spazi aperti collettivi e promuove stili di vita più sani e sostenibili. Lo sviluppo dei prototipi e la loro sperimentazione in ambienti reali rientrano nella più ampia collaborazione tra Next City Lab (gruppo di ricerca interdisciplinare condotto dal Prof. Gabriele Lelli presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Ferrara) e il Gruppo Hera, una delle maggiori aziende multiservizi italiane operante nei settori ambientale, idrico ed energetico.

Di seguito si tratteranno solo alcuni aspetti della ricerca condotta e tra questi il ruolo che la fase preliminare di ascolto e di osservazione ha svolto nella definizione del brief di progetto di un sistema di arredi urbani che erogano acqua da bere e altri servizi per il quartiere. Si metterà poi in luce il processo iterativo di design che nei secoli ha plasmato il punto d'acqua nello spazio pubblico, dispositivo per lo più ignorato dalla comunità scientifica e dalla sperimentazione progettuale, ma che costituisce un efficace indicatore delle conquiste tecnologiche e sociali, della consapevolezza della collettività in merito a salute, igiene, risorse naturali.

E ancora, si riporteranno le potenzialità delle fontane urbane nel rispondere ad alcune sfide contemporanee in termini di salute pubblica e sostenibilità ambientale, riportando una serie di casi studio che hanno contribuito alla definizione della proposta progettuale. Ai fini di costruire un quadro realistico delle condizioni e della disposizione ricorrente dei punti d'acqua potabile nello spazio pubblico, nonché dei pregiudizi più comuni dei cittadini verso questa dotazione urbana, il paper riporterà poi metodologia ed esiti della mappatura e delle interviste condotte nel Comune di Ferrara, concludendo con alcune riflessioni su come l'indagine preliminare sul campo possa influenzare il progetto.

Ruolo e potenzialità dei punti d'acqua nello spazio pubblico | La stretta relazione tra risorsa idrica e sviluppo di agglomerati urbani rappresenta una delle lezioni elementari di storia: tutte le civiltà antiche sono sorte in prossimità di fonti d'acqua potabile. Secondo il geografo greco Pausania un luogo non poteva nemmeno essere definito città in assenza di fontane (Phurisamban and Gleick, 2017) prevalentemente collocate nei pressi degli edifici di culto e dei principali spazi pubblici: esse non assolvevano esclusivamente al compito di fornire acqua per l'idratazione e l'igiene personale, ma erano anche uno strategico punto di incontro per la comunità, dove interagire e scambiare informazioni. Spesso intorno alla fontana si concentravano altri elementi urbani, come sedute all'ombra, abbeveratoi per animali, nicchie votive (Fig. 1), e, in epoca moderna, anche insegne pubblicitarie, lampioni e orologi pubblici in corrispondenza di incroci stradali rilevanti e dei principali luoghi di aggregazione, come piazze e mercati (Fig. 2).

L'espansione delle città occidentali tra il XVII e il XVIII secolo e la crescita della domanda di acqua potabile in area urbana conseguente all'incremento demografico agirono da impulso alla trasformazione del sistema di distribuzione dell'acqua e alla sua regolamentazione, due aspetti al centro di accesi dibattiti (Mattern, 2023), soprattutto in relazione all'epidemia di colera.[1]

Per assicurare l'accesso ad acqua sicura e scongiurare la diffusione di malattie, ma anche contrastare il diffuso alcolismo, moltiplicando le occasioni per consumare acqua, si costituì a Londra la Metropolitan Drinking Fountain Association, dedicata alla costruzione di fontane pubbliche mediante fondi privati. La prima fontana pubblica realizzata dall'Associazione filantropica londinese fu inaugurata il 21 aprile 1859 e si trova tuttora presso la St. Sepulchre-without-Newgate Church in Holborn Hill: l'acqua zampillava da una cannella fissata a una conchiglia in marmo, all'interno di una nicchia incorniciata da un arco sorretto da colonne in granito rosso; due coppette metalliche legate con catenella alla recinzione consentivano ai passanti di dissetarsi.

Questa fontana ebbe un enorme successo ma proprio il sistema utilizzato per attingere acqua fu a sua volta causa di trasmissione di malattie e motivo di divergenze scientifiche: nella seconda metà dell'800 la teoria dei germi era agli inizi e non ancora accettata, infatti si riteneva che il solo getto d'acqua sulla coppetta fosse sufficiente a garantirne la perfetta igiene. I mestoli condivisi furono poi vietati nel 1912, sostituiti con bicchieri di carta monouso, ugelli metallici dal getto verticale e, a partire dal 1920, rubinetti con traiettoria parabolica inclinata di circa 45 gradi, il modello più igienico ed efficace di erogatore d'acqua pubblico fino ad allora introdotto.

I primi modelli di fontane prodotte in serie erano connotati da estrema semplicità e facilità d'uso, requisiti che li rendevano più efficienti e agevolmente riproducibili per strutturare una fitta rete sul territorio, così come avvenne con le prime fontane in ghisa, materiale più economico del bronzo e più facilmente reperibile, che consentiva la realizzazione di oggetti della forma desiderata.

Torino è stata una delle prime città europee a offrire una rete capillare di punti d'acqua per bere in ghisa, il Toret, l'iconica fontanella verde bottiglia dal corpo parallelepipedo sormontato da una volta semicilindrica, e come erogatore una piccola testa di toro, mutuato dallo stemma araldico locale. Questo modello apparve per la prima volta nel 1862 come azione specifica di un Piano urbano volto a garantire un accesso diffuso all'acqua potabile; i Toret sono stati poi installati gradualmente in corrispondenza dei mercati, delle aree verdi e delle piazze e oggi sono oltre 800. Una testimonianza dell'affezione dei torinesi nei confronti di queste fontanelle, «[…] non più solo elementi di arredo urbano bensì bene identitario» (Benente, 2011, p. 80) è il progetto 'I love Toret', Associazione di promozione sociale nata nel 2012 con lo scopo di valorizzarle e tutelarle con eventi, iniziative sociali, merchandising, o individuando il proprio Toret preferito per 'adottarlo', mediante un monitoraggio attivo nel segnalare eventuali guasti, atti vandalici o la necessità di ritinteggiarlo.

Esempi di alte espressioni d'arte scultorea e innovazione tecnologica si incontrano prevalentemente in fontane monumentali, mentre i piccoli oggetti che erogano acqua potabile nello spazio pubblico costituiscono una sorta di specie urbana in via di estinzione, spesso dismessi o non funzionanti (Fig. 3). Ci sono invece numerose e valide ragioni per riscoprire le fontane urbane e il loro ruolo nel contrastare alcune delle sfide contemporanee; non solo avere più fontanelle aumenterebbe il consumo di acqua in generale e di conseguenza migliorerebbe il benessere psicofisico, ma in un'era caratterizzata dai cambiamenti climatici con ondate di calore sempre più frequenti, la disponibilità di acqua da bere nello spazio pubblico renderebbe più semplice rinfrescarsi e rimanere adeguatamente idratati nelle giornate più torride.

In secondo luogo, la fontanella offre un'alternativa economica e sana al consumo di bibite zuccherate, spesso più facilmente reperibili e allettanti di un dispositivo pubblico in cui riempire la propria borraccia, soprattutto se si considera che l'obesità, condizione sempre più diffusa negli ultimi anni nei Paesi occidentali, è causata anche da un elevato consumo di bevande ad alto valore calorico (FEMTEC, 2015).

Le fontane d'acqua potabile possono inoltre contribuire alla sostenibilità ambientale; l'impatto della plastica sull'ambiente è solo parzialmente riconducibile al contributo delle bottigliette d'acqua minerale, ma l'intero ciclo di produzione utilizza fonti fossili, contribuisce all'aumento del riscaldamento globale e genera enormi quantità di rifiuti (Gleick, 2011). Non è quindi più tollerabile il paradigma di un «[…] usa-e-getta impudente e arrogante, che ritiene il Pianeta una sorta di supermercato» (Ercolini, 2024, p. 12). L'acqua di rete è imbattibile per soste-





Fig. 1 | Fonte del Mastro in Spello is a multipurpose urban space with a drinking fountain, public seating, greenery, and a votive niche (credit: A. Valeriani, 2010).

Fig. 2 | Stone drinking fountain in Mühlenplatz, Luzern, Switzerland (credit: I. Fabbri, 2015).

nibilità ambientale e una città che offra una rete adeguata di punti d'acqua collabora alla riduzione della plastica monouso.

La disponibilità di acqua da bere negli spazi pubblici supporta poi indirettamente la salute della comunità facilitando l'attività fisica all'aperto, aiutando le persone ad allenarsi meglio e a passare più tempo all'aperto. La relazione tra la presenza di elementi accessori finalizzati ad arricchire l'esperienza urbana 'all'altezza dell'occhio umano' (Sim, 2019) e la propensione alla permanenza nello spazio pubblico, anche per svolgere esercizio fisico, è stata evidenziata in numerose ricerche (Maspoli, 2018; Gianfrate and Longo, 2017; Buffoli et alii, 2017; Koohsari et alii, 2015; Lee et alii, 2005) sebbene l'interfaccia fisica del punto d'acqua, così come la sua relazione con altri servizi urbani, è fortemente trascurata e necessita di ulteriori approfondimenti.

Tendenze e obiettivi | Oggi il progetto dei punti d'acqua è fortemente divisivo, ad esempio Vittorio Magnago Lampugnani (2021, p. 112) lamenta che non sia stata data alcuna importanza all'estetica delle 'case dell'acqua', «[…] un'occasione mancata per conferire carattere ai quartieri che li ospitano». Tra i detrattori anche Scott Francisco, fondatore del collettivo Pilot Projects Design e promotore della 100 Fountains Initiative, il quale ritiene che molti degli attuali dispositivi pubblici per bere siano banali e poco attraenti: «They're not sexy. They're not speaking to me in a cultural way» (cit. in Schuler, 2015).

Alcuni esempi di punti d'acqua contemporanei particolarmente rilevanti e utili ai fini del progetto sono stati individuati, tramite ricerca diretta e indiretta, sul web e tramite la banca dati di brevetti Espacenet; il principale criterio di selezione dei casi studio, a prescindere dal fatto che si trattasse di prodotti in commercio o di manufatti unici, è stato quello del loro documentato funzionamento reale e intensivo in contesti pubblici.

Lo scopo dell'analisi dello stato dell'arte è rispondere a un problema decisionale indiretto (Ferraro, 2019), ossia progettare un prodotto rispetto a un ventaglio di alternative già esistenti ottimizzando efficacia e impiego di risorse. La ricerca delle caratteristiche tecniche è stata perciò determinante: una difficoltà di questa fase è stata l'individuazione di dati quantitativi, con particolare riferimento alle dimensioni e al peso dei prodotti, al costo di realizzazione e al numero di elementi installati; qualora disponibili, sono state quindi particolarmente utili le testimonianze di un eventuale successo o fallimento dei prodotti analizzati a valle della loro effettiva installazione. I casi studio sono stati raggruppati in quattro categorie: il punto d'acqua come elemento di identità urbana, come espressione artistica, come prodotto di consumo capillarmente diffuso in città e in quanto dispositivo tecnologicamente evoluto.

Il primo gruppo include progetti di rigenerazione urbana in cui l'inserimento o la riattivazione di fontane pubbliche non è il fine specifico dell'intervento, ma un'azione progettuale che incoraggia la riappropriazione degli spazi da parte della comunità. Questo è il caso dell'intervento a Castel San Pietro in Ticino (Italia) da parte di StudioSer. Sette punti di interesse – tre dei quali direttamente legati alla presenza dell'acqua da bere – sono stati identificati come possibili luoghi per migliorare la qualità della vita nell'abitato e l'inclusione tra le generazioni, con particolare attenzione agli anziani. I nuovi manufatti, semplici e poetici, fortemente materici e legati al contesto in cui sono collocati, rispondono ad esigenze quotidiane: la sosta e l'idratazione all'uscita della Chiesa (Fig. 4), il punto d'incontro protetto dalle auto che offre la possibilità di rinfrescarsi, l'approvvigionamento idrico per innaffiare i fiori del cimitero (Fig. 5).

La seconda categoria comprende invece quei punti d'acqua iconici a produzione limitata o in singolo esemplare progettati per sottolineare il ruolo simbolico della fonte e rendere più intensa l'esperienza visiva, tattile ed emotiva di chi si disseta. Un esempio è la scultura lapidea dal corpo affusolato opera di Ettore Spalletti nel 1986: attorno alla vasca circolare in cui è fissato l'erogatore metallico sono disposte, a creare una piazza idealizzata in miniatura, undici casette dal tetto a falda, suggestiva parafrasi senza tempo dello spazio pubblico con al centro la fontana (Fig. 6).

Nel terzo gruppo sono stati raccolti quegli esempi di punti d'acqua rilevanti non solo per il design del singolo oggetto, ma perché parte di una rete appositamente progettata per incrementare l'accesso all'acqua negli spazi pubblici, come la fonte in granito grigio 'modelo Cadiz', pensata appositamente per la città spagnola (Fig. 7): l'installazione di oltre 60 unità ha raddoppiato il numero di punti idrici operativi e colloca Cadice tra le capitali europee oggi più servite, con un rapporto stimato di una fontana ogni mille abitanti.

Nel quarto gruppo, tra i dispositivi tecnologicamente evoluti, troviamo distributori d'acqua filtrata, talvolta con ulteriori opzioni di scelta (refrigerata, frizzante, in qualche caso anche aromatizzata) e la possibilità di monitorare in tempo reale consumi e prestazioni del sistema, come avviene per la stazione per l'acqua dell'australiana Meetpat. Essa consiste in una stele retroilluminata, dotata di un'apertura per il riempimento delle borracce e predisposta per l'implementazione funzionale mediante una serie di kit opzionali: fontanella, ciotola per cani, sistema di filtrazione (Fig. 8).

I casi studio raccolti sono poi stati valutati sotto i cinque aspetti di esperienza utente, interfaccia, offerta idrica, inserimento urbano e costruzione e ma-

nutenzione, per ognuno dei quali sono stati evidenziati uno o più indicatori qualitativi di performance (Tab. 1). Nella loro estrema varietà e diversità gli esempi ritracciati sono tutti rilevanti, sebbene nessuno di essi inserisca la fontana contemporanea in una rete di altri servizi dedicati alla salute pubblica: l'erogazione dell'acqua di rete rimane un servizio isolato, senza sinergie con altri. Solo Well – dispenser sviluppato a Hong Kong da Urban Spring – introduce un timido sistema di premialità per gli utenti dell'erogatore, con il coinvolgimento di alcuni commercianti locali, che appare estremamente promettente per le future evoluzioni del punto d'acqua.

Usi, pregiudizi e collocazione ricorrente delle fontane per bere: indagine sul campo | Una fase preliminare al progetto di una stazione multifunzionale per l'acqua è stata finalizzata a incrementare la conoscenza diretta della dotazione dei punti di approvvigionamento idrico in una città di medie dimensioni e definire una casistica ricorrente del loro posizionamento urbano e del loro uso / non uso. Per farlo è stata condotta una ricerca sul campo prendendo come caso studio il Comune di Ferrara, città che si presta a un'indagine sulla distribuzione delle fontanelle per due ragioni: la prima è l'alta percentuale di mobilità attiva da parte di residenti e fuori sede, contesto che crea maggiori occasioni di idratazione fuori casa[2]; la seconda è l'elevato numero di giorni di disagio bioclimatico registrati in città[3] da Arpae (2025), dunque maggiori rischi di colpi di calore e disidratazione, nonché potenziale aggravamento delle condizioni di salute di persone fragili ma, nonostante queste premesse, la stampa locale consultata al momento della ricerca denunciava una carenza cronica di punti urbani per bere.[4]

La mappatura sul campo ha previsto dapprima una verifica del numero di fontanelle pubbliche: gli 88 indirizzi pubblicati dall'Ufficio Ecologico della Provincia di Ferrara[5] sono stati confrontati con i 37 punti di erogazione indicati sulla mappa digitale collaborativa sul sito 'fontanelle.org'. Grazie a questa operazione di confronto e ricomposizione dei dati, il numero complessivo di fontanelle accessibili nel Comune di Ferrara è risultato pari a 82; il campione di riferimento è stato poi ristretto a 49 unità all'interno del Centro Storico, collocate quindi su un figure ground della città al fine di visualizzare la distribuzione effettiva nei quartieri e individuare eventuali carenze di copertura (Fig. 9).

Come osservato da Ivanov (2015), la distanza ottimale tra le fontanelle potrebbe essere quantificata in funzione del tempo necessario per raggiungerle anziché dei metri lineari. Infatti chi si sposta in bicicletta percorre distanze maggiori in tempi più brevi rispetto a chi corre o cammina, e dunque potrebbe necessitare di punti di ristoro più distanziati. Considerato che l'idratazione durante l'attività fisica dipende dall'intensità e dalla durata dello sforzo, nonché dalle condizioni ambientali, oltre che da fattori personali quali età, genere o livello di allenamento, si è assunto come parametro di riferimento la regola empirica secondo cui l'assunzione di acqua dovrebbe avvenire ogni 15 minuti, con un apporto di circa 200-300 ml a intervallo, come comunemente raccomandato per gli atleti.

Su questa base sono stati definiti sette profili di utenti caratterizzati da differenti livelli di esercizio fisico, dal camminatore più lento al ciclista impegnato in attività intensa: a ciascun profilo è stata associata una velocità di percorrenza e di conseguenza la distanza stimata percorribile in 15 minuti, assunta come arco temporale significativo per il reintegro idrico (Fig. 10). Osservando la distribuzione delle fontanelle nel Centro Storico di Ferrara, alla luce di tali considerazioni, emerge che soprattutto sul lato est delle Mura sarebbe opportuno intensificare la dotazione di punti d'acqua, dove è frequente la presenza di persone anziane e bambini in passeggiata.

A partire da queste considerazioni a scala urbana si è proceduto a ispezionare i punti d'acqua nel Centro Storico di Ferrara. L'indagine ha contemplato sostanzialmente tre momenti distinti: la schedatura valutativa di ogni fontanella; l'osservazione senza mediazione dell'interazione con i passanti; una serie di interviste semistrutturate. È stata appositamente sviluppata una scheda di valutazione di facile compilazione per una raccolta dei dati più spedita e ordinata[6], che raccoglie diversi parametri, dalle caratteristiche urbane del punto di installazione alla funzionalità, dallo stato di manutenzione alle geometrie del manufatto. Tutte le fontanelle sono state testate e sono stati annotati il numero e il tipo di utenti (Fig. 11). Infine è stato avviato un dialogo diretto con i passanti focalizzato sulle loro abitudini di consumo dell'acqua fuori casa, sull'attività fisica condotta all'esterno e sulla percezione generale delle fontanelle pubbliche.

Risultati della mappatura e delle interviste | La collocazione delle fontanelle si è rivelata complessivamente coerente con il contesto circostante, caratterizzato da parchi pubblici, aree giochi per bambini o fermate degli autobus. Solo il 20% dei punti d'acqua esaminati si trova nel raggio di 50 metri rispetto ad altri servizi potenzialmente sinergici, come panchine e rastrelliere per biciclette. Il 40% dei punti acqua invece non risulta visibile dalla strada, oppure è parzialmente schermato e scarsamente illuminato, condizioni associate ad un apparente disuso. Il modello prevalente è a colonna in ghisa con vasca alla base, ispirato alle 'vedovelle milanesi', con rubinetto in ottone e manopola a croce; meno rappresentate in termini di numero sono le fontane per bere storiche, dalla struttura in mattoni e/o pietra ed erogazione continua; non sono state rilevate stazioni contemporanee per il riempimento di borracce.

I punti d'acqua sono mediamente ben mantenuti e senza segni rilevanti di vandalismo o incuria, fatta eccezione per un caso di crescita di erbacce e tre episodi di danneggiamento della pavimentazione alla base che rendono difficoltoso l'avvicinamento al servizio, soprattutto per ciclisti o persone su sedie a rotelle o con passeggino. Delle 40 fontanelle funzionanti, quasi tutte garantiscono un flusso regolare, ma sempre rivolto verso il basso: nessuna è infatti dotata di getto verso l'alto o di erogatore dedicato all'abbeveraggio degli animali. Sono stati ritrovati contenitori di plastica provvisori lasciati a terra in prossimità di numerose fontane, segno di un'esigenza particolarmente sentita da chi esce in passeggiata col proprio cane.

Le interviste in loco hanno coinvolto studenti, lavoratori, sportivi, genitori con figli, anziani e persone fragili, selezionati casualmente in prossimità dei punti d'acqua; gli intervistati includono sia detrattori che promotori delle fontanelle, con leggera prevalenza (51%) degli utilizzatori abituali.

Un importante dato emerso è l'esistenza di un diffuso pregiudizio secondo cui le fontanelle pubbliche non funzionano; di conseguenza molti cittadini preferiscono ricorrere all'acquisto di bevande in bottiglia o, in seconda istanza, portare con sé la propria borraccia senza alcuna aspettativa di poterla riempire lungo il percorso, trattenendo la sete una volta senza acqua. Oltre il 30% delle persone intervistate ha comunque dichiarato di trovare fastidioso portare con sé una bottiglia riutilizzabile per l'intera giornata, in particolare durante lo svolgimento di attività fisica. Il generale disagio nell'utilizzo – ad esempio il timore di schizzarsi bevendo – è stato registrato come barriera tangibile alla fruizione del servizio. Mentre l'80% ha dichiarato di bere abitualmente dal rubinetto di casa e avere fiducia nella qualità dell'acquedotto, sia il sapore sia la temperatura durante i periodi più caldi dell'acqua erogata dalle fontanelle sono stati oggetto di forte critica. Una minoranza ha perciò confessato un vero e proprio legame di fedeltà verso marche specifiche di acqua in bottiglia per l'idratazione fuori casa, specialmente nei casi di uso di acqua frizzante; infine sia chi utilizza le fontanelle sia chi le evita ha citato l'uso improprio dei punti d'acqua – per dissetare animali – come rilevante disincentivo all'uso (Fig. 12).

In generale per la maggior parte degli intervistati l'acqua pubblica è percepita come sicura, mentre ciò che penalizza l'utilizzo delle fontanelle sono essenzialmente i dubbi sull'igiene dell'erogatore, il discomfort durante l'utilizzo e la scarsa abitudine ad approvvigionarsi alle fontanelle, spesso perché effettivamente installate in aree appartate, non visibili e in definitiva «[…] inutili, nel senso di non utilizzabili» (Rossi, 2014, p. 1).

Dall'indagine sul campo al progetto di un servizio urbano promotore di salute | La positiva convergenza tra gli obiettivi della ricerca dottorale e del Gruppo Hera verso nuovi servizi urbani in linea con l'economia circolare ha creato le condizioni per lo sviluppo prototipale di un sistema di arredi multifunzionali per l'erogazione di acqua potabile che rinnovi l'immagine della fontanella pubblica, contribuendo alla riduzione dei rifiuti di plastica, incoraggiando comportamenti sostenibili e aggregando servizi urbani



Fig. 3 | Cast-iron dismissed fountain with no spigot, Ascoli Piceno (credit: I. Fabbri, 2023).

distinti. Di seguito si presentano gli esiti dell'indagine preliminare che ne hanno maggiormente influenzato il processo di design.

La prima riflessione riguarda la necessità di rivedere la collocazione e la copertura territoriale dei punti d'acqua. Le fontane per bere, quando presenti, sono spesso installate in angoli della città poco attraenti, nascoste dai cassonetti per rifiuti o peggio in prossimità dei bagni pubblici, contesti che condizionano negativamente la percezione dell'igiene del servizio. Un corretto posizionamento, frutto della conoscenza delle dinamiche di aggregazione nel quartiere, è quindi il primo punto per rendere più appetibile l'elemento di arredo urbano che si intende valorizzare. Luoghi di passaggio o stazionamento come aree commerciali, fermate del trasporto pubblico, percorsi pedonali e sportivi e cortili scolastici rappresentano potenziali sedi ideali per un servizio urbano contemporaneo di erogazione d'acqua, considerando al contempo la vicinanza a punti di allaccio idrico ed elettrico[7]. È inoltre fondamentale ristabilire una rete adeguatamente fitta di punti di approvvigionamento idrico, facilmente riconoscibili come parte di un sistema e non concepiti come oggetti isolati.[8]

In merito agli aspetti estetico-percettivi del nuovo punto d'acqua da bere, è stata considerata la comune aspettativa rilevata tra i cittadini di incontrare fontanelle disadorne e poco invitanti, in cattivo stato di manutenzione e con acqua dalla qualità incerta. Assicurare un'esperienza piacevole a chi ha sete significa prima di tutto offrire acqua dal buon sapore e alla temperatura ideale. Questa esigenza basilare, confermata dalle persone intervistate, ha portato il gruppo di ricerca a inserire, tra i requisiti di progetto, la presenza di uno spazio funzionale ad accogliere un sistema di filtrazione, refrigerazione ed eventualmente carbonatazione.

Si è cercato inoltre di indagare quali caratteristiche fisiche di un prodotto da installare all'esterno possano a monte influenzare il senso del gusto, anche in assenza di un contatto diretto; un involucro lucido, riflettente, semi trasparente e privo di cavità è apparso particolarmente adatto a trasmettere sensazioni di freschezza e pulizia; questi effetti sono stati studiati successivamente in fase di sviluppo prototipale con l'uso del vetro che da un lato consente molte possibilità di personalizzazione, dall'altro è un materiale adeguato per sicurezza e durabilità all'installazione in spazi aperti collettivi.

In termini di accessibilità le osservazioni sul campo hanno messo in luce il bisogno di attingere acqua in modi diversi, con e senza contenitori personali, anche con una sola mano, per una maggiore comodità di tutti gli utenti, da chi trasporta buste della spesa a chi presenta limitazioni di movimento o deficit di equilibrio. Dalle interviste è poi emerso che la fruizione del punto d'acqua da parte degli animali genera reazioni fortemente divisive: è interessante come, nell'evoluzione storica delle fontane pubbliche, le 'specie compagne' (Haraway, 2023) abbiano esercitato una non trascurabile forma di 'agency' e permesso di ampliare il dominio antropocentrico[9] (Casiddu, Burlando and Chen, 2024). Il progetto di un dispositivo contemporaneo che eroga acqua deve quindi confrontarsi con la sfida di accogliere anche utenti non umani, senza compromettere i requisiti di igiene e accessibilità del prodotto.

Infine l'indagine sul campo sottolinea l'importanza di aumentare la consapevolezza e il senso di responsabilità nei confronti dell'acqua pubblica, la cui percezione del valore potrebbe essere falsata dalla facile disponibilità e dalle tariffe contenute, di gran lunga inferiori rispetto alla media europea. Un punto d'acqua innovativo può contribuire a questo obiettivo diventando esso stesso strumento di comunicazione della qualità della risorsa idrica: infondere fiducia e rispetto verso di essa può indirettamente stimolare un senso di orgoglio nei confronti delle fonti locali, nonché un maggiore impegno nel ridurre i propri sprechi e ad attribuire maggior valore alle fontane, oggetto quindi di maggiore cura.

In riferimento a quest'ultimo punto, si è molto discusso sul perché la 'città dei servizi', di cui gli abitanti sono visti solo quali potenziali utenti, sia essenzialmente una città senza cura per le persone, per i luoghi e per l'ambiente (Sennet, 2018; Moreno, 2024). In questo dibattito scientifico Ezio Manzini (2021) avanza l'ipotesi che, per rigenerare una città capace di cura, occorra sviluppare delle nuove comunità anche attraverso una nuova generazione di servizi collaborativi, distribuiti sul territorio e capaci di stimolare le persone. La sfida è creare un'inedita comunità di luogo focalizzata sulla sostenibilità ambientale attorno a un'interfaccia fisica, un oggetto urbano relazionale e dialogante che integri la dimensione sociale con quella ecologica.

La mappatura e le interviste condotte nel Comune di Ferrara, così come il confronto tipologico tra prodotti già esistenti, hanno contribuito in modo rilevante alla definizione di obiettivi, norme, esigenze, requisiti e prestazioni di un nuovo punto d'acqua. Sono state elaborate, in più fasi, alternative progettuali differenti e con grado crescente di complessità,



Fig. 4 | StudioSer introduced a new seating with an integrated fountain and gutter in the square in front of the church in Monte, once a site for congregation and play, to make it lively again, and more comfortable (credit: S. Högger, 2022).

confrontate poi tra loro rispetto a diversi criteri (Fig. 13); ciò ha consentito di selezionare la soluzione preferenziale, affinata progressivamente attraverso un processo iterativo e un approccio fortemente interdisciplinare. In questa fase hanno infatti trovato convergenza le competenze del design, dell'ingegneria strutturale e ambientale, della microbiologia e dell'informatica.

L'esito di questo processo è un oggetto urbano multifunzionale, denominato PUNTOnet H_2O, che ambisce a incentivare l'idratazione fuori casa e a creare più occasioni di incontro, lavoro e relax all'aperto; esso è quindi molto diverso – dal punto di vista funzionale, estetico-percettivo e per il target di utenza – dalla tradizionale 'casetta dell'acqua', tendenzialmente monofunzionale, raggiungibile per il riempimento massivo di contenitori destinati allo stoccaggio domestico.

PUNTOnet H_2O è una fonte di acqua potabile sicura, a scelta tra naturale a temperatura ambiente, naturale e frizzante refrigerata; è presente anche una piccola ciotola e un erogatore dedicato agli animali domestici in passeggiata. PUNTOnet H_2O è però molto di più di una fontana per bere: è al contempo un'ampia seduta pubblica e un punto di ristoro e di appoggio per leggere o lavorare all'esterno, che consente la ricarica di dispositivi elettronici come tablet, smartphone, biciclette elettriche e scooter per persone con disabilità. Esso si propone anche come un supervisore della salute a scala di quartiere perché capace di catturare dati sulla qualità dell'aria, sull'inquinamento acustico e sul microclima, monitorando lo spazio circostante per una comunità più sicura e informata.

Infine PUNTOnet H_2O è una lanterna urbana, grazie alla retroilluminazione dell'involucro, e una colonna pubblicitaria: con il suo monitor digitale, può suggerire stili di vita più sani, comunicare dati ambientali in tempo reale, anche relativi alla stessa qualità dell'acqua, e promuovere iniziative locali. La collaborazione tra differenti competenze tecnico-scientifiche e settori industriali – dal campo della carpenteria leggera a quello della filtrazione dell'acqua, dalla lavorazione del vetro all'IoT e alla Realtà Aumentata – ha consentito l'effettiva prototipazione e la successiva dimostrazione in contesti operativi reali. La realizzazione, la dotazione tecnologica e l'installazione dei prototipi sono state interamente finanziate dal Gruppo Hera.

Conclusioni e sviluppi futuri | L'erogazione d'acqua nello spazio pubblico costituisce un tassello di una tematica molto più vasta riguardante la gestione della risorsa idrica, sottolineando l'urgenza di un nuovo approccio ecologico e di un uso della risorsa più consapevole, informato e sostenibile.

Il contributo da un lato evidenzia i vantaggi in termini di salute pubblica nel ripensare la fontana per bere, dall'altro illustra il metodo che ha portato al progetto di una delle possibili soluzioni per accrescere l'attrattività degli spazi urbani e il benessere di chi li vive, inserendosi nel processo progettuale iterativo che da sempre caratterizza l'evoluzione dei punti d'acqua in città.

La fase preliminare di raccolta informazioni sul campo ha richiesto l'adozione di una procedura oggettiva che si è materializzata con il documento di valutazione delle fontanelle esistenti (adattabile per valutare le caratteristiche di altri servizi urbani), ma anche uno sforzo di empatia attraverso il dialogo diretto con i passanti e l'osservazione paziente del rapporto spontaneo e quotidiano delle persone con lo spazio pubblico e i suoi oggetti: una fase 'a vocazione antropologica', concentrata non solo sugli oggetti, ma soprattutto sui comportamenti, «[…] non sulla religione assoluta della funzione, ma sulle potenzialità relative» (Vinti, 2019, p. 19).

Dopo un primo progetto dimostratore monitorato per un anno in un contesto urbano ad accesso controllato – un'area esterna coperta all'interno della sede centrale del Gruppo Hera a Bologna (Fig. 14) – PUNTOnet H_2O è attualmente in fase di test in 5 quartieri pilota della Città di Cesena, prima sperimentazione in ambienti operativi reali di un sistema di punti d'acqua contemporanei che aggregano servizi differenti e offrono la possibilità di svolgere attività tra loro sinergiche in prossimità, come idratarsi e fare una pausa all'aperto (Fig. 15).

La verifica del soddisfacimento dei requisiti tecnici e funzionali e dell'accettabilità di PUNTOnet H_2O da parte dei cittadini si è articolata in una prima fase di osservazione sul campo, mediata e non mediata, all'avvio della sperimentazione nei quartieri (primi mesi del 2023) e nell'attività di somministrazione di un sondaggio 'scientifico' veicolato agli abitanti tramite QR code applicato sul corpo del totem. La sistematizzazione degli esiti del processo di monitoraggio consentirà di validare l'efficacia della soluzione proposta di fronte alle complessità del suo utilizzo reale e indirizzare gli sviluppi futuri verso l'ottimizzazione dell'elemento di arredo, l'implementazione in altre aree pilota e lo sviluppo di nuove configurazioni. La sperimentazione offre l'occasione per innovare i servizi di prossimità attraverso la densificazione di piccoli nodi connessi ad alta intensità funzionale (Gianfrate and Longo, 2017), rendendoli più comodi, versatili e convenienti, poiché governati da logiche di premialità. Un sistema di interfacce urbane di questo tipo può contribuire a superare lo stigma legato all'utilizzo dei punti d'acqua urbani e attivare un processo educativo proattivo che porti le persone nel lungo periodo alla trasformazione dei propri modelli di consumo e a un uso più responsabile della risorsa idrica.

In Italy, several contradictions highlight the need for a deeper scientific debate on water resources. Although 85% of the national water supply comes from





Fig. 5 | The new stone fountain by the cemetery in Monte, redesigned by StudioSer (credit: S. Högger, 2022).

Fig. 6 | The marble fountain by Ettore Spalletti, Contemporary Art Museum, Rivoli Castel, Rivoli, Turin (credit: P. Pellion, 1986).





Fig. 7 | The drinking fountain 'Modelo Cádiz' in Alameda Apodaca gardens (credit: Aguas de Cádiz, 2020).

Fig. 8 | The ground-mounted version of the bottle refill stations manufactured by Meetpat, equipped with the drinking fountain arm kit, in order to cater for people without their personal flask (credit: Meetpat, 2023).

groundwater of a quality higher than the European average, Italians are the largest consumers of bottled mineral water in Europe, and the second in the world after countries like Mexico (The European House – Ambrosetti, 2025), where what flows from the tap is not always drinkable. The deep-rooted prejudice against tap water is all the more paradoxical when considering both the costs, the average household spending on bottled water each year exceeds the water service bill in one-third of Italy (D'Angelis and Grassi, 2024), and the safety, mineral waters are regulated for 16 substances, while tap water must not exceed the threshold value for over 40 elements, recently revised with stricter limits on emerging contaminants under Decreto Legislativo n. 102/2025.

It is especially in out-of-home context that bottled water remains the most widespread means of daily hydration. Indeed, the pervasive availability of disposable bottles and the appealing advertising infodemic influence consumer choices; however, the absence of a valid, widely available public alternative is also a determining factor. In recent decades, public drinking fountains have gradually disappeared from many cities and, when encountered, are often found to be dismissed, rusted, or neglected, apparently going the way of pay phones (Salzman, 2012).

Only recently have some cities begun to restore this essential element of urban infrastructure, prompted by a growing awareness of the environmental costs of bottled water and the progressive transformation of lifestyles. The water point holds great potential if it is properly reinvented, not only in how it provides the basic service of drinking water, but also in its often latent ability to enrich the public-space experience, promote virtuous lifestyles, and, by combining the two, reorganise some of the small urban objects in the neighbourhood.

These considerations serve as the starting point for the author's research within the framework of the IDAUP International Doctorate (University of Ferrara and POLIS University), which led to the filing of three invention patents and to the design and prototyping of PUNTOnet H_2O, an accessible, multifunctional urban furnishing for both people and animals. Apparently unprecedented on the Italian and international market, it extends access to drinking water in collective open spaces and promotes healthier, more sustainable lifestyles. The development of prototypes and their testing in real environments are part of a broader collaboration between the Next City Lab (an interdisciplinary research group led by Prof. Gabriele Lelli at the Department of Architecture, University of Ferrara) and the Hera Group, one of the largest Italian multi-utility companies operating in the environmental, water, and energy sectors.

The following pages will address selected aspects of the research, including the role of the preliminary listening and observation phase in defining the design brief for an urban furniture system that provides drinking water and other neighbourhood services. It will also highlight the iterative design process that, over centuries, has shaped the urban water point – a device overlooked by both the scientific community and design experimentation, yet a powerful indicator of technological and social progress and of the collective awareness of health, hygiene, and natural resources.

Furthermore, the paper will outline the potential of urban fountains to address contemporary challenges in public health and environmental sustainability. It will present a series of case studies that informed the design proposal. To construct a realistic picture of the conditions and recurring distribution of drinking water points in public space, as well as the common prejudices citizens hold toward this urban amenity, the paper will also present the methodology and results of the mapping and interviews conducted in the Municipality of Ferrara, concluding with reflections on how preliminary field investigation can influence design.

Role and potential of water points in public space | The close relationship between water resources and the development of urban settlements represents one of the most elementary lessons in history: all ancient civilisations arose in proximity to sources of drinking water. According to the Greek geographer Pausanias, a place could not even be defined as a city in the absence of fountains (Phurisamban and Gleick, 2017). These fountains were predominantly located near places of worship and main public spaces, serving not only to provide water for drinking and personal hygiene but also as strategic meeting points for the community, places for social interaction and sharing information. Often, other urban elements were concentrated around the fountain, such as shaded seating areas, animal troughs, and votive niches (Fig. 1); in the modern era, advertising signs, lampposts, and public clocks were also added, typically at key intersections or in significant gathering places such as squares and markets (Fig. 2).

The expansion of Western cities between the 17th and 18th centuries and the growing demand for drinking water in urban areas, driven by population growth, spurred the transformation and regulation of water distribution systems, which became

Picture	Name	Designer(s)	Year	Place	Qualitative KPIs
Water point as an urban placemaking element					
	Public spaces renovation around urban water spots	Rina Rolli Tiziano Schürch StudioSer	2020-2022	Monte (Municipality of Castel San Pietro), Ticino Canton, Switzerland	USER EXPERIENCE: wide accessibility, ease of use; INTERFACE: free access, connected to other urban services; WATER SYSTEM: stoop-and-drink fountain, bottle filling faucet; URBAN PLACEMENT: ownership and belonging in the public domain; CONSTRUCTION AND MANAGEMENT: ease of installation
	Old town refurbishment	Miàs Architects	1998-2012	Banyoles, Spain	USER EXPERIENCE: ease of use; INTERFACE: free access; WATER SYSTEM: stoop-and-drink fountain, bottle filling faucet; URBAN PLACEMENT: ownership and belonging in the public domain; CONSTRUCTION AND MANAGEMENT: robustness and vandal-proof, simplicity of fixing options
	New identity to squares and public spaces in mountain villages	Mirko Franzoso Mauro Marinelli	2019-2020	Castelfondo (Municipality of Borgo d'Anaunia) and Bolciana (Municipality of Tre Ville), Trento	USER EXPERIENCE: ease of use; INTERFACE: free access; WATER SYSTEM: stoop-and-drink fountain, bottle filling faucet; URBAN PLACEMENT: ownership and belonging in the public domain; CONSTRUCTION AND MANAGEMENT: robustness and vandal-proof, simplicity of fixing options
Water point as artistic expression - from bespoke, one-off items to small-batch production					
	Fonte	Ettore Spalletti	1986	Contemporary Art Museum, Rivoli Castel, Rivoli, Turin; also installed in Arnheim (NL), Münster and Bonn	USER EXPERIENCE: ease of use; INTERFACE: free access; WATER SYSTEM: stoop-and-drink fountain; URBAN PLACEMENT: ownership and belonging in the public domain; CONSTRUCTION AND MANAGEMENT: ease of installation
	Drinking fountains public art project	7 different artists for 5 sculptures-fountains: Lisa Elias, Seitu Jones, Peter Morales, Gita Ghei, Sara Hanson, Jan Louise Kusske, Andrew MacGuffie	2008-2011	Minneapolis, different locations	USER EXPERIENCE: ease of use; INTERFACE: free access; WATER SYSTEM: stoop-and-drink fountain, bottle filling faucet, dog bowl (some of the fountains); URBAN PLACEMENT: visual impact; CONSTRUCTION AND MANAGEMENT: robustness and vandal-proof, simplicity of fixing options
	Watering Holes	Robin Monotti Architects and Mark Titman	2010-2012	London, Green Park	USER EXPERIENCE: wide accessibility, ease of use; INTERFACE: free access; WATER SYSTEM: stoop-and-drink fountain, bottle filling faucet, dog spout, chilled water; URBAN PLACEMENT: visual impact; CONSTRUCTION AND MANAGEMENT: robustness and vandal-proof
Water point at every corner, large-scale produced					
	Modelo Cádiz	Juan Carlos Curado	2018-2021	Cádiz, Spain	USER EXPERIENCE: wide accessibility, ease of use; INTERFACE: free access; WATER SYSTEM: stoop-and-drink fountain, bottle filling faucet; URBAN PLACEMENT: ownership and belonging in the public domain; CONSTRUCTION AND MANAGEMENT: robustness and vandal-proof, ease of installation, simplicity of fixing options
	Hydra	Product design Diwiz | Daniel Sousa Graphic design Pedro Gonçalves	2020	Engineered and manufactured in Albergaria-a-Velha, Portugal and sold by LARUSDESIGN	USER EXPERIENCE: wide accessibility, ease of use, perception of hygiene; INTERFACE: free access; WATER SYSTEM: stoop-and-drink fountain, bottle filling faucet, dog bowl; URBAN PLACEMENT: visual impact; CONSTRUCTION AND MANAGEMENT: robustness and vandal-proof, ease of installation, simplicity of fixing options
	Bent leaf	JC Brown	2016	Created and manufactured for the city of Melbourne, it is currently sold worldwide by Draffin Street Furniture	USER EXPERIENCE: wide accessibility, ease of use, perception of hygiene; INTERFACE: free access; WATER SYSTEM: stoop-and-drink fountain, bottle filling faucet, dog bowl (some models); URBAN PLACEMENT: visual impact; CONSTRUCTION AND MANAGEMENT: robustness and vandal-proof, simplicity of fixing options
Water point as evolved bottle filler					
	Meetpat permanent station – Full optional	Nick Roseby Nick Robinson	2018, 2022	Designed and engineered in Albury, Australia, sold wordlwide by Meetpat	USER EXPERIENCE: wide accessibility, ease of use, hands-free inputs (some models), perception of hygiene; INTERFACE: free access, geo-located, opportunity for advertising screen; WATER SYSTEM: stoop-and-drink fountain, bottle filling faucet, dog bowl (some models), water treatment; URBAN PLACEMENT: visual impact, customizable shell, properly lighted in the dark; CONSTRUCTION AND MANAGEMENT: robustness and vandal-proof, ease of installation, remotely monitored, modularly extensible service
	Well	Chi-Wing Lee from Milk Design (HK); Eddy Yu and Hung Lam of CoDesign	2017, 2024	Designed and engineered in Hong Kong and sold by Urban Spring Co., Ltd	USER EXPERIENCE: ease of use, hands-free inputs (some models), perception of hygiene; INTERFACE: free access, geo-located, rewarding system, connected with other urban services; WATER SYSTEM: bottle filling faucet, water treatment, chilled water; URBAN PLACEMENT: visual impact, customizable shell, properly lighted in the dark; CONSTRUCTION AND MANAGEMENT: ease of installation, remotely monitored
	Healthy Living Hardware Pole	Christian Tietz (University of New South Wales)	2018	Firstly installed in Olds Park, Penshurst, Sydney, in the frame of Smart Social Spaces project	USER EXPERIENCE: ease of use, perception of hygiene; INTERFACE: free access, connected to other urban services; WATER SYSTEM: bottle filling faucet, power to boil water; URBAN PLACEMENT: visual impact, customizable shell, properly lighted in the dark; CONSTRUCTION AND MANAGEMENT: ease of installation, simplicity of fixing options, remotely monitored, modularly extensible service

Tab.1 | A mapping of selected water points according to their key performance indicators (credit: I. Fabbri, 2025).

central to heated debates (Mattern, 2023), particularly during the cholera epidemic.[1]

To ensure access to safe water, prevent the spread of disease, and combat widespread alcoholism by increasing opportunities to drink water, the Metropolitan Drinking Fountain Association was established in London. This philanthropic initiative, funded by private donations, aimed to build public drinking fountains. The first fountain constructed by the London association was inaugurated on 21 April 1859 and still stands at St. Sepulchre-without-Newgate Church in Holborn Hill. Water flowed from a spout fixed to a marble shell set within a niche framed by a granite arch and columns; two small metal cups, chained to the structure, allowed passers-by to drink.

The fountain enjoyed enormous success, but the method of collecting water itself became a source of disease transmission and scientific controversy. In the second half of the nineteenth century, the germ theory was still in its infancy and not yet accepted, so it was widely believed that the mere flow of water over the cup was sufficient to ensure hygiene. Shared ladles and cups were later banned in 1912, replaced by single-use paper cups, metal spouts with vertical jets, and, starting in the 1920s, taps with parabolic jets slanted at a 45-degree angle – the most hygienic and practical public water-dispenser model introduced up to that point.

The first series-produced fountain models were characterised by simplicity and ease of use, qualities that made them efficient and easily reproducible, allowing the establishment of a dense territorial network. The introduction of cast-iron fountains exemplified this: cheaper than bronze and more readily available, it enabled the production of objects in the desired form.

Turin was one of the first European cities to offer a capillary network of cast-iron drinking fountains, known as Toret, iconic green fountains with a parallelepiped body topped by a semicylindrical vault and a small bull's-head spout, derived from the city's heraldic emblem. This model first appeared in 1862 as part of an urban plan intended to ensure widespread access to drinking water. Over time, Toret fountains were gradually installed near markets, green areas, and squares, and today number over 800. A testament to the affection of Turin's residents for these fountains, 'no longer merely elements of urban furniture but identity assets' (Benente, 2011), is the 'I Love Toret' project, a social promotion association founded in 2012 to enhance and protect them through events, social initiatives, merchandise, and an 'adopt-your-Toret' programme, enabling citizens to monitor and report malfunctions, vandalism, or repainting needs.

Examples of high artistic and technological expression are primarily found in monumental fountains. In contrast, small public drinking fountains constitute a species of urban infrastructure in decline, often dismantled or out of order (Fig. 3).

Nevertheless, there are numerous valid reasons to rediscover urban fountains and their role in addressing contemporary challenges. Having more fountains would not only increase overall water consumption, thereby improving physical and psychological well-being, but also, in an era of climate change marked by increasingly frequent heatwaves, make it easier for people to cool off and stay hydrated during the hottest days. Secondly, fountains offer an economic and healthy alternative to the consumption of sugary beverages, which are often more easily available and more enticing than a public device for refilling one's bottle, especially considering that obesity, increasingly widespread in Western countries, is also linked to high consumption of caloric drinks (FEMTEC, 2015).

Moreover, drinking fountains contribute to environmental sustainability. The impact of plastics on the environment is only partly due to bottled water; however, the entire production cycle relies on fossil fuels, contributes to global warming, and generates large amounts of waste (Gleick, 2011). Therefore, it is no longer acceptable to maintain a 'shameless and arrogant throwaway paradigm that treats the planet like a supermarket' (Ercolini, 2024). Tap water remains unbeatable for environmental sustainability, and a city with a well-distributed network of water points directly contributes to reducing single-use plastic.

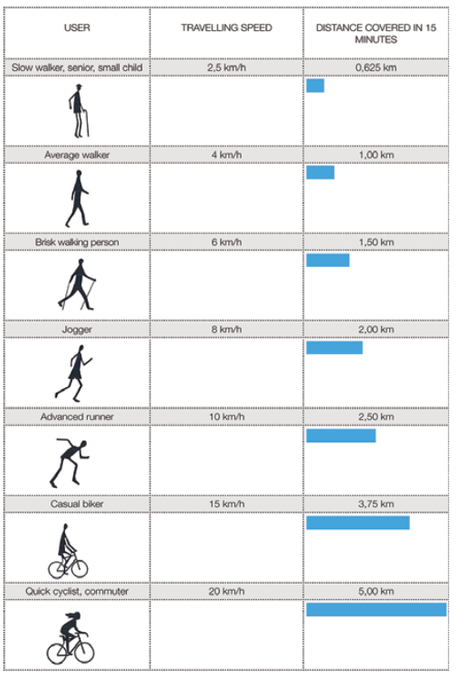
The availability of drinking water in public spaces also indirectly supports community health by facilitating outdoor physical activity, helping people train more effectively, and spend more time outdoors. The relationship between urban features designed to enrich the 'human-scale experience' (Sim, 2019) and the propensity to remain in public space, including for physical exercise, has been demonstrated by numerous studies (Maspoli, 2018; Gianfrate and Longo, 2017; Buffoli et alii, 2017; Koohsari et alii, 2015; Lee et alii, 2005). However, the physical interface of the water point, as well as its relationship with other urban services, has been largely neglected and requires further exploration.

Trends and targets | Today, the design of water points is a highly divisive topic. For example, Vittorio Magnago Lampugnani (2021) laments that no importance has been given to the aesthetic quality of 'water houses', calling them 'a missed opportunity to confer character to the neighbourhoods that host them'. Among other critics is Scott Francisco, founder of the collective Pilot Projects Design and promoter of the 100 Fountains Initiative, who believes that many of today's public drinking devices are banal and unattractive: «They are not sexy. They are not speaking to me in a cultural way» (cit. in Schuler, 2015).

Nonetheless, some particularly relevant and helpful examples of contemporary water points were identified for this research through direct and indirect searches, both online and via the Espacenet patent database. The main criterion for selecting case studies, regardless of whether they were commercially available products or one-off installations, was documented real-world operation in public settings.

The purpose of this state-of-the-art analysis was to address an indirect design problem (Ferraro, 2019): designing a product within an existing range of alternatives, optimising both effectiveness and





resource use. For this reason, the search for technical characteristics was crucial, though challenging, especially in obtaining quantitative data on dimensions, weight, production cost, and the number of installed units. Where available, testimonies of the products' success or failure after actual installation proved particularly valuable. The case studies were grouped into four categories: the water point as an element of urban identity, as an artistic expression, as a mass-produced urban product, and as a technologically advanced device.

The first group includes urban regeneration projects in which the installation or reactivation of public fountains is not the specific aim of the intervention, but rather a design action that encourages the community to reclaim these spaces. This is the case of the intervention in Castel San Pietro in Ticino (Italy) by StudioSer. Seven points of interest, three of which are directly linked to the availability of drinking water, have been identified as possible locations to improve the quality of life in the village and promote intergenerational inclusion, with a particular focus on the elderly. The new structures, poetic and straightforward, strongly material and linked to the context in which they are located, respond to everyday needs: rest and hydration at the church exit (Fig. 4), a meeting point protected from cars that offers the possibility of refreshment, and water supply for watering the flowers in the cemetery (Fig. 5).

The second category includes iconic water features produced in limited quantities or as single pieces, designed to emphasise the symbolic role of the source and intensify the visual, tactile, and emotional experience of those who drink from them. One example is the tapered stone sculpture by Ettore Spalletti from 1986: around the circular basin in which the metal dispenser is fixed, eleven small houses with pitched roofs are arranged to create an idealised miniature square, a striking, timeless paraphrase of public space with the fountain at its centre (Fig. 6).

The third group includes examples of water points that are significant not only for the design of the individual object, but also because they are part of a network specifically designed to increase access to water in public spaces, such as the gray granite 'modelo Cádiz' fountain, explicitly designed for the Spanish city of Cádiz (Fig. 7). The installation of over 60 units doubled the number of operational water points and places Cádiz among the best-served European capitals today, with an estimated ratio of one fountain per thousand inhabitants.

The fourth group of technologically advanced devices includes filtered water dispensers, sometimes with additional options (chilled, sparkling, and, in some cases, even flavoured) and the ability to monitor consumption and system performance in real time, as is the case with the Australian Meetpat water station. It consists of a backlit stele with an opening for filling water bottles and is designed for functional use through a series of optional kits: drinking fountain, dog bowl, and filtration system (Fig. 8).

The case studies collected were then evaluated under five aspects: user experience, interface, water supply, urban integration, construction, and maintenance, for each of which one or more qualitative performance indicators were highlighted (Tab. 1). Despite their extreme variety and diversity, the examples identified are all relevant, although none of them integrate the contemporary fountain into a network of other public health services: the supply of mains water remains an isolated service, without synergies with others. Only Well, a dispenser developed in Hong Kong by Urban Spring, introduces a

Previous page

Fig. 9 | Figure-ground map of Ferrara city Centre, displaying the locations of public drinking fountains: the analysis of fountain distribution reveals that water access thins out in the eastern part of the city (credit: I. Fabbri, 2022).

Fig. 10 | Correlation between different travelling speeds and the distance covered by each user in fifteen minutes, a convenient time lapse for fluid replacement, applicable to several outdoor physical activities and average users (credit: I. Fabbri, 2022).



Street: 43, Viale XXV Aprile
Date of observation: October 5
Observation start time: 9:30
Observation end time: 10:00
Current weather condition: Partially cloudy

PEX SCALING
1: poor
2: fair
3: excellent

NATE SCALING
1: not at all
2: somewhat
3: extremely

NOAL SCALING
1: none
2: some
3: a lot

aspect	rating	scaling	notes
context			
How attractive is the area overall?	1 **2** 3	NATE	
Rate the condition of the landscaping	1 2 **3**	PEX	
Sources of shade	**yes** no		**trees**/buildings/shelters/other:
Rate the appeal of audible sounds in the area	1 2 **3**	PEX	water/**birds**/traffic/construction noise/**voices**/music
Rate the appeal of the smells in the area	1 **2** 3	PEX	smoke/food/air pollution odor/other:
Public facilities in close proximity, at sight distance	1 **2** 3	NOAL	school/gym/community centre/church/**shops**/other
incivilities			
Dog refuse	**1** 2 3	NOAL	
Overflowing trashcan/waste containers	1 **2** 3	NOAL	
Perceived public negligence	**1** 2 3	NOAL	
Any evidence of vandalism (graffiti, litter etc...)	**1** 2 3	NOAL	
drinking fountains			
Visibility from the nearest road	1 **2** 3	PEX	
Operational	**yes** no		always on/button/pedal/ turn hose bibb handle/**tee**
Condition	1 **2** 3	PEX	the water jet is too strong
Downward water jet / Bottle refiller	**yes** no		
Upward water jet / stoop and drink only	yes **no**		
Dog bowl	yes **no**		
Water taste	1 **2** 3	PEX	temperature/filtration
Filtration	yes **no**		
Accessibility to children/people with disabilities	1 2 **3**	PEX	consider water height, spout shape and ground
Paved surface at the base	**yes** no		
Hard path to reach the fountain	**yes** no		
Lighting	yes **no**		Public lighting too far from
Seating availability within 50 metres	**yes** no		
Other urban amenities in close proximity	1 **2** 3	NOAL	**bike racks**/exercise stations/play equipment/ **waste containers**/restrooms/ **bus stop**/ other
Fountain goers during observation, and nature of fountain use	**yes** no		2. Two guys in their 20s, one of whom used the fountin to refill his plastic bottles (a 50-cl single-serve one). Sporty woman, early 40s with a white poodle, looking down for a dog bowl; she takes one of the plastic container from the ground, gives it a wash and fill it for her dog.

Fig. 11 | The drinking fountain assessment tool for field observation in the city centre of Ferrara: examples of one filled form from the extensive on-site inspection (credit: I. Fabbri, 2022).

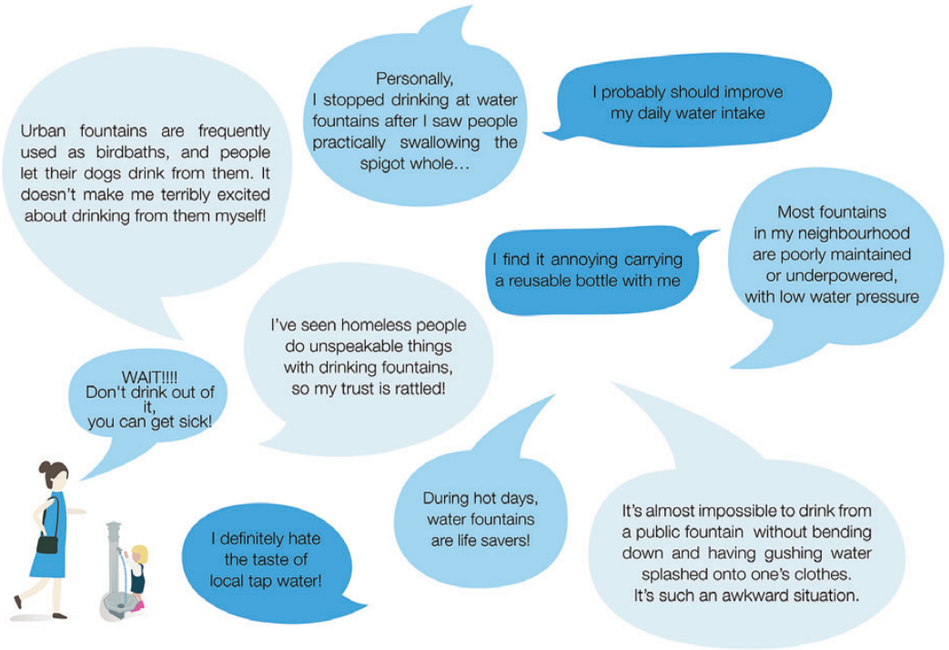


Fig. 12 | A concise overview of the outcomes of the interviews with citizens in a real urban environment (credit: I. Fabbri, 2022).

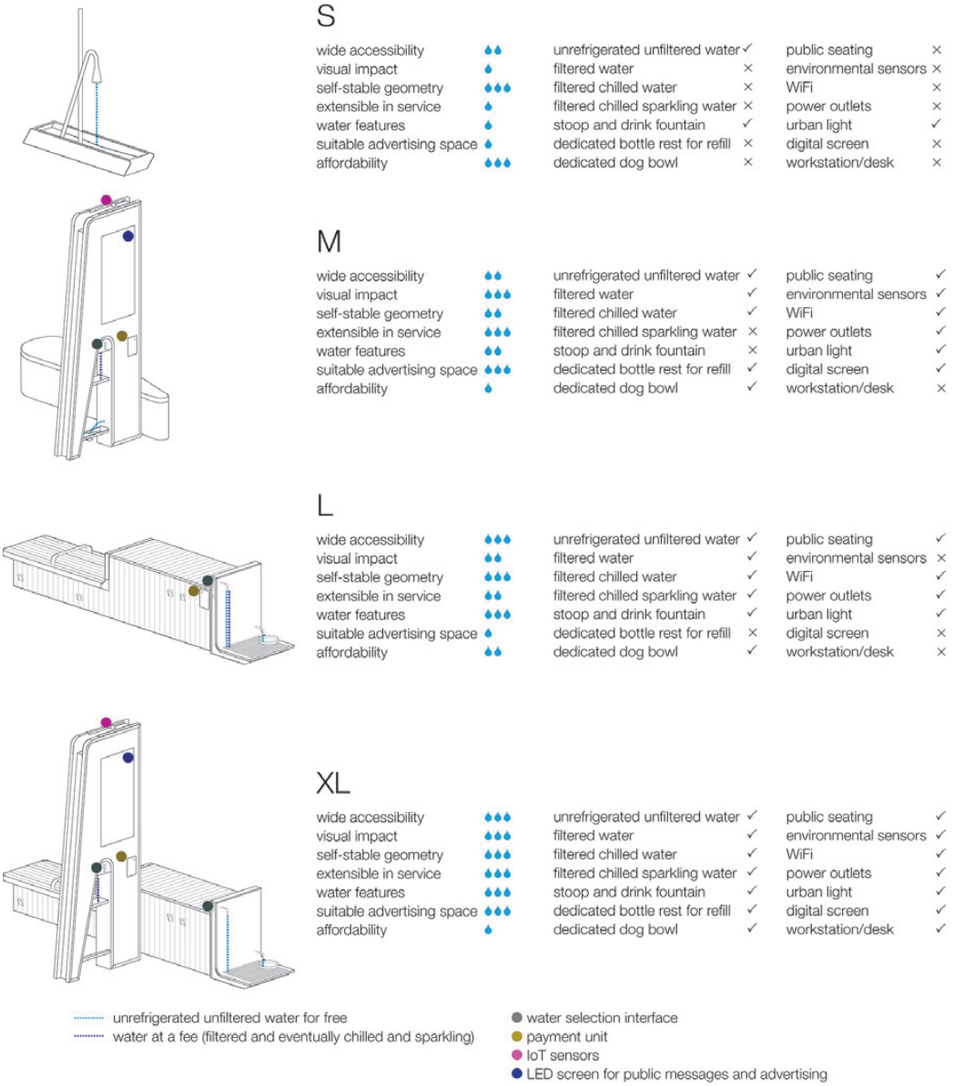


Fig. 13 | Alternative design solutions, in four different sizes and shapes, and increasing level of equipment (credit: I. Fabbri, 2022).

modest reward system for dispenser users, in collaboration with some local merchants, which, however, appears extremely promising for the future evolution of water points.

Uses, prejudices, and standard placement of drinking fountains: field investigation | A preliminary phase for the design of a multifunctional water station aimed to increase direct knowledge of the provision of water supply points in a medium-sized city and to define recurring patterns of their urban positioning and their use or non-use. To this end, a field study was carried out using the Municipality of Ferrara as a case study, a city suitable for an investigation into the distribution of drinking fountains for two reasons: The first is the high percentage of active mobility among residents and commuters, a context that creates greater opportunities for hydration outside the home[2]; the second is the high number of bioclimatic discomfort days recorded in the city[3] by Arpae (2025), implying greater risks of heatstroke and dehydration, as well as potential aggravation of the health conditions of vulnerable individuals. Despite these premises, the local press consulted at the time of the research reported a chronic shortage of urban drinking points.[4]

The field mapping first involved verifying the number of public fountains. The 88 addresses published by the Ecological Office of the Province of Ferrara[5] were compared with the 37 supply points indicated on the collaborative digital map on the 'fontanelle.org' website. Thanks to this cross-checking and data recomposition, the total number of accessible fountains in the Municipality of Ferrara was found to be 82. The reference sample was then narrowed to 49 units within the Historic Centre, plotted on a figure-ground map of the city to visualise their actual distribution across neighbourhoods and identify potential coverage gaps (Fig. 9).

As noted by Ivanov (2015), the optimal distance between fountains can be quantified in terms of the time required to reach them rather than linear metres. Indeed, those who travel by bicycle cover greater distances in shorter times than those who walk or run and thus may require more widely spaced refreshment points. Considering that hydration during physical activity depends on the intensity and duration of effort, as well as environmental conditions and personal factors such as age, gender, or training level, the study adopted the empirical guideline whereby water intake should occur every 15 minutes, with a supply of approximately 200-300 metres per interval, as commonly recommended for athletes.

On this basis, seven user profiles were defined, each characterised by different levels of physical activity, from the slowest walker to the cyclist engaged in intense exercise. Each profile was assigned a corresponding travel speed and, consequently, the estimated distance that could be covered in 15 minutes, taken as a significant time frame for fluid replenishment (Fig. 10). Observing the distribution of fountains in Ferrara's Historic Centre in light of these considerations, it appears that the supply of water points should be strengthened particularly along the eastern side of the city walls, where the presence of elderly people and children on walks is frequent.

Starting from these urban-scale considerations, a field observation of the water points in the Historic Centre of Ferrara was carried out. The investigation comprised three distinct phases: the evaluative inspection of each fountain; unmediated observation



Fig. 14 | PUNTOnet H_2O prototype at Hera Group headquarters in Bologna (credit: F. Mantovani, 2021).



Fig. 15 | PUNTOnet H_2O set up in Ravennate district in Cesena, one of the five pilot neighbourhoods (credit: F. Mantovani, 2023).

of interactions with passers-by; and a series of semi-structured interviews. A simple, easy-to-complete assessment form was specifically developed to enable faster, more organised data collection[6], gathering parameters ranging from the urban characteristics of the installation site to functionality, maintenance status, and the structure's geometry. All fountains were tested, and the number and type of users were recorded (Fig. 11). Finally, a direct dialogue was initiated with passersby, focusing on their drinking water habits outside the home, outdoor physical activity, and general perceptions of public fountains.

Results of the mapping and interviews | The fountains' locations were generally consistent with their surroundings, typically in public parks, children's playgrounds, or bus stops. Only 20% of the water points examined were found within 50 metres of other potentially synergistic services, such as benches and bicycle racks. Conversely, 40% of the water points were not visible from the street or were partially concealed and poorly lit, conditions associated with apparent disuse. The predominant model was a cast-iron column fountain with a basin at the base, inspired by the 'Milanese vedovelle', featuring a brass tap with a cross-shaped handle. Fewer in number were historic drinking fountains, made of brick and/or stone and with continuous-flow systems. No modern bottle-refilling stations were identified.

The water points were generally well-maintained and showed no significant signs of vandalism or neglect, except for one case of weed overgrowth and three instances of damaged pavement at the base, which made access to the service difficult, especially for cyclists, people in wheelchairs, and those with strollers. Of the 40 functioning fountains, nearly all provided a steady flow but were always directed downward; none were equipped with upward spouts or dispensers specifically designed for animals. Temporary plastic containers left on the ground near numerous fountains were found, indicating a strong need felt by people walking their dogs.

The on-site interviews involved students, workers, athletes, parents with children, elderly individuals, and vulnerable persons, randomly selected near the water points. The respondents included both detractors and supporters of the fountains, with a slight prevalence (51%) of regular users.

An important finding was the widespread belief that public drinking fountains do not work; as a result, many citizens prefer to buy bottled drinks or carry their own water bottles, without any expectation of being able to refill them along the way, and put up with thirst when they run out. Over 30% of those interviewed said it was annoying to carry a reusable bottle all day, especially during physical activity. General discomfort in using them, like worrying about splashing yourself when drinking, was seen as a real barrier to using the service. The survey also showed that people do not know how to use the drinking fountains properly.

While 80% reported regularly drinking tap water at home and trusting the quality of the water supply network, both the taste and temperature of the water dispensed by fountains during hotter periods were strongly criticised. A minority reported a genuine sense of brand loyalty toward specific bottled water brands for out-of-home hydration, especially for sparkling water. Finally, both users and non-users of the fountains cited the improper use of water points, particularly for watering animals, as a significant deterrent to their use (Fig. 12).

In general, most respondents perceive public water as safe. At the same time, what discourages the use of fountains is essentially the doubt regarding the hygiene of the dispenser, the discomfort experienced during use, and the general lack of habit in drawing water from public fountains, often because they are actually installed in secluded, non-visible areas and, ultimately, are 'useless, in the sense of being unusable' (Rossi, 2014).

From field research to the design of a health-promoting urban service | The positive convergence between the objectives of the doctoral research and those of the Hera Group, both oriented toward new urban services aligned with the principles of the cir-

cular economy, created the conditions for the prototypical development of a multifunctional system of urban furnishings for the distribution of drinking water. This system aims to renew the image of the public fountain, reduce plastic waste, encourage sustainable behaviours, and integrate distinct urban services. The following presents the results of the preliminary investigation that most significantly influenced the design process.

The first reflection concerns the need to revise the placement and territorial coverage of water points. Drinking fountains, when present, are often installed in unattractive corners of the city, hidden behind waste bins or, worse, near public toilets, contexts that negatively affect the perception of service hygiene. Proper placement, informed by an understanding of neighbourhood aggregation dynamics, is therefore the first step toward making the urban furnishing element more appealing. Transit or gathering areas such as commercial zones, public transport stops, pedestrian and recreational paths, and school courtyards represent potential ideal locations for a contemporary urban water service, while also considering proximity to water and electrical connections[7]. It is also essential to re-establish a sufficiently dense and easily recognisable network of water supply points, understood as parts of an integrated system rather than isolated objects.[8]

With regard to the aesthetic and perceptual aspects of the new drinking water point, attention was given to the standard expectation among citizens of encountering plain, uninviting fountains, often poorly maintained and supplying water of uncertain quality. Ensuring a pleasant experience for those who are thirsty first and foremost means offering water that tastes good and is at an ideal temperature. This fundamental requirement, confirmed by interviewees, led the research team to include, among the design specifications, a functional space for filtration, refrigeration, and, possibly, carbonation.

The team also sought to investigate which physical characteristics of an outdoor product might influence taste perception even without direct contact. A glossy, reflective, semi-transparent, and cavity-free surface was found to be particularly effective in conveying sensations of freshness and cleanliness. These effects were later explored during the prototyping phase through the use of glass, a material that, on the one hand, offers numerous possibilities for customisation and, on the other, provides the safety and durability required for installation in collective outdoor spaces.

In terms of accessibility, field observations revealed the need to draw water in different ways, with or without personal containers, and even using one hand, to ensure greater convenience for all users, from those carrying shopping bags to those with limited mobility or balance difficulties. The interviews also revealed that the use of water points by animals elicits strongly divided reactions. It is interesting to note how, in the historical evolution of public fountains, 'companion species' (Haraway, 2023) have exercised significant agency, helping to expand the anthropocentric domain[9] (Casiddu, Burlando and Chen, 2024). The design of a contemporary water-dispensing device must therefore face the challenge of accommodating non-human users without compromising the product's hygiene and accessibility requirements.

Finally, the field research highlights the importance of increasing awareness and a sense of responsibility toward public water, whose perceived value may be distorted by its easy availability and low cost, far below the European average. An innovative water point can contribute to this goal by becoming, in itself, a means of communicating the quality of the water resource: instilling trust and respect toward it can indirectly foster a sense of pride in local sources, as well as greater commitment to reducing personal waste and attributing higher value to fountains, which would consequently be better cared for.

Regarding this last point, much discussion has taken place about why the 'city of services', where inhabitants are viewed merely as potential users, is essentially a city that lacks care for people, places, and the environment (Sennet, 2018; Moreno, 2024). Within this scientific debate, Ezio Manzini (2021) suggests that to regenerate a city capable of care, it is necessary to develop new communities through a new generation of collaborative services distributed throughout the territory, which can stimulate civic engagement. The challenge is to create a new kind of local community centred on environmental sustainability, built around a physical interface. This urban object is relational and dialogical, integrating the social and ecological dimensions.

The mapping and interviews conducted in the Municipality of Ferrara, as well as the typological comparison of existing products, contributed significantly to defining the objectives, standards, needs, requirements, and performance criteria of a new water point. Several alternative design proposals, each with increasing levels of complexity, were developed in multiple phases and then compared against various criteria (Fig. 13). This process enabled selection of the preferred solution, which was progressively refined through an iterative, interdisciplinary approach. At this stage, the expertise of design, structural and environmental engineering, microbiology, and computer science converged.

The outcome of this process is a multifunctional urban object, PUNTOnet H_2O, that aims to encourage hydration outside the home and create more opportunities for outdoor encounters, work, and relaxation. It is therefore very different, in functional, aesthetic-perceptual, and user-target terms, from the traditional 'water house', which is typically monofunctional and used primarily for the mass refilling of containers intended for domestic storage.

PUNTOnet H_2O is a safe source of drinking water, offering a choice between still water at room temperature, chilled still water, or chilled sparkling water. It is also equipped with a small bowl and a dedicated dispenser for pets out on walks. However, PUNTOnet H_2O is much more than a drinking fountain: it is at once a spacious public seat and a rest and support point for reading or working outdoors, allowing the recharging of electronic devices such as tablets, smartphones, electric bicycles, and scooters for people with disabilities. It also serves as a neighbourhood-scale health monitor, capable of collecting data on air quality, noise pollution, and microclimate, and of monitoring the surrounding space to create a safer, more informed community.

Finally, PUNTOnet H_2O functions as an urban lantern, thanks to the backlighting of its outer shell. As an advertising column, it can promote healthier lifestyles, communicate real-time environmental data, including water quality information, and publicise local initiatives. The collaboration among diverse technical and scientific disciplines and industrial sectors, from light metalwork to water filtration, from glass processing to IoT and Augmented Reality, made possible the actual prototyping and subsequent demonstration of the system in real operational settings. The Hera Group fully funded the production, technological equipment, and installation of the prototypes.

Conclusions and future developments | The provision of water in public spaces is one component of broader water resource management, underscoring the urgency of adopting a new ecological approach and promoting a more conscious, informed, and sustainable use of this resource.

This paper highlights, on the one hand, the public health benefits of rethinking the basic drinking fountain, and, on the other, outlines the methodology that led to the design of one possible solution to enhance the attractiveness of urban spaces and the well-being of their users. It fits within the iterative design process that has always characterised the evolution of water points in cities.

The preliminary phase of on-site data collection required the adoption of an objective procedure, which was materialised in the creation of an assessment document for existing fountains (which can be adapted to evaluate other urban services). It also demanded an empathetic effort, through direct dialogue with passers-by and the patient observation of people's spontaneous and everyday relationship with public spaces and their objects: a phase with an 'anthropological vocation', focused not only on objects but above all on behaviours, 'not on the absolute religion of function, but on relative potentialities' (Vinti, 2019).

Following a first demonstrator project, monitored for one year in a controlled-access urban context, an outdoor covered area within the Hera Group's headquarters in Bologna (Fig. 14), PUNTOnet H_2O is currently being tested in five pilot neighbourhoods of the City of Cesena. This represents the first real-world experimentation of a system of contemporary water points that integrate multiple services and enable synergistic activities in proximity, such as hydrating and taking an outdoor break (Fig. 15).

Verification of the fulfilment of PUNTOnet H_2O's technical and functional requirements, as well as its acceptability among citizens, was carried out through an initial phase of mediated and unmediated field observation at the start of the neighbourhood trials (early 2023), along with the administration of a scientific survey distributed to residents via a QR code applied to the totem structure. The systematisation of monitoring results will enable validation of the proposed solution's effectiveness in real-world use and guide future developments to optimise the urban furniture element, implement it in other pilot areas, and develop new configurations.

This experimentation provides an opportunity to innovate local services by densifying small, highly functional, connected nodes (Gianfrate and Longo, 2017), making them more convenient, versatile, and efficient as they operate under incentive-based logics. A system of urban interfaces of this kind can help overcome the stigma associated with using public water points and initiate a proactive educational process that, in the long term, leads people to transform their consumption habits and adopt a more responsible use of water resources.

Acknowledgements

This paper summarises part of the research conducted by the Author as part of the IDAUP International PhD Program at the University of Ferrara; Supervisors Prof. G. Lelli (University of Ferrara) and Prof. L. Kumaraku (POLIS University); External expert: S. Capolongo (Politecnico di Milano). The design of a multifunctional station for the supply of water and other services to the community led to the filing of an industrial invention patent and two design patents (Inventors: S. Allegra, R. Bandini, D. Cupioli, I. Fabbri, F. Lazzarini, G. Lelli, and E. Piraccini). The costs of manufacturing and installing the six prototypes built to date (one for the City of Bologna and five for the City of Cesena) were borne entirely by the Hera Group.

Notes

1) During the 1854 cholera epidemic in London, the perception of the link between drinking water and public health changed radically: the physician John Snow realised that deaths caused by the disease were significantly higher around the Broad Street Pump, and deduced that the water drawn from that specific supply point was the actual cause of the contagion, not the supposed harmful vapours in the air, thus contradicting the prevailing miasma theory.

2) One in four trips made by residents of Ferrara to school or work takes place by bicycle. At the same time, 10% of citizens travel on foot, according to the latest data published by the Comune di Ferrara (2024) on the occasion of World Bicycle Day.

3) Bioclimatic discomfort refers to the adverse effects experienced by the human body due to a combination of high temperatures and high humidity levels; these conditions are often associated with high minimum temperatures, intense solar radiation, and poor ventilation. The number of days of bioclimatic discomfort recorded by ARPAE in 2024 was 58, the highest in the Emilia Romagna Region (ARPAE, 2025).

4) Local press, articles, posts, and social media comments by citizens highlight not only the shortage of drinking fountains in Ferrara but also their poor visibility, which discourages their use (Rossi, 2014).

5) For more information, see the webpage: marraiafura.com/wp-content/uploads/2009/10/pdf/5_guida-ecoidea_gratis-a-ferrara-stampa.pdf [Accessed 25 September 2025].

6)The direct observation instrument to measure drinking fountains' features has been crafted by the Author based on the three most frequently used audit tool to assess outdoor facilities and amenities: the Physical Activity Resource Assessment (PARA; Lee et alii, 2005), the Environmental Assessment for Public Recreation Space (EAPRS; Saelens et alii, 2006), and the Bedimo-Rung Assessment Tool-Direct Observation (BRAT-DO; Bedimo-Rung et alii, 2006).

7) The installation guidelines for water points in the city were indeed adopted in the subsequent phase of the research, which concerned the urban placement of a prototype multifunctional water station in five pilot neighbourhoods of the City of Cesena.

8) The sixth call to action of London's Child Obesity Taskforce (2019) links, for example, the availability of water sources in public spaces to urban distances, recommending that citizens should have free access to fresh drinking water every 100 metres when they are on main streets, in civic spaces, and in public buildings. The indicated 100-metre radius includes both public fountains and tap water available in bars, shops, and commercial establishments. Other European initiatives suggest a ratio of public fountains per inhabitant, such as Aguas de Cádiz (2021), a city project aiming to achieve one water access point for every 1,000 inhabitants, which is considered the most desirable target.

9) Already in the Victorian era, the London-based Drinking Fountain Association came to the aid of hundreds of thousands of working animals, horses, oxen, and dogs, also in need of refreshment, and in 1867, the group's name was changed to the Metropolitan Drinking Fountain and Cattle Trough Association to acknowledge this component of its broader mission officially. Since then, many cities in Europe and the United States have seen the proliferation of multi-species fountains, often inscribed 'For Man and Beast', that have quenched the thirst of people, horses, dogs, cats, and birds.

References

Aguas de Cádiz (2021), *Fuentes Públicas de agua potable – Elementos para el Derecho Humano al Agua y su accesibilidad*. [Online] Available at: aguasdecadiz.es/wp-content/uploads/2021/10/Libro_FPAP_web.pdf [Accessed 25 September 2025].

ARPAE – Agenzia Prevenzione Ambiente Energia (2025), *Rapporto IdroMeteoClima Emilia-Romagna – Dati 2024*. [Online] Available at: arpae.it/it/notizie/tempo-e-clima-in-emilia-romagna-1 [Accessed 10 September 2025].

Bedimo-Rung, A. L., Gustat, J., Tompkins, B. J., Rice, J. and Thomson, J. (2006), "Development of a direct observation instrument to measure environmental characteristics of parks for physical activity", in *Journal of Physical Activity and Health*, vol. 3, issue 1, pp. 176-189. [Online] Available at: doi.org/10.1123/jpah.3.s1.s176 [Accessed 25 September 2025].

Benente, M. (2011), "Toret – Fontanelle pubbliche a Torino – Da patrimonio diffuso a carattere identitario della città", in Pretelli, M., Ugolini, A., Lazzarini, G., Pistocchi, E., Serrau, A. and Signorelli, L. (eds), *Le fontane storiche – Eredità di un passato recente – Restauro, valorizzazione e gestione di un patrimonio complesso*, Alinea, Firenze, pp. 278-285.

Buffoli, M., Capolongo, S., Oberti, I., Plantamura, F. and Rebecchi, A. (2017), "Requisiti e schede tecniche per la realizzazione Green Urban Spaces efficienti", in Capolongo, S. and D'Alessandro, D. (eds), *Città in salute – Strategie per la tutela e la promozione della salute nei contesti urbani*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, pp. 120-142.

Casiddu, N., Burlando, F. and Chen, B. (2024), "Human-decentred Design – Verso una (nuova) era della sofferenza | Human-de-centred Design – Towards a (new) era of suffering", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 242-249. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16212024 [Accessed 18 September 2025].

Comune di Ferrara (2024), "Oggi è la giornata mondiale della bicicletta – Ferrara, capitale della bici – La città in numeri", in *Cronaca Comune | Quotidiano online del Comune di Ferrara*, newspaper online, 03/06/2024. [Online] Available at: cronacacomune.it/notizie/52776/oggi-e-la-giornata-mondiale-della-bicicletta-ferrara-capitale-della-bici-la-citta-numeri.html [Accessed 19 September 2025].

D'Angelis, E. and Grassi, M. (2024), *La nuova civiltà dell'Acqua – Il Piano Nazionale per la Sicurezza Idrica e Idrogeologica e l'adattamento al cambiamento climatico*, Polistampa, Firenze.

Decreto Legislativo 19 giugno 2025, n. 102 – *Disposizioni integrative e correttive del decreto legislativo 23 febbraio 2023, n. 18, di attuazione della direttiva (UE) 2020/2184 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2020, concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano*. [Online] Available at: gazzettaufficiale.it/eli/id/2025/07/04/25G00106/SG [Accessed 25 September 2025].

Ercolini, R. (2024), *Noi siamo oceano – Manifesto per un'ecologia del cambiamento*, Baldini+Castoldi, Milano.

FEMTEC (2015), *Water and health – How water protects and improves health overall*. [Online] Available at: femtecon line.org/Water-Health/Consensus_Paper_en.pdf [Accessed 19 September 2025].

Ferraro, L. (2019), *Design for Quality – Metodi di Pugh e QBench a confronto | Design for Quality – A comparison between Pugh and QBench methods*, Thesis, Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale, Politecnico di Torino (Italy), Relatore Prof. Franceschini, F. [Online] Available at: webthesis.biblio.polito.it/10578/ [Accessed 25 September 2025].

Gianfrate, V. and Longo, D. (2017), *Urban micro-design – Tecnologie integrate, adattabilità e qualità degli spazi pubblici*, FrancoAngeli, Milano.

Gleick, P. H. (2011), *Bottled and Sold – The Story Behind Our Obsession with Bottled Water*, Island Press, Washington.

Haraway, D. J. (2023), *Manifesto delle specie compagne – Cani, persone e altri partner*, Contrasto, Milano.

Ivanov, J. (2015), *Drinking fountains – The past and future of free public water in the United States*, Thesis, Massachusetts Institute of Technology (Massachusetts), Advisor Whiston Spirn, A. [Online] Available at: hdl.handle.net/1721.1/99098 [Accessed 24 September 2025].

Koohsari, M. J., Mavoa, S., Villanueva, K., Sugiyama, T., Badland, H., Kaczynski, A. T., Owen, N. and Giles-Corti, B. (2015), "Public open space, physical activity, urban design and public health – Concepts, methods and research agenda", in *Health and place*, vol. 33, pp. 75-82. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.healthplace.2015.02.009 [Accessed 25 September 2025].

Lee, R. E., Booth, K. M., Reese-Smith, J. Y., Regan, G. and Howard, H. H. (2005), "The physical activity resource assessment (PARA) instrument – Evaluating features, amenities, and incivilities of physical activity resources in urban neighborhoods", in *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, vol. 2, article 13, pp. 1-9. [Online] Available at: doi.org/10.1186/1479-5868-2-13 [Accessed 25 September 2025].

London's Child Obesity Taskforce (2019), *Every Child a Healthy Weight – Ten ambitions for London*. [Online] Available at: london.gov.uk/sites/default/files/every_child_a_healthy_weight.pdf [Accessed 26 September 2025].

Magnago Lampugnani, V. (2021), *Frammenti Urbani – I piccoli oggetti che raccontano le città*, Bollati Boringhieri, Torino.

Manzini, E. (2021), *Abitare la prossimità – Idee per la città dei 15 minuti*, Egea, Milano.

Maspoli, R. (2018), "Inclusione sociale, benessere psicofisico e qualità dello spazio pubblico attrezzato", in Angelucci, F. (ed.), *Smartness e healthiness per la transizione verso la resilienza – Orizzonti di ricerca interdisciplinare sulla città e il territorio*, FrancoAngeli, Milano, pp. 77-94.

Mattern, S. (2023), "Fountain Society", in *Places Journal*, 02/2023. [Online] Available at: doi.org/10.22269/230214 [Accessed 25 September 2025].

Moreno, C. (2024), *La città dei 15 minuti – Per una cultura urbana democratica*, add editore, Torino.

Phurisamban, R. and Gleick, P. (2017), *Drinking Fountains and Public Health – Improving National Water Infrastructure to Rebuild Trust and Ensure Access*, Pacific Institute, Oakland. [Online] Available at: pacinst.org/wp-content/uploads/2017/02/Drinking_Fountains_and_Public_Health_Feb_2017-1.pdf [Accessed 25 September 2025].

Rossi, A. (2014), "Fontanelle, ovvero quel che manca a Ferrara – Il discreto fascino dell'acqua sotto il sole d'agosto", in *Listone Magazine*, newspaper online, 22/08/2014. [Online] Available at: listonemag.it/2014/08/22/fontanelle-ovvero-quel-che-manca-a-ferrara/ [Accessed 26 September 2025].

Saelens, B. E., Frank, L. D., Auffrey, C., Whitaker, R. C., Burdette, H. L. and Colabianchi, N. (2006), "Measuring physical environments of parks and playgrounds – EAPRS instrument development and inter-rater reliability", in *Journal of Physical Activity and Health*, vol. 3, issue 1, pp.190-207. [Online] Available at: doi.org/10.1123/jpah.3.s1.s190 [Accessed 25 September 2025].

Salzman, J. (2012), *Drinking Water – A History*, Overlook Duckworth, New York.

Schuler, T. A. (2015), "Public Space has a Drinking Problem – As drinking fountains fade from view, a call to make them iconic again", in *Landscape Architecture Magazine | The Magazine of the American Society of Landscape Architects*, newspaper online, 10/11/2015. [Online] Available at: landscapearchitecturemagazine.org/2015/11/10/public-space-has-a-drinking-problem/ [Accessed 25 September 2025].

Sennet, R. (2018), *Costruire e abitare – Etica per la città*, Feltrinelli, Milano.

Sim, D. (2019), *Soft City – Building Density for Everyday Life*, Island Press, Washington (DC).

The European House – Ambrosetti (2025), *Libro Bianco 2025 – Valore Acqua per l'Italia*. [Online] Available at: giornatamondialeacqua.ambrosetti.eu/wp-content/uploads/2025/03/ValoreAcqua2025_Report_ITA-DIGITALE.pdf [Accessed 12 October 2025].

Vinti, C. (2019), "Il design come campo di indagine – Le ricerche e la scrittura di Ugo La Pietra", in La Pietra, U., *Argomenti per un dizionario del design*, Quodlibet, Macerata, pp. 11-27.

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 384-397
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18242025

Article Info

Received	10 September 2025
Revised	18 October 2025
Accepted	20 October 2025
Published	30 December 2025

DISCOIL E DURABILITÀ
Redesign di un sistema per ridurre l'inquinamento idrico da idrocarburi

DISCOIL AND DURABILITY
Redesign of a system to reduce water pollution by hydrocarbons

Laura Badalucco, Rosa Chiesa, Giorgio Gaino, Elisa Marchetto, Chiara Silvestri

Abstract

Il contributo presenta gli esiti di un'attività di ricerca applicata, finanziata tramite un bando competitivo e svolta nel 2022-23, per la riprogettazione di un sistema a basso impatto ambientale utilizzato per il recupero di oli e idrocarburi. Il Gruppo di Ricerca ha lavorato sull'analisi, valutazione e riprogettazione in ottica di economia circolare del disoleatore Discoil, macchinario per la separazione degli idrocarburi dall'acqua in impianti industriali o in acque libere, senza utilizzo di sostanze chimiche o di materiali assorbenti. Il risultato offre un caso concreto di applicazione delle strategie di sostenibilità e circolarità nella progettazione di prodotti industriali di particolare complessità, direttamente connessi alla riduzione degli impatti ambientali, e indicazioni metodologiche per la replicabilità del processo.

This paper presents the results of applied research, funded through a competitive call for proposals and carried out in 2022-23, for the redesign of a low environmental impact system for the recovery of oils and hydrocarbons. The Research Group worked on the analysis, evaluation, and redesign of the Discoil oil separator from a circular economy perspective, a machine which separates hydrocarbons from water in industrial plants or open waters without the use of chemicals or absorbent materials. The result provides a concrete example of applying sustainability and circularity strategies in the design of complex industrial products, directly targeting reductions in environmental impacts and offering methodological guidelines for replicating the process.

Keywords

acqua, circolarità delle risorse, ecodesign, sostenibilità, inquinamento da idrocarburi

water, circularity of resources, eco-design, sustainability, oil pollution

Laura Badalucco is a Full Professor in Design at the Department of Design Cultures, 'Iuav' University of Venice (Italy). She carries out research activities mainly in Ecodesign, Design for the Circular Economy, and Packaging Design. E-mail: laurabada@iuav.it

Giorgio Gaino is an Architect, Designer and Adjunct Professor at the 'Iuav' University of Venice (Italy). He carries out industrial design projects across the automotive, nautical, medical, and product sectors. E-mail: giorgio.gaino@synthesisdesign.it

Elisa Marchetto, graduate in Economics, Markets and Management, is a Sales and Marketing Manager at OCS SpA (Officine Costruzioni Speciali) in Albignasego (PD, Italy). She works on commercial and marketing activities related to Discoil. E-mail: elisa.marchetto@ocs.it

Rosa Chiesa, Architect and PhD in Design Sciences, is an Associate Professor in Design at the 'Iuav' University of Venice (Italy). Her research is mainly focused on the History of Design, glass and photography in relation to archives. E-mail: rchiesa@iuav.it

Chiara Silvestri, Designer, focuses on industrial design, with particular attention to product and process innovation. In partnership with the Synthesis Design studio (Italy), she designed projects that have won national and international awards, including Good Design Awards, an Honourable Mention at the Compasso d'Oro, the Gran Design Etico award, and the Well Tech Awards. E-mail: chiara.silvestri@synthesisdesign.it



All'interno dell'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile n. 6 delle Nazioni Unite (UN, 2015), finalizzato a garantire la disponibilità e la gestione sostenibile dell'acqua e delle strutture igienico-sanitarie a livello globale, il target 6.3 si occupa specificatamente della riduzione dell'inquinamento idrico con l'intenzione di eliminare entro il 2030 le pratiche di scarico non controllato e di dimezzare la percentuale di acque reflue non trattate, aumentandone il riciclo e il riutilizzo (UNEP, 2009). Questo target nasce dalla considerazione che più dell'80% delle acque di scarico prodotte da attività umane (domestiche e industriali) nel mondo è riversato in fiumi o mari senza sistemi di depurazione (UN Water, 2023). Tra le acque di scarico quelle provenienti da impianti industriali sono di particolare impatto sull'ambiente in quanto contengono residui di lavorazione come metalli pesanti, oli e solventi e, secondo il monitoraggio dell'indicatore 6.3.1 delle Nazioni Unite, solo il 27% viene trattato in modo sicuro a livello globale (UN-Habitat and WHO, 2024).

In tale contesto il presente contributo intende focalizzare l'attenzione sulla riduzione dell'inquinamento da idrocarburi nelle acque industriali o libere e sulle possibilità di recupero, riciclo e riutilizzo di oli e idrocarburi grazie a tecnologie di trattamento delle acque a basso impatto ambientale. A tal fine vengono qui presentati gli esiti della ricerca 'L1 – Discoil – Processi di valorizzazione, attualizzazione e comunicazione di sistemi a basso impatto ambientale per il recupero di oli e idrocarburi' finanziata da un bando competitivo della Regione Veneto (DGR n. 497 del 20/04/2021) e svolta tra il 2022 e il 2023; il Gruppo di Ricerca è formato da Docenti di Design dell'Università 'Iuav' di Venezia, da designer professionisti e dall'azienda OCS – Officine Costruzioni Speciali SpA di Albignasego (PD).

Le acque inquinate da oli e idrocarburi vengono oggi abitualmente trattate con l'applicazione di metodi meccanici e chimici (Adetunji and Olaniran, 2021; Varjani et alii, 2020). Tra i principali metodi meccanici si annoverano da un lato macchinari costituiti da elementi composti di materiali assorbenti, dall'altro sistemi compatti a dischi (skimmer) che, montati in una configurazione perpendicolare al piano del liquido in cui vengono inseriti, sfruttano la viscosità del petrolio per separarlo meccanicamente dall'acqua. La criticità nell'applicazione dei metodi meccanici risiede nel rischio, durante il trattamento, di emulsionare acqua e olio, operazione da evitare ai fini del riciclo e dell'eventuale riutilizzo dei materiali. I metodi chimici prevedono invece l'utilizzo di additivi che sono in grado di dar luogo alla frammentazione del film di idrocarburo e in questo caso la criticità riguarda strettamente l'impatto ambientale prodotto dall'utilizzo di soluzioni chimiche.

Sebbene tra i sistemi in corso di studio si segnalino quelli di biorisanamento tramite batteri – soluzioni ancora in discussione – in particolare per gli sversamenti consistenti o in acque libere, la ricerca ha focalizzato la propria attenzione su una soluzione di particolare valore dal punto di vista della preferibilità ambientale: uno skimmer oleodinamico a dischi denominato Discoil che è stato proposto come caso d'interesse in fase di scrittura e presentazione del progetto di ricerca.

Nel 1970 l'ingegnere Giancarlo Ravagnan, fondatore dell'azienda OCS di Albignasego (PD), inventa e produce un disoleatore compatto a basso impatto ambientale (Figg. 1, 2), un macchinario adatto a risolvere il problema della separazione dell'acqua dagli idrocarburi in impianti industriali o in caso di sversamento in acque libere, senza ricorrere a sostanze chimiche o a materiali assorbenti. Il Discoil utilizza un sistema idraulico a dischi in acciaio inossidabile, appositamente progettati per recuperare efficacemente tutto l'olio presente su una superficie d'acqua, senza creare emulsioni: il 98% di olio con solo il 2% di acqua (Figg. 3, 4): ciò permette alle sostanze prelevate di essere facilmente e velocemente reimmesse nel ciclo produttivo o riutilizzate in altro modo.

L'applicazione più frequente del Discoil è la separazione e il recupero degli idrocarburi (benzina, gasolio, oli combustibili, oli lubrificanti, petrolio greggio, ecc.) e delle sostanze grasse in genere (grassi animali e vegetali) dall'acqua in impianti (Fig. 5). Il principio di funzionamento si basa sull'adesione dell'olio alle superfici di dischi che, realizzati in acciaio inossidabile opportunamente trattato, sono disposti perpendicolarmente e parzialmente immersi nell'acqua da trattare, mentre sono mantenuti in rotazione sul proprio asse orizzontale; grazie a questa adesione e coesione vengono recuperati i prodotti oleosi allo stato naturale a notevole distanza dalla macchina, anche nelle zone classificate (zone Atex nelle quali può formarsi un'atmosfera esplosiva). Oltre all'utilizzo in impianti industriali e raffinerie, nel corso degli anni Discoil è stato utilizzato in caso di sversamenti di idrocarburi in mare (Figg. 6, 7): ha operato in numerosi oil spill, tra cui quelli di Haven nel 1992, Agip-Abruzzo, Moby Prince nel 1991 e in occasione di una collisione tra due navi nei pressi della Corsica nel 2018.

La sua funzione e le sue specificità lo caratterizzano, fin dalla sua prima produzione, come un prodotto naturalmente attento agli aspetti della sostenibilità. Ciò ha spinto a selezionare Discoil come caso di interesse per la ricerca e per la riprogettazione in ottica rigenerativa. Il progetto di ricerca si è interrogato su come sia possibile adeguare il prodotto e la sua progettazione alle specifiche di sostenibilità ambientale e, ancor più, alle istanze dell'economia circolare e alle richieste delle più recenti normative europee in tema di produzioni industriali in modo da rendere prodotto e funzione totalmente coerenti. È emerso che Discoil, prodotto dall'indubbia qualità ideata a suo tempo dall'azienda, ben si sarebbe prestato a una revisione nell'ottica di un'ottimizzazione produttiva, di utilizzo e gestione a lungo termine.

La sperimentazione applicativa ha utilizzato alcune strategie di Ecodesign e di Design per l'Economia Circolare che hanno permesso di accrescere i livelli di rigenerabilità del macchinario secondo le logiche di durabilità, manutenibilità, aggiornamento, personalizzazione e flessibilità d'uso. Il valore del progetto di ricerca e della sua concretizzazione in azioni reali, come nel caso del nuovo Discoil qui presentato, risiede da un lato nella dimostrazione di efficacia dell'applicazione delle strategie circolari al servizio della progettualità, dall'altro nella rappresentazione di progressiva consapevolezza culturale su cui si fonda inevitabilmente la transizione dall'economia lineare a quella circolare (UNDP, 2016; European Commission, 2020).

Alla luce di queste premesse il presente contributo ha l'obiettivo di presentare gli esiti della citata attività di ricerca applicata, finanziata da bando competitivo e svolta nel 2022-23, per la riprogettazione in ottica di circolarità di un sistema a basso impatto ambientale utilizzato per il recupero di oli e idrocarburi. Dopo un'ampia discussione relativa a definizioni e differenze tra Ecodesign, Design Sostenibile e Circular Design, il contributo descrive il metodo e le fasi della ricerca e infine il caso applicativo.

Sostenibilità e circolarità nel progetto | Le tematiche affrontate dalla ricerca si inseriscono nel più recente dibattito sul ruolo del Design nella transizione ecologica e sulle competenze strategiche di figure come il Circular Designer[1] (Bakker et alii, 2014; Ceschin and Gaziulusoy, 2016; Franconi et alii, 2021) e il Transitional Industrial Designer (Zannoni et alii, 2024).

Secondo la più recente definizione presente nell'Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) per Ecodesign o 'progettazione ecocompatibile' s'intende il processo di integrazione di aspetti connessi alla sostenibilità ambientale nelle caratteristiche dei prodotti e nei processi che si svolgono nell'intera catena del valore del prodotto (European Commission, 2024). Tale integrazione deve portare alla definizione di specifiche di progettazione ecocompatibile, ovvero a una serie di prescrizioni che rendano il prodotto ambientalmente preferibile rispetto ai prodotti con identiche funzioni e prestazioni. Obiettivo di questo approccio progettuale è la riduzione degli impatti ambientali, ovvero delle modifiche dell'ambiente derivanti anche parzialmente dal prodotto, tenendo conto di quanto avviene in tutte le fasi del suo ciclo vita, dalla progettazione alla gestione della fine della sua prima vita utile e all'avvio alle sue nuove vite.

Il Regolamento sopracitato pone al centro il ruolo del Design e la sua potenziale capacità di intervenire a monte del problema. Nel Circular Economy Action Plan del 2020 la Commissione Europea sottolineava, infatti, che fino all'80% dell'impatto ambientale dei prodotti è presente nella fase di progettazione (European Commission – Directorate-General for Communication, 2020). Già anni prima, nella Direttiva per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti connessi all'energia (European Commission, 2009), la stessa Commissione aveva indicato uno degli elementi chiave per l'attivazione di un'economia circolare applicata al design dei prodotti: se progettati correttamente, i prodotti possono durare più a lungo o essere più facili da riparare, rimettere a nuovo o rigenerare; in questo modo si facilitano anche le operazioni di riciclo e le imprese di riciclo possono recuperare materie e componenti di valore.

Risulta dunque evidente come i temi della sostenibilità ambientale e dell'Ecodesign, oggetto di riflessione da ormai diversi decenni, come pure del 'metabolismo ciclico' delle risorse (EMF, 2015) – centrale nel modello dell'economia circolare – siano imprescindibili nella cultura del progetto sebbene spesso permanga confusione sul significato dei vari termini. Per fare chiarezza è opportuno mettere a confronto i termini che sono maggiormente utilizzati quando si parla di rapporto tra prodotti e sostenibilità; l'ambito dell'Ecodesign si intreccia infatti con le tematiche del Design Sostenibile e del Design per l'Economia Circolare.

Provando a sintetizzare un argomento molto complesso nell'ottica di evidenziarne le sfumature, si può affermare che mentre nell'ambito della sostenibilità il progetto si occupa congiuntamente di ridurre gli impatti e aumentare le qualità nelle tre dimensioni ambientale, economica e sociale (Vezzoli and Manzini, 2010), l'Ecodesign si concentra in particolare sulla riduzione dell'impatto ambientale del-



Fig. 1 | The Discoil in its current L10 configuration (with ten blades), manufactured at OCS (credit: M. Battaglia, 2024).



Fig. 2 | The disc structure of the current Discoil oil separator (credit: E. Marchetto, 2018).

Next page

Figg. 3, 4 | The Discoil oil separator in the current configuration (with six blades) operating in a plant and in the compact M2 version (credits: OCS, 2002, 1997).

la produzione e dell'esaurimento delle risorse naturali durante tutto il ciclo vita del prodotto, o meglio, i suoi possibili cicli vita, al plurale (Braungart and McDonough, 2002; Bhamra and Hernandez, 2021).

Il Design per l'Economia Circolare introduce un nuovo punto di vista: consiste, in questo caso, nel prolungare la vita dei prodotti, così da poterli utilizzare il più a lungo possibile. L'obiettivo è creare un ciclo chiuso nel quale tutto può essere condiviso, rigenerato, riparato, riutilizzato e solo alla fine, come ultima soluzione, riciclato. Il raggiungimento di questo obiettivo è subordinato all'assunzione di modelli di business innovativi che privilegino l'utilizzo e il servizio al possesso dei beni (Stahel, 2010; Earley, 2017). Si passa dalla mera valutazione dell'impatto del ciclo vita dei prodotti, attuabile attraverso analisi come la LCA, all'efficienza nell'uso delle risorse nel tempo (EMF, 2013; Bompan and Brambilla, 2021).

Nell'ottica del passaggio dall'Ecodesign al Circular Design i casi di transizione verso un'economia veramente circolare richiedono il superamento della logica di ottimizzazione e riduzione – caratteristica dei processi di sostenibilità ambientale – a favore di un chiaro cambiamento nei modelli di consumo e produzione che privilegino i processi rigenerativi (EMF, 2013; Rau and Oberhuber, 2019). È possibile attuare questo passaggio solo fornendo ai progettisti nuove approfondite conoscenze e attenzioni da considerare ogni qualvolta si occupano di pensare e disegnare nuovi prodotti, nell'ambito di una radicale variazione di carattere sistemico nelle logiche di gestione dei bisogni.

Il Design per l'Economia Circolare si basa quindi non sulla riduzione degli impatti, ma sul 'principio di inerzia' di Walter Stahel (2010), secondo il quale un prodotto deve rimanere in vita il più a lungo possibile al fine di sganciare il suo valore economico dal consumo di risorse, di mantenerne la 'performance' e





di minimizzarne i costi ambientali. Inoltre l'Economia Circolare non ha come fulcro la gestione dei rifiuti e la rielaborazione dei materiali tramite il riciclo (attività comunque necessaria e prevista purché non indirizzata al downcycling della materia), ma si attiva per prevenirne la produzione.

Lo stesso Stahel, nella sua visione piena e intransigente dell'economia circolare, sostiene che non si dovrebbe nemmeno prevedere il riciclo come strategia in quanto esso è un elemento esterno, un anello di congiunzione con l'economia lineare: dove c'è un rifiuto da trattare l'economia circolare ha fallito. Nel diagramma a farfalla proposto dalla Ellen MacArthur Foundation (Fig. 8), considerato dalla comunità scientifica una delle schematizzazioni più efficaci del sistema dell'economia circolare, il riciclo è presente anche se come ciclo tecnico più esterno e, dunque, più lontano dal fulcro della circolarità.

Nel rispetto di queste riflessioni il citato Regolamento per la progettazione ecocompatibile dei prodotti connessi all'energia (European Commission, 2009) prevede delle specifiche di Ecodesign e, in relazione alla garanzia di mantenere massime le prestazioni complessive del prodotto, aspetti di riduzione degli impatti ambientali: la riduzione del consumo di energia e acqua (efficienza energetica, efficienza idrica); la riduzione / eliminazione delle sostanze che destano preoccupazione; la diminuzione dell'impronta di carbonio e quella ambientale; l'efficienza nell'uso delle risorse; l'utilizzo di materiali riciclati; la gestione della prevista generazione di rifiuti.

Posto che gli aspetti elencati erano già presenti nei precedenti documenti europei sull'Ecodesign del 2009 e 2015, la novità del nuovo Regolamento (European Commission, 2024) risiede nell'allargamento a diverse categorie di prodotto non più connesse al solo consumo di energia e nell'aggiunta di una serie di aspetti connessi alla circolarità e alla possibilità di rigenerazione dei prodotti quali: allungamento della vita utile (durabilità); possibilità di rifabbricazione e riciclo; riutilizzabilità; riparabilità, possibilità di manutenzione e ricondizionamento; aggiornamento e possibilità di miglioramento; possibilità di recupero di materiali e componenti.

La maggior parte di questi aspetti richiede una particolare attenzione agli elementi compositivi e formali dei prodotti, ma anche una profonda competenza sugli aspetti connessi alle questioni ambientali e sociali. La conoscenza e la capacità di applicazione di queste strategie progettuali sono, dunque, elementi basilari della professione del progettista che è, come sosteneva Tomás Maldonado (1970), 'intellettuale tecnico' con un importante ruolo sociale e di responsabilità, in grado di riportare a una complessità ordinata i sistemi che tendono alla complessità disordinata, cioè alla complicazione (Chiapponi, 1989). Tutte queste riflessioni e considerazioni hanno fornito le premesse per fondare l'attività di ricerca applicata svolta sui sistemi di trattamento delle acque e sul Discoil.

Obiettivi e approccio metodologico e fasi della ricerca | La ricerca si è posta un duplice obiettivo: da un lato offrire un processo finalizzato a migliorare, sviluppare e riqualificare le competenze trasversali di un gruppo di dipendenti dell'azienda OCS attraverso un approfondimento formativo sui temi dell'economia circolare, dall'altro applicare queste conoscenze in uno specifico caso aziendale in modo da verificarne la validità e costruire un metodo facilmente replicabile per altri prodotti / processi. La scelta è stata di intervenire attraverso processi di valorizzazione e attualizzazione di sistemi a basso impatto ambientale per il recupero di oli e idrocarburi, utilizzando come caso studio Discoil, prodotto ad alte prestazioni che, come accennato, aveva la necessità di essere valorizzato e attualizzato secondo le metodologie dell'Ecodesign e del Design per l'Economia Circolare.

Oltre alle indicazioni dell'ESPR e rispetto agli ambiti del Circular Design sono state utilizzate sia la matrice dello schema a farfalla della Ellen MacArthur Foundation sia la 'ruota delle 30 strategie' (Fig. 9) derivata dalle ricerche su questo tema svolte all'interno dell'Università 'Iuav' di Venezia negli anni precedenti (Badalucco and Fortuna, 2023). All'interno della ruota del Circular Design, le strategie analiz-



Fig. 5 | The oil separator with lifting system (credit: OCS, 1998).



Fig. 6 | The configuration of the Floating Discoil dedicated to spill pollution (credit: OCS, 2006).

zate più in dettaglio e utilizzate in questo caso specifico sono state quelle degli ambiti di 'allungamento della vita utile' (Design for Longevity, fulcro della ricerca), 'materia' e 'flussi di ritorno'.

Per lo sviluppo dell'attività è stato costituito un Gruppo di Lavoro eterogeneo così composto: a) un Team di sei persone con differenti mansioni e competenze interdisciplinari nelle aree ricerca e sviluppo, direzionale, commerciale e marketing, ufficio tecnico, ufficio qualità dell'azienda OCS; b) tre Docenti dell'Università 'Iuav' di Venezia con competenze specifiche in design del prodotto (con particolare attenzione ai temi dell'Ecodesign e del Design per l'Economia Circolare) e nel Design della Comunicazione (tema trattato dal Prof. Luciano Perondi); c) due designer esterni, dello studio Synthesis Design, esperti in progettazione di prodotti industriali e in digitalizzazione e renderizzazione dei progetti.

L'attività è stata svolta nell'arco di sei mesi a cavallo tra il secondo semestre del 2022 e i primi mesi del 2023 ed è stata suddivisa in 5 fasi. La prima fase è stata pensata per aggiornare e riqualificare le competenze interne all'azienda in ambito di sostenibilità ambientale, economica e sociale, economia circolare e comunicazione orientata al tema dei rischi di 'greewashing' e al 'greenhushing'; particolare attenzione è stata data alla formazione sulle strategie proprie dell'Ecodesign e del Design per l'Economia Circolare.

La seconda fase si è concentrata sulla definizione e sull'approfondimento del caso studio scelto (il disoleatore) con l'intenzione di valutare e comprendere il contributo che il prodotto può dare alla transizione verso un'economia circolare e rigenerativa e ai 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG).

La terza fase è stata dedicata all'analisi e alla scomposizione del prodotto originario (progetti, variabili, dimensionamento, materiali e funzionamento) con l'obiettivo di rivalutarlo in ottica di Ecodesign e Circular Design in base agli elementi risultati più adatti dalla prima fase (Tab. 1). Per supportare il processo si è provveduto anche ad aiutare il Team aziendale nella digitalizzazione dei disegni tecnici del prodotto, rendendo le informazioni tecniche fruibili e condivise a tutta l'organizzazione: l'analisi delle informazioni ha permesso di disporre dei dati necessari all'intervento nelle fasi progettuali successive.

La quarta fase è stata dedicata alla definizione delle linee guida del nuovo prodotto / servizio per rendere disponibile un primo strumento a supporto delle nuove competenze acquisite, ritenuto utile ad assicurare un vantaggio competitivo, duraturo e stabile, in un settore altamente concorrenziale. Le linee guida sono funzionali allo sviluppo e all'attuazione dei possibili interventi di miglioramento, di riconfigurazione, di sostituzione dei materiali o degli spessori e del ripensamento complessivo del design del prodotto in ottica circolare. La quinta e ultima fase è stata dedicata all'analisi progettuale delle singole innovazioni del Discoil, da un lato considerando l'applicazione delle più consone strategie circolari al sistema, dall'altro lavorando sulla definizione delle specifiche matematiche per riconfigurare in modo adeguato l'oggetto.

L'applicazione del Design per l'Economia Circolare nel Discoil | L'attività di ricerca applicata ha portato a due sostanziali risultati: l'accrescimento della sensibilità aziendale sui temi della sostenibilità e dell'economia circolare a livello di produzione, vita in azienda e prodotto e l'applicazione delle competenze acquisite per la riprogettazione del Discoil, utilizzato come caso applicativo. La trasmissione delle conoscenze sulle strategie progettuali usate per raggiungere gli obiettivi di sostenibilità e circolarità mira a diventare un bagaglio duraturo per l'azienda che, auspicabilmente, alla fine del percorso avrà acquisito e metabolizzato nozioni da riapplicare in nuovi progetti. Per quanto riguarda l'implementazione delle competenze e della sensibilità ambientale in azienda, è stata realizzata una matrice di analisi e di riflessione sui possibili miglioramenti, partendo dalle questioni ambientali di base e sviluppando il percorso su tre livelli: 1) la sostenibilità a livello di impianti produttivi (edifici, attrezzature, forniture); 2) la sostenibilità nella vita d'azienda (compreso il servizio mensa, i trasporti, ecc.); 3) la sostenibilità



Fig. 7 | The Floating Discoil system in action in a lake (credit: OCS, 2008).

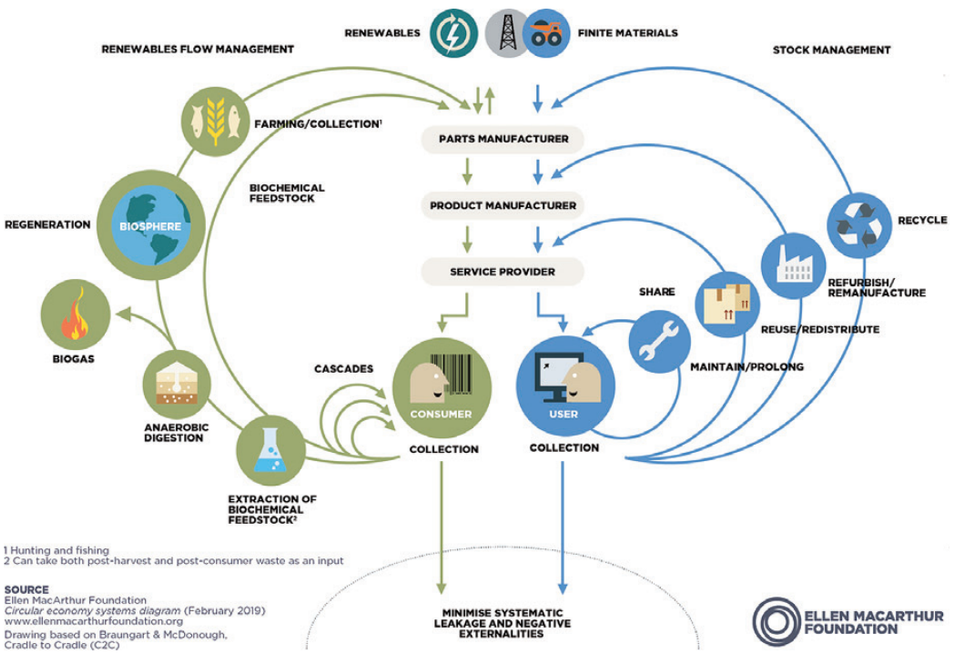


Fig. 8 | The butterfly pattern of the Ellen MacArthur Foundation (source: EMF, 2015).

del prodotto Discoil (elementi di miglioramento del prodotto o della sua produzione, fornitori, certificazioni, vendita e manutenzione).

Ogni componente del Team ha individuato almeno cinque azioni per ogni tematica che sono state poi oggetto di analisi, organizzazione in priorità e disseminazione presso il personale dell'azienda in modo da contribuire alla definizione di una precisa strategia aziendale per la sostenibilità (sociale, ambientale, economica e legata alla governance) e per l'accrescimento della sensibilità e consapevolezza ambientale in tutti i settori dell'azienda. L'applicazione a uno specifico caso aziendale è risultata determinante in quanto, ponendo come focus del percorso un prodotto già sul mercato da diverse decine di anni, la customizzazione dei singoli interventi di ricerca-azione ha consentito di creare e radicare le competenze ma anche di verificarne il livello di implementazione raggiunto.

Il secondo risultato è stato la riprogettazione del disoleatore in ottica di circolarità, con uno specifico focus sugli aspetti di minimizzazione, longevità e modularità (Fig. 10); in particolare i temi collegati alla modularità e al design per l'assemblaggio e il disassemblaggio, oltre a razionalizzare forniture, tempi e costi di produzione, hanno un ruolo fondamentale nel passaggio da un modello di economia lineare a circolare, in particolare per la multiciclicità e rigenerabilità dei prodotti / processi (Mestre and Cooper, 2017; Pietroni, Di Stefano and Galloppo, 2023).

Rispetto all'applicazione progettuale nel caso studio sono state ipotizzate due linee d'intervento, la prima delle quali ha permesso di elaborare un intervento architettonico / strutturale volto a ripensare il prodotto in ottica modulare (Fig. 11). In questo modo la nuova soluzione ha consentito di valorizzare alcune delle caratteristiche di sostenibilità già presenti nel prodotto e di accrescerne i livelli di circolarità secondo le strategie della durabilità, tra cui la facilità di manutenzione ordinaria e straordinaria (compreso il cambio dei componenti in situ o con rientro in azienda), la possibilità di aggiornamento, la più veloce personalizzazione in fase di produzione (già elemento cardine del prodotto che, al momento, viene realizzato ad hoc in varie configurazioni in base al numero di lame presenti e di utilizzo in impianto o in acque libere), la flessibilità d'uso e la semplicità di assemblaggio e disassemblaggio (Mital et alii, 2015; Charter, 2018). Infine l'uso quasi esclusivo di materiali come l'acciaio e l'alluminio ne rende già oggi chiaro il fine vita; la struttura esistente permette già diverse configurazioni secondo un impianto simmetrico con motore centrale o asimmetrico con motore laterale (Figg. 12, 13).

La seconda azione prevista ha coinvolto il redesign delle scocche: l'intervento ha permesso di accrescere la facilità di identificazione del parco macchine, di ridurre le componenti facilitando così la manutenzione e infine di comunicare efficacemente la semplicità del sistema e l'identità del prodotto. Lo studio della forma e la verifica delle possibili varianti con l'ausilio della modellazione 3D hanno permesso inoltre di ridurre gli spessori della scocca del macchinario, mantenendo i materiali in uso (necessari per la zona Atex 0, luogo nel quale è presente continuamente o per lunghi periodi un'atmosfera esplosiva) e sfruttando la resistenza per forma (Figg. 14, 15). L'intervento di riprogettazione ha dunque consentito di ripensare il prodotto in ottica sia di riduzione che di modularità: la nuova soluzione consente di valorizzare alcune caratteristiche già presenti nel prodotto e di accrescerne i livelli di circolarità secondo l'ampia gamma di strategie di durabilità citate.

Conclusioni | Per diffondere l'approccio circolare e rigenerativo servono sempre più esempi che ne dimostrino la fattibilità, le potenzialità e i limiti e che offrano soluzioni replicabili in altri contesti. Le attività qui presentate hanno proprio questo obiettivo: offrire un caso di applicazione concreta nell'ambito della progettazione e produzione di soluzioni per il trattamento delle acque e una metodologia di lavoro che può essere trasferita alle fasi di progettazione anche in altri settori manifatturieri. A tal fine, la ruota delle 30 strategie ha il ruolo anche di checklist di processo. La ricerca ha dato risposte a più livelli:
– sulle persone, applicando azioni di riqualificazione delle competenze su un gruppo di dipendenti che ha contestualmente raccolto anche il compito di disseminare la conoscenza acquisita all'interno dell'azienda;
– sull'azienda, avviando una riflessione su una strategia complessiva di sostenibilità che accresca sensibilità e consapevolezza dei dipendenti e individuando le prime azioni facilmente attuabili di questo percorso (riferimento diretto all'SDG 9 e indiretto al 12);
– sul prodotto che, pur mantenendo identità e principio ispiratore, si caratterizza da un lato per maggiore qualità dal punto di vista della preferibilità ambientale e per maggiore longevità (SDG 12), dall'altro per la riduzione dei costi di produzione (diminuzione degli spessori e modularità) e per ricadute positive anche sulla movimentazione delle merci e sull'intera supply chain (sia nel caso dell'acquisto sia nel caso del noleggio);
– sul contesto d'uso, accrescendo la facilità di utilizzo del prodotto per il trattamento dell'inquinamento delle acque da idrocarburi (riferimento diretto all'SDG 6 e indiretto al 14).

Uno dei limiti maggiori della ricerca sono i tempi e i costi necessari per l'adeguamento produttivo e dei sistemi di vendita del nuovo Discoil (prodotto e prodotto / servizio) che ne stanno rallentando la realizzazione. Il nuovo Discoil è ancora in fase di sviluppo e le prossime fasi prevedono la verifica interna dei dettagli costruttivi (in atto), la realizzazione a breve di prototipi funzionanti, la quantificazione finale del miglioramento ambientale ottenuto sia nel singolo prodotto sia considerando il servizio a lungo termine. Sebbene la ricerca abbia portato a risultati apprezzabili in termini di sperimentazione di strategie circolari, di educazione alla circolarità e di specifiche migliorie a livello progettuale sull'oggetto esistente, va ricordato che la sua conclusione e la sua validazione reale sono ancora in fieri.

Seguendo questi target la ricerca è riuscita a dimostrare come sia possibile ripensare in ottica di circolarità un prodotto esistente combinando efficacemente sostenibilità ambientale ed economica e ha messo in luce come il disoleatore produca un duplice beneficio ambientale: separando gli oli galleg-

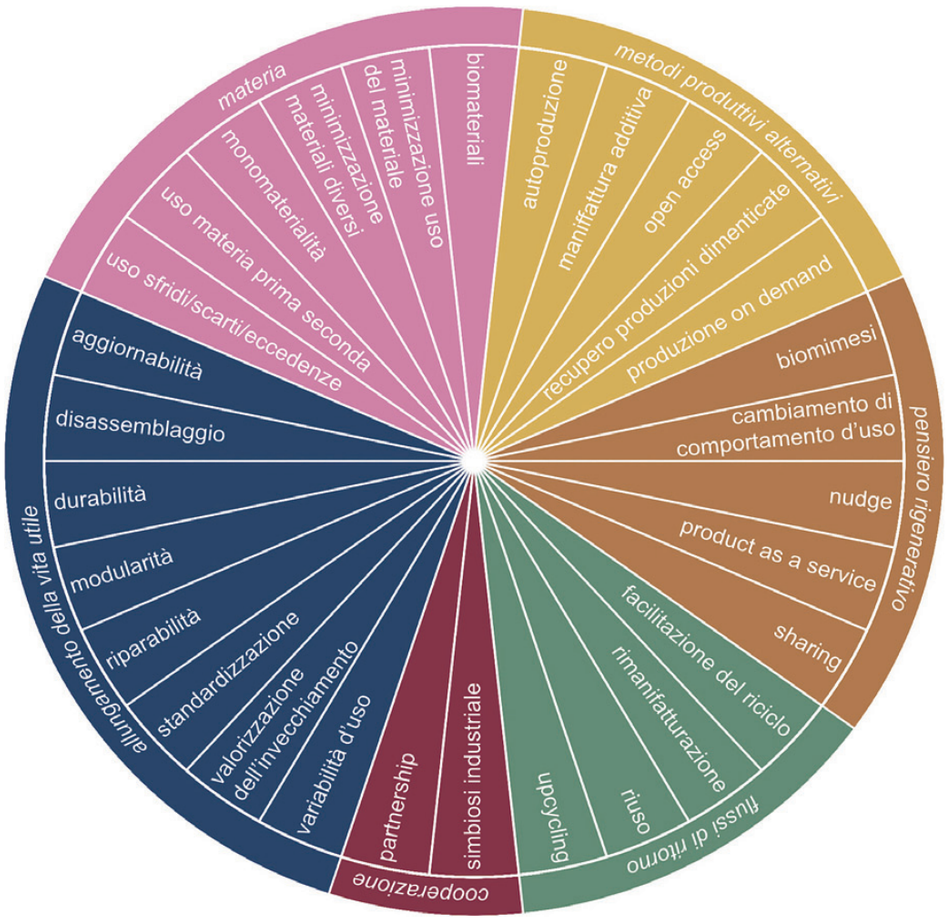


Fig. 9 | The wheel of the 30 strategies of Circular Design (source: Badalucco and Fortuna, 2023).

Tab. 1 | The strategies selected for the New Discoil, and the advantages obtained (credit: the Authors, 2025).

Circular design strategy	Degree of importance for the project (scale 1-3)	Benefits achievable in the new product
Upgradeability	1	Product upgradeability facilitated by modularity.
Disassembling	2	Simple, few parts, few joints (all bolts), visible and easily accessible joints, few materials (the entire structure is made of steel, stainless steel or carbon steel).
Durability	3	Key features of the product: very long service life; high quality; materials are resistant even in aggressive operating conditions; after-sales service and long-term maintenance that increases durability; constant availability of spare parts. Since its creation, the longer the Discoil remains in operation, the better it is preserved because the oil prevents the pads from drying out and the steel from deteriorating.
Modularity	3	New Discoil is designed with modularity in mind, offering various possible configurations (symmetrical, asymmetrical, 2-disc or 4-disc modules, therefore with different recovery capacities). The final configuration of the disc is determined by assessing the customer's capacity and size requirements based on their needs and context. It's modular, but customised (tailor-made). This results in a reduction in the time required to source materials and deliver the product from the moment the order is placed.
Repairability	2	Modularity makes repair easy: joints are reversible, and the pump and motor are located in the upper part of the machine to ensure easy repair. Components to be replaced are easily visible and accessible. Since the machine can be disassembled, it is not necessary to return the entire machine to the manufacturer; only the parts to be repaired need to be sent, and the manufacturer will supply the necessary kit. Modularity and disassembly increase the speed of repair.
Variability of usage	2	Adaptability to different workspaces depending on the configuration required for the context. Furthermore, with the appropriate modifications, it can operate in ports, sea, rivers, lakes, etc. (with the lightening of certain elements and the addition of a flotation system).

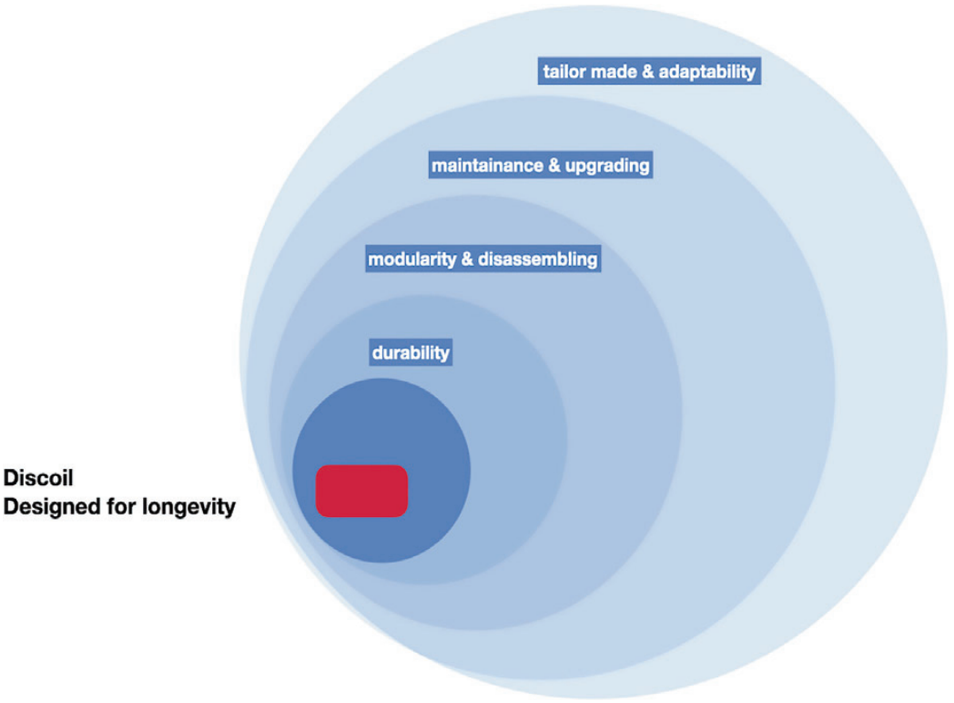


Fig. 10 | The application of the Circular Design strategies selected for the Discoil product (credit: the Authors, 2023).

gianti dall'acqua senza emulsioni, il disoleatore rende l'acqua pulita (circolarità dell'elemento inquinato che viene reso salubre) e recupera gli idrocarburi che possono così essere reinseriti, ove possibile, nei processi produttivi (circolarità dell'elemento inquinante). Va ricordato che il prodotto è in grado di recuperare in modo efficace tutto l'olio presente su una superficie d'acqua senza creare emulsioni, caratteristica che, unica nel suo genere, consente alle sostanze prelevate di essere facilmente raccolte nel serbatoio della macchina e reimmesse nel ciclo produttivo o riutilizzate in altro modo.

Alla luce dei risultati conseguiti è possibile affermare che la ricerca 'L1 – Discoil' ha testato la validità di un approccio metodologico, replicabile e scalabile per altri prodotti, in grado di offrire a designer e aziende un esempio concreto delle potenzialità delle strategie del Design per l'Economia Circolare applicate all'ambito della sostenibilità idrica.

Within Sustainable Development Goal no. 6 of the United Nations (UN, 2015), aimed at ensuring the availability and sustainable management of water and sanitation facilities globally, target 6.3 specifically deals with the reduction of water pollution. The aim is to eliminate uncontrolled discharge practices by 2030 and halve the percentage of untreated wastewater, increasing recycling and reuse (UNEP, 2009). This target is based on the fact that over 80% of wastewater generated by human activities worldwide (both domestic and industrial) is discharged into rivers or seas without treatment (UN Water, 2023). Among wastewater types, industrial wastewater has a particularly significant environmental impact, as it contains processing residues such as heavy metals, oils, and solvents; according to the monitoring of UN Indicator 6.3.1, only 27% of wastewater is treated safely worldwide (UN-Habitat and WHO, 2024).

In this context, this contribution aims to highlight the reduction of oil pollution in industrial or open waters, as well as the potential to recover, recycle, and reuse oils and hydrocarbons through low-impact water treatment technologies. To this end, the results of the research 'L1 – Discoil – Processes for the valorisation, implementation, and communication of low environmental impact systems for the recovery of oils and hydrocarbons' are presented here, funded through a competitive call by the Veneto Region (DGR n. 497 of 20/04/2021) and carried out between 2022 and 2023. The Research Group is made up of Design Professors from the 'Iuav' University of Venice, professional designers and the company OCS – Officine Costruzioni Speciali SpA of Albignasego (PD, Italy).

Water polluted by oils and hydrocarbons is currently treated using mechanical and chemical methods (Adetunji and Olaniran, 2021; Varjani et alii, 2020). The main mechanical methods include, on the one hand, machines composed of absorbent material elements, and on the other, compact disc systems (skimmers) that, when mounted perpendicular to the liquid surface, leverage the oil's viscosity to separate it from the water mechanically. The critical issue with mechanical methods lies in the risk of emulsifying water and oil during treatment, a process that must be avoided to enable recycling and potential reuse of the materials. Chemical methods, on the other hand, involve the use of additives that fragment the hydrocarbon film, with the main concern being the environmental impact of chemical solutions.

Although bioremediation systems using bacteria, still under discussion, are being studied, particularly for large spills or open waters, the research focused on a solution of notable environmental preference: a disc-type oleodynamic skimmer called Discoil, proposed as a case of interest during the drafting and presentation of the research project.

In 1970, the engineer Giancarlo Ravagnan, founder of the OCS company, invented and produced a compact oil separator with low environmental impact (Figg. 1, 2); a machine able to solve the problem of separating water from hydrocarbons in industrial plants or in the event of spillage into open water, without the use of chemicals or absorbent materials. The Discoil uses a specially designed hydraulic system and stainless-steel discs to effectively recover all oil on a water surface without forming emulsions: 98% oil with only 2% water (Figg. 3, 4). This feature allows the recovered substances to be quickly and easily reintroduced into the production cycle or reused in other ways.

The most frequent application of Discoil is the separation and recovery of hydrocarbons (petrol, diesel, fuel oils, lubricating oils, crude oil, etc.) and fatty substances in general (animal and vegetable fats) from water in plants (Fig. 5). The operating principle relies on the adhesion of oil to the surfaces of discs, which, made of specially treated stainless steel, are arranged perpendicularly and partially immersed in the water to be treated while rotating on their horizontal axis. Thanks to this adhesion and cohesion, oily products are recovered in their natural state at a considerable distance from the machine, even in classified areas (Atex areas in which an explosive atmosphere can form).

In addition to its use in industrial plants and refineries, over the years, Discoil has been used in the event of oil spills at sea (Figg. 6, 7): Discoil has been used in numerous oil spills, including Haven in 1992, Agip-Abruzzo, and Moby Prince in 1991, and during a collision between two ships near Corsica in 2018.

Its function and specific features have characterised it since its first production, making it a product inherently attentive to sustainability. This led to the selection of Discoil as a case of interest for research and redesign from a regenerative perspective. The research project explored how the product and its design could be adapted to meet environmental sustainability standards, the demands of the circular economy, and the requirements of the latest European industrial production regulations, ensuring full alignment between the product and its function. It became evident that Discoil, a product of unquestionable quality originally developed by the compa-

ny, was well-suited for a revision aimed at optimising production, use, and long-term management.

The application experimentation used some Ecodesign and Design strategies for the Circular Economy, enabling increased regenerability of the machinery in line with the logic of durability, maintainability, updating, customisation, and flexibility of use. The value of the research project and its implementation in concrete actions, as exemplified by the new Discoil presented here, lies both in demonstrating the effectiveness of applying circular strategies in design and in illustrating the progressive cultural awareness that underpins the transition from a linear to a circular economy (UNDP, 2016; European Commission, 2020).

In light of these premises, this paper presents the results of the applied research activity mentioned above, funded through a competitive call and conducted in 2022-23, focused on the redesign of a low environmental impact system for the recovery of oils and hydrocarbons with a view to circularity. After an extensive discussion on definitions and differences between Ecodesign, Sustainable Design and Circular Design, the paper describes the research method and phases and finally presents the application case.

Sustainability and circularity in design | The issues addressed by the research are part of the most recent debate on the role of Design in the ecological transition and on the strategic skills of figures such as the Circular Designer[1] (Bakker et alii, 2014; Ceschin and Gaziulusoy, 2016; Franconi et alii, 2021) and the Transitional Industrial Designer (Zannoni et alii, 2024).

According to the most recent definition in the Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR), Ecodesign is the process of integrating environmental sustainability considerations into the characteristics of products and processes across the product value chain (European Commission, 2024). This integration must lead to the definition of ecodesign requirements, i.e. a series of requirements that make the product environmentally preferable to products with identical functions and performance. The objective of this design approach is to reduce environmental impacts, i.e. changes to the environment deriving even partially from the product, taking into account what happens in all phases of its life cycle, from design to management of the end of its first useful life, and to the start of its new lives.

The aforementioned Regulation focuses on the role of Design and its potential ability to intervene upstream of the problem. In fact, in the 2020 Circular Economy Action Plan, the European Commission pointed out that up to 80% of a product's environmental impact is determined in the design phase (European Commission – Directorate-General for Communication, 2020). Years earlier, in the Directive on the development of ecodesign requirements for energy-related products (European Commission, 2009), the Commission highlighted a key element for enabling a circular economy in product design: if properly designed, products can last longer, be easier to repair, refurbish, or regenerate. This also facilitates recycling, allowing recycling companies to recover valuable materials and components.

It is therefore evident that the issues of environmental sustainability and Ecodesign, which have been the subject of reflection for several decades now, as well as the 'cyclical metabolism' of resources (EMF, 2015) – central to the circular economy model – are essential in design cultures, although confusion often persists regarding the meaning of the various terms. To clarify, it is appropriate to compare the terms most commonly used when discussing the relationship between products and sustainability. The field of Ecodesign is, in fact, intertwined with the themes of Sustainable Design and Design for the Circular Economy.

In an effort to summarise a complex topic while highlighting its nuances, it can be said that sustainability in design addresses the simultaneous reduction of impacts and the enhancement of quality across environmental, economic, and social dimensions (Vezzoli and Manzini, 2010). Ecodesign, on the other hand, focuses more specifically on minimising the environmental impact of production and the depletion of natural resources throughout the entire life cycle of a product, or, more accurately, across its potential multiple life cycles (Braungart and McDonough, 2002; Bhamra and Hernandez, 2021).

Design for the Circular Economy introduces a new point of view: in this case, it is a question of extending the life of products so that they can be used for as long as possible. The goal is to create a closed cycle in which everything can be shared, regenerated, repaired, reused and only at the end, as a last resort, recycled. Achieving this goal depends on adopting innovative business models that prioritise use and service over product ownership (Stahel, 2010; Earley, 2017). The focus shifts from merely assessing the life cycle impact of products, achiev-

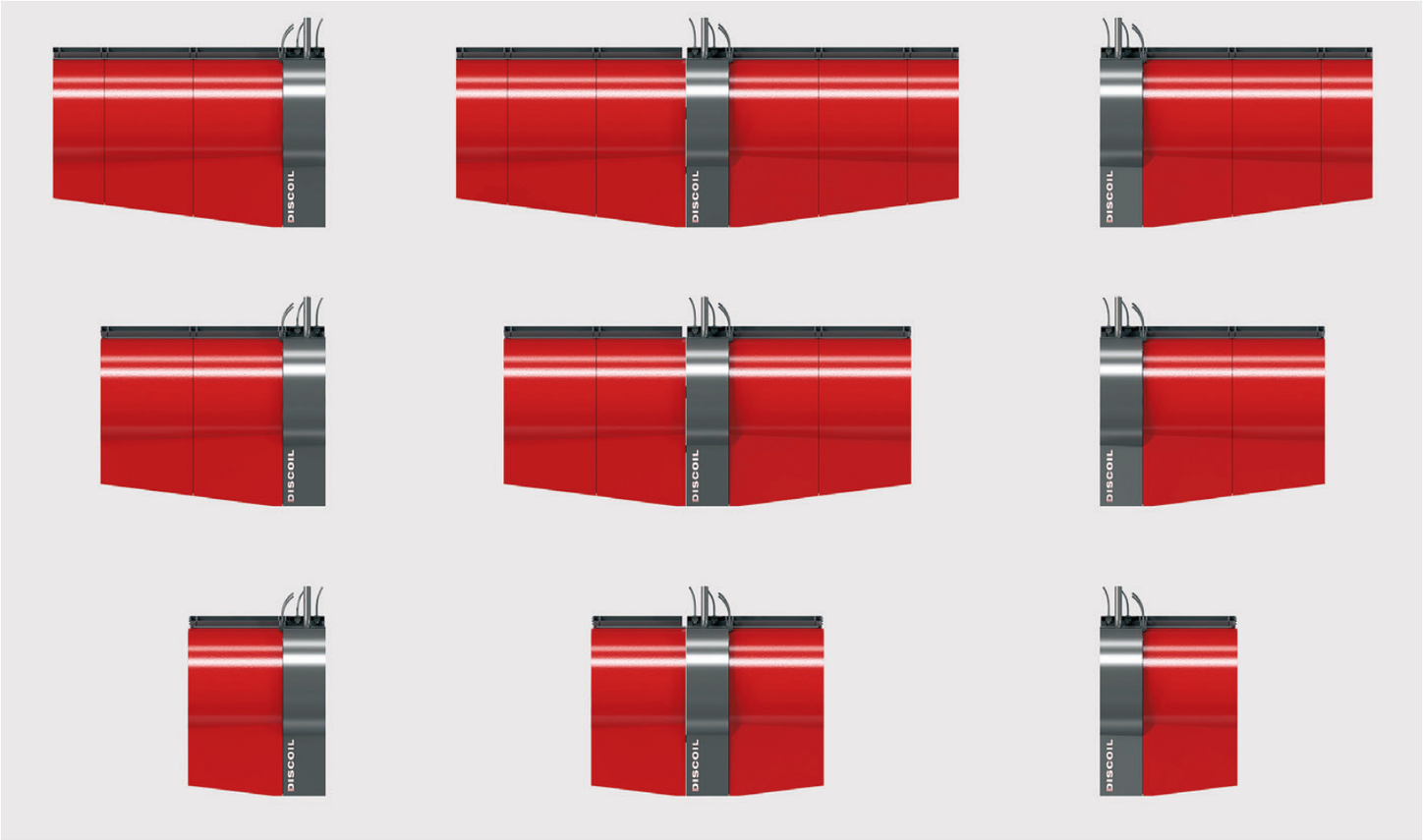


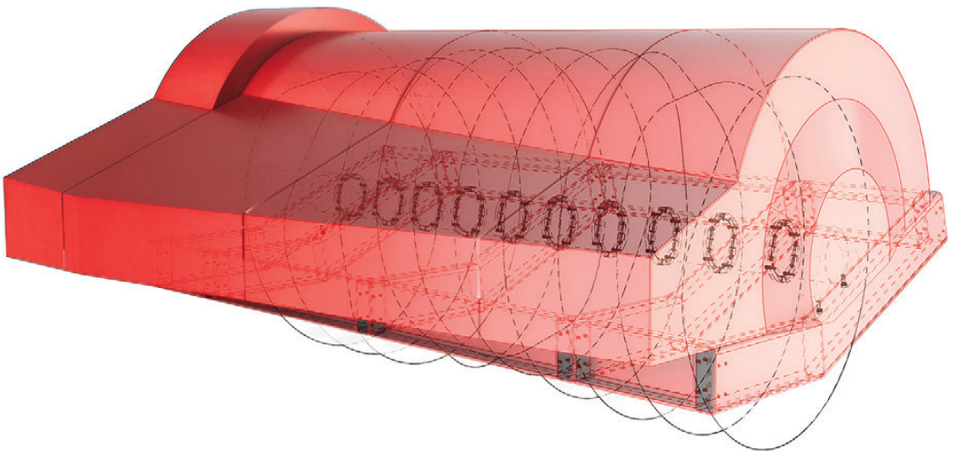
Fig. 11 | The redesign of the product with a focus on modularity to simplify customisation, assembly, disassembly, maintenance, and upgrading (credit: G. Gaino and C. Silvestri, 2025).




OCS
DISCOIL
DISCOIL

Previous page

Figg. 12, 13 | Rendering of the New Discoil in situ (credits: G. Gaino and C. Silvestri, 2023).





Figg. 14, 15 | The shape of the new oil separator reduces the materials used in the casing and makes the product's functioning explicit (credits: G. Gaino and C. Silvestri, 2023).

able through analyses such as LCA, to resource efficiency over time (EMF, 2013; Bompan and Brambilla, 2021).

From the perspective of moving from Ecodesign to Circular Design, cases transitioning toward a truly circular economy require going beyond the logic of optimisation and reduction, typical of environmental sustainability processes, toward a clear shift in consumption and production models that prioritise regenerative processes (EMF, 2013; Rau and Oberhuber, 2019). This step can only be achieved by equipping designers with new, in-depth knowledge and awareness, to be applied whenever they are involved in conceiving and designing new products, as part of a radical systemic shift in the approach to needs management.

Design for the Circular Economy is therefore based not on the reduction of impacts, but on the 'principle of inertia' by Walter Stahel (2010), according to which a product must remain alive for as long as possible to decouple its economic value from the consumption of resources, to maintain its 'performance' and to minimise its environmental costs. Furthermore, the Circular Economy is not centred on waste management and material reprocessing through recycling (an activity that remains necessary and expected, provided it does not lead to downcycling), but focuses on preventing waste generation in the first place.

Stahel himself, in his comprehensive and uncompromising vision of the circular economy, argues that recycling should not even be considered a strategy, as it is an external element – a connection to the linear economy: where waste exists to be treated, the circular economy has failed. In the butterfly diagram proposed by the Ellen MacArthur Foundation (Fig. 8), considered by the scientific community to be one of the most effective representations of the circular economy system, recycling is included, albeit as the outermost technical cycle and therefore furthest from the core of circularity.

In line with these considerations, the cited Regulation on Ecodesign requirements for energy-related products (European Commission, 2009) sets out specific Ecodesign criteria and, in relation to ensuring maximum overall product performance, includes aspects aimed at reducing environmental impacts: reducing energy and water consumption (energy and water efficiency); reducing or eliminating substances of concern; decreasing carbon and overall environmental footprints; improving resource efficiency; using recycled materials; and managing the expected generation of waste.

Given that the aspects listed were already present in previous European Ecodesign documents of 2009 and 2015, the novelty of the new Regulation (European Commission, 2024) lies in its extension to multiple product categories beyond energy consumption and the inclusion of several elements related to circularity and product regeneration, such as: extended product lifespan (durability); potential for remanufacturing and recycling; reusability; repairability, maintainability, and refurbishment; upgradability and potential for improvement; and the recovery of materials and components.

Most of these aspects require careful attention to the compositional and formal elements of products, as well as deep expertise in environmental and social issues. The knowledge and ability to apply these design strategies are therefore fundamental elements of the designer's profession, who, as Tomás Maldonado (1970) argued, is a 'technical intellectual' with an important social and ethical responsibility, capable of restoring ordered complexity to systems that tend toward disordered complexity, that is, complication (Chiapponi, 1989). All these reflections and considerations provided the foundation for the applied research activity conducted on water treatment systems and Discoil.

Objectives, methodological approach, and research phases | The research had a dual objective: on one hand, to provide a process for enhancing, developing, and retraining the transversal skills of a group of OCS employees through in-depth training on circular economy topics; on the other hand, to apply this knowledge to a specific business case to test its validity and develop a method that can be easily replicated for other products or processes. The chosen approach was to intervene through processes of enhancement and modernisation of low environmental impact systems for the recovery of oils and hydrocarbons, using Discoil as a case study: a high-performance product that, as mentioned, needed to be enhanced and updated according to the methodologies of Ecodesign and Design for the Circular Economy.

In addition to the indications of the ESPR and within the framework of Circular Design, both the Ellen MacArthur Foundation's butterfly diagram matrix and the 'wheel of 30 strategies' were used (Fig. 9), derived from research on this topic carried out

at the 'Iuav' University of Venice in previous years (Badalucco and Fortuna, 2023). Within the Circular Design wheel, the strategies analysed in greater detail and applied in this specific case were those related to 'extending product lifespan' (Design for Longevity, the core of the research), 'materials', and 'return flows'.

A diverse working group was set up to develop the project, composed of: a) a team of six people with different roles and interdisciplinary skills in the areas of research and development, management, sales and marketing, technical office, and quality control at OCS; b) three professors from the 'Iuav' University of Venice with specific expertise in product design (with a particular focus on ecodesign and design for the circular economy) and communication design (a topic covered by Prof. Luciano Perondi); c) two external designers, from the Synthesis Design studio, experts in the design of industrial products and in the digitisation and rendering of projects.

The activity was carried out over six months from the second half of 2022 to the first months of 2023 and divided into five phases. The first phase was designed to update and retrain the company's internal skills in the field of environmental, economic and social sustainability, the circular economy and communication oriented towards the issue of 'greenwashing' and 'greenhushing' risks; particular attention was given to training on Ecodesign and Design strategies for the Circular Economy.

The second phase focused on the definition and in-depth analysis of the chosen case study (the oil separator) with the intention of evaluating and understanding the contribution that the product can make to the transition to a circular and regenerative economy and to the 17 Sustainable Development Goals (SDGs).

The third phase was dedicated to the analysis and decomposition of the original product (projects, variables, sizing, materials and operation) with the aim of re-evaluating it from the perspective of Ecodesign and Circular Design based on the elements that were most suitable from the first phase (Tab. 1). To support the process, the company team was assisted in digitising the product's technical drawings, making the technical information accessible and shareable across the organisation – the analysis of the information provided the necessary data to guide interventions in the subsequent design phases.

The fourth phase was dedicated to defining the guidelines for the new product/service, providing an initial tool to support the newly acquired skills and ensuring a long-lasting and stable competitive advantage in a highly competitive sector. The guidelines are functional to the development and implementation of possible improvements, reconfigurations, replacement of materials or thicknesses and the overall rethinking of product design from a circular perspective. The fifth and final phase focused on the design analysis of the individual innovations of the Discoil, considering, on one hand, the application of the most suitable circular strategies to the system, and on the other, the definition of the mathematical specifications necessary to properly reconfigure the product.

Application of Design for the Circular Economy in Discoil | The applied research activity produced two significant results: increased company awareness of sustainability and circular economy issues across production, corporate life, and products, and the application of the acquired skills to the redesign of Discoil, used as a case study. The aim is to provide the company with lasting expertise by imparting knowledge on the design strategies used to achieve sustainability and circularity goals. Hopefully, by the end of the process, the company will have acquired and assimilated concepts that can be reapplied in new projects.

Concerning the implementation of environmental skills and awareness within the company, an analysis and reflection matrix was created to identify possible improvements, starting with fundamental environmental issues and developing the process on three levels: 1) sustainability at the production plant level (buildings, equipment, supplies); 2) sustainability in company life (including the canteen service, transport, etc.); 3) the sustainability of Discoil products (elements for improving the product or its production, suppliers, certifications, sales, and maintenance). Each team member identified at least five actions for each issue, which were then analysed, prioritised, and circulated to company staff to help define a clear corporate sustainability strategy (social, environmental, economic, and governance-related) and to raise environmental awareness and sensitivity across the company. The application to a specific business case proved decisive because, by focusing on a product already on the market for several decades, the customisation of individual research-action interventions enabled the creation and consolidation of skills, as well as the verification of the level of implementation achieved.

The second result was the redesign of the oil separator with a view to circularity, with a specific focus on minimisation, longevity, and modularity (Fig. 10); in particular, issues related to modularity and design for assembly and disassembly, in addition to rationalising supplies, production times and costs, play a fundamental role in the transition from a linear to circular economy model, specficially for the multi-cyclicality and regenerability of products/processes (Mestre and Cooper, 2017; Pietroni, Di Stefano and Galloppo, 2023).

Concerning the design application in the case study, two lines of action were proposed, the first of which led to the development of an architectural/structural intervention aimed at rethinking the product from a modular perspective (Fig. 11). Thus, the new solution has made it possible to enhance some of the sustainability features that were already present in the product and to increase circularity levels in line with sustainability strategies, including ease of routine and non-routine maintenance (including replacement of components on site or at the company), the possibility of updating, faster customisation during production (already a key feature of the product, which is currently manufactured on an ad hoc basis in various configurations depending on the number of blades present and whether it is used in a plant or in open water), flexibility of use, and ease of assembly and disassembly (Mital et alii, 2015; Charter, 2018). Finally, the almost exclusive use of materials, such as steel and aluminium, ensures that its end of life is already clear today; the existing structure allows for different configurations, including a symmetrical layout with a central motor or an asymmetrical layout with a side motor (Figg. 12, 13).

The second planned action involved the redesign of the casings. The intervention made it possible to increase the ease of identification of the machine fleet, reducing the components and thus facilitating maintenance, and finally to effectively communicate both the system's simplicity and the product's identity. The study of the shape and the evaluation of possible variants using 3D modelling also made it possible to reduce the thickness of the machine casing, while retaining the existing materials (necessary for the Atex 0 zone, where an explosive atmosphere is continuously or repeatedly present) and taking advantage of structural strength through form (Figg. 14, 15). The redesign intervention has therefore enabled the product to be rethought with a view to both reduction and modularity: the new solution enhances characteristics already present in the product and increases circularity levels, in line with the wide range of durability strategies mentioned.

Conclusions | More examples are needed to promote the circular and regenerative approach, demonstrating its feasibility, potential, and limitations, while providing solutions that can be replicated in other contexts. The activities presented here aim precisely to provide a concrete example of application in the design and production of water treatment solutions, along with a working methodology that can be applied to the design phases in other manufacturing sectors. To this end, the 30-strategy wheel also serves as a process checklist. The research provided insights on several levels:

– on the people involved, by implementing skill enhancement actions for a group of employees who also took on the task of disseminating the knowledge acquired within the company;

– on the company, by initiating reflection on an overall sustainability strategy aimed at increasing employee awareness and understanding, and by identifying the first easily implementable actions in this process (directly linked to SDG 9 and indirectly to SDG 12);

– on the product, which, while retaining its identity and guiding principle, stands out on one hand for higher environmental preference and longer lifespan (SDG 12), and on the other hand for reduced production costs (through thinner components and modularity) and positive effects on goods handling and the entire supply chain, both in the case of purchase and rental;

– on the context of use, increasing the ease of use of the product for the treatment of water pollution by hydrocarbons (direct reference to SDG 6 and indirect reference to SDG 14).

One of the research's main limitations is the time and cost required to adapt the production and sales systems for the new Discoil (product and product / service), which are slowing down its implementation. The new Discoil is still under development; the subsequent phases include the internal verification of construction details (in progress), the short-term construction of working prototypes, and the final quantification of the environmental improvement obtained both at the individual product level and in the long-term service. Although the research has yielded valuable results in terms of experimenting with circular strategies, promoting circularity education, and implementing specific design improvements to the existing product, it should be noted that its completion and full validation are still in progress.

By pursuing these objectives, the research demonstrated how an existing product can be reimagined through a circular approach, effectively combining environmental and economic sustainability. It also highlighted the dual environmental benefit

generated by the oil separator: by separating floating oils from water without creating emulsions, the device both purifies the water (circularity of the polluted element, restored to health) and recovers hydrocarbons, which can then be reintegrated, where possible, into production processes (circularity of the polluting component). It should be noted that the product efficiently recovers all oil on the water surface without forming emulsions. This unique feature allows the collected substances to be easily collected in the machine's tank and reintroduced into the production cycle or reused.

In light of the results achieved, it is possible to say that the 'L1 – Discoil' research has tested the validity of a methodological approach, replicable and scalable for other products, capable of providing designers and companies with a concrete example of the potential of Design for the Circular Economy strategies applied to the field of water sustainability.

Acknowledgements

The research 'L1 – Discoil: processes for the valorisation, implementation, and communication of low environmental impact systems for the recovery of oils and hydrocarbons' was carried out thanks to the funding of the competitive call of the Veneto Region (DGR n. 497 of 20/04/2021). We would like to thank the Research Group of the 'Iuav' University of Venice, consisting of L. Badalucco, R. Chiesa, L. Perondi and the designers G. Gaino and C. Silvestri. A special thanks goes to L. Ravagnan, E. Marchetto, R. Bertolin, and L. Grivellaro from the company OCS – Officine Costruzioni Speciali SpA of Albignasego (PD), for their availability and trust.

Note

1) For more information, see the webpage: greatrecovery.org.uk [Accessed 5 October 2025].

References

Adetunji, A. I. and Olaniran, A. O. (2021), "Treatment of industrial oily wastewater by advanced technologies – A review", in *Applied Water Science*, vol. 11, article 98, pp. 1-19. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s13201-021-01430-4 [Accessed 5 October 2025].

Badalucco, L. and Fortuna, P. (2023), "Circular Design Strategies – The dissemination of circular design's strategies – The Italian case study", in *Officina*, vol. 40, pp. 64-73. [Online] Available at: doi.org/10.57623/2384-9029.2023.40.64-73 [Accessed 5 October 2025].

Bakker, C., den Hollander, M., van Hinte, E. and Zijlstra, Y. (2014), *Products That Last – Product Design for Circular Business Models*, TU Delft Library, Delft.

Bhamra, T. and Hernandez, R. J. (2021), "Thirty years of design for sustainability – An evolution of research, policy and practice", in *Design Science | An International Journal*, vol. 7, article e2, pp. 1-17. [Online] Available at doi.org/10.1017/dsj.2021.2 [Accessed 5 October 2025].

Bompan, E. and Brambilla, I. N. (2021), *Che cosa è l'economia circolare*, Edizioni Ambiente, Milano.

Braungart, M. and McDonough, W. J. (2002), *Cradle to Cradle – Remaking the Way We Make Things*, North Point Press, New York.

Ceschin, F. and Gaziulusoy, I. (2016), "Evolution of design for sustainability – From product design to design for system innovations and transitions", in *Design Studies*, vol. 47, pp. 118-163. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.destud.2016.09.002 [Accessed 5 October 2025].

Charter, M. (ed.) (2018), *Designing for the Circular Economy*, Routledge, London.

Chiapponi, M. (1989), *Ambiente – Gestione e società – Un contributo alla teoria della progettazione ambientale*, Feltrinelli, Milano.

Earley, R. (2017), "Circular Design Futures", in *The Design Journal | An International Journal for All Aspects of Design*, vol. 20, issue 4, pp. 421-434. [Online] Available at: doi.org/10.1080/14606925.2017.1328164 [Accessed 5 October 2025].

EMF – Ellen MacArthur Foundation (2015), *Growth within – A circular economy vision for a competitive Europe*. [Online] Available at: ellenmacarthurfoundation.org/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe [Accessed 5 October 2025].

EMF – Ellen MacArthur Foundation (2013), *Toward the circular economy – Vol. 1 – Economic and business rationale for an accelerated transition*. [Online] Available at: content.ellenmacarthurfoundation.org/m/27265af68f11ef30/original/Towards-the-circular-economy-Vol-1.pdf [Accessed 5 September 2025].

European Commission (2024), *Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC*, document 32024R1781. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1781&qid=1719580391746 [Accessed 5 October 2025].

European Commission (2020), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe*, document 52020DC0098, COM/2020/98 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52020DC0098 [Accessed 5 October 2025].

European Commission (2009), *Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products (recast)*, document 32009L0125. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0125 [Accessed 5 October 2025].

European Commission – Directorate-General for Communication (2020), *Circular Economy Action Plan – For a cleaner and more competitive Europe*, Publications Office of the European Union, Luxembourg. [Online] Available at: data.europa.eu/doi/10.2779/05068 [Accessed 5 October 2025].

Franconi, A., Badalucco, L., Peck, D. and Nasr, N. (2021), "A multi- hierarchical 'Design for X' framework for accelerating circular economy", in Nissen, N. F. and Jaeger-Erben, M. (eds), *PLATE | Product Lifetimes and The Environment – Proceedings of the 3rd PLATE Conference, Berlin, Germany, September 18-20, 2019*, Universitätsverlag der TU Berlin, Berlin, pp. 257-266. [Online] Available at: d-nb.info/1277723664/34 [Accessed 5 October 2025].

Maldonado, T. (1970), *La speranza progettuale*, Einaudi, Torino.

Mestre, A. and Cooper, T. (2017), "Circular Product Design – A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy", in *The Design Journal | An International Journal for All Aspects of Design*, vol. 20, issue supp. 1, pp. 1620-1635. [Online] Available at doi.org/10.1080/14606925.2017.1352686 [Accessed 5 October 2025].

Mital, A., Desai, A., Subramanian, A. and Mital, A. (2015), "Designing for assembly and disassembly", in Mital, A., Desai, A., Subramanian, A. and Mital, A. (eds), *Product Development – A Structured Approach to Consumer Product Development, Design, and Manufacture,* Elsevier, Amsterdam, pp. 159-202. [Online] Available at: doi.org/10.1016/B978-0-12-799945-6.00007-7 [Accessed 5 October 2025].

Pietroni, L., Di Stefano, A. and Galloppo, D. (2023), "Il design modulare verso l'economia circolare – Dal 'fare per disfare' al 'fare per rifare' | Modular design towards the circular economy – From 'making to unmake' to 'making to remake'", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 14, pp. 274-283. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/14232023 [Accessed 5 October 2025].

Rau, T. and Oberhuber, S. (2019), *Material Matters – L'importanza della materia – Un'alternativa al sovrasfruttamento*, Edizioni Ambiente, Milano.

Stahel, W. R. (2010), *The Performance Economy*, Palgrave Macmillan, London. [Online] Available at: doi.org/10.1057/9780230274907 [Accessed 5 October 2025].

UN – United Nations (2015), *Transforming Our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development.* [Online] Available at: sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld/publication [Accessed 5 October 2025].

UN Water (2023), *Water Quality and Wastewater.* [Online] Available at: unwater.org/water-facts/water-quality-and-wastewater [Accessed 5 October 2025].

UN-Habitat – United Nations Human Settlements Programme and WHO – World Health Organization (2024), *Progress on the proportion of domestic and industrial wastewater flows safely treated – Mid-term status of SDG Indicator 6.3.1 and acceleration needs, with a special focus on climate change, wastewater reuse and health*. [Online] Available at: unwater.org/sites/default/files/2024-08/SDG6_Indicator_Report_631_Progress-on-Wastewater-Treatment_2024_EN_0.pdf [Accessed 5 October 2025].

UNDP – United Nations Development Programme (2016), *Transitioning from the MDGs to the SDGs*. [Online] Available at: undp.org/publications/transitioning-mdgs-sdgs [Accessed 5 October 2025].

UNEP – United Nations Environment Programme (2009), *Design for Sustainability – A Step by Step Approach*. [Online] Available at: unep.org/resources/report/design-sustainability-step-step-approach [Accessed 5 October 2025].

Varjani, S., Joshi, R., Srivastava, V. K., Ngo, H. H. and Guo, W. (2020), "Treatment of wastewater from petroleum industry – Current practices and perspectives", in *Environ Science and Pollution Research*, vol. 27, pp. 27172-27180. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s11356-019-04725-x [Accessed 5 October 2025].

Vezzoli, C. and Manzini, E. (2008), *Design for Environmental Sustainability*, Springer, London. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-1-84800-163-3 [Accessed 5 October 2025].

Zannoni, M., Succini, L., Rosato, L. and Pasini, V. (2024), "Transitional Industrial Designer – La responsabilità di progettisti e imprese per una transizione sostenibile | Transitional Industrial Designer – The responsibility of designers and companies for a sustainable transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 332-343. [Online] Available at doi.org/10.19229/2464-9309/15282024 [Accessed 5 October 2025].

AGATHÓN – International Journal of Architecture, Art and Design | n. 18 | 2025 | pp. 398-407
ISSN print: 2464-9309 – ISSN online: 2532-683X | doi.org/10.69143/2464-9309/18252025

Article Info

Received 09 September 2025
Revised 15 October 2025
Accepted 17 October 2025
Published 30 December 2025

SISTEMI INNOVATIVI PER LO STOCCAGGIO DELL'IDROGENO (HEHS)
Visual design e AI per la comunità

INNOVATIVE SYSTEMS FOR HYDROGEN STORAGE (HEHS)
Visual design and AI for community engagement

Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Federico Rossi, Michela Meschini

Abstract

Il progetto High Efficiency Hydrogen Storage (HEHS) si inserisce nel quadro della transizione ecologica, proponendo un sistema innovativo per lo stoccaggio dell'idrogeno basato su clatrati idrati. Il contributo affronta la dimensione visiva della transizione con l'obiettivo di proporre una codifica cromatica dell'idrogeno alternativa alla Hydrogen Colour Classification, oggi diffusa ma priva di basi percettive e teoriche condivise. La metodologia adottata integra teoria del colore, analisi delle identità visive esistenti e validazione percettiva tramite simulazione basata sui Large Language Models, modellando profili utente differenziati. La ricerca mira a costruire un linguaggio visivo accessibile, coerente e trasferibile, capace di restituire la complessità dei processi energetici e rafforzare la sostenibilità cognitiva delle comunicazioni ambientali.

The High Efficiency Hydrogen Storage (HEHS) project is part of the broader framework of ecological transition, proposing an innovative hydrogen storage system based on hydrate clathrates. The contribution addresses the visual dimension of the transition, with the aim of defining a chromatic code for hydrogen as an alternative to the current Hydrogen Colour Classification, which, although widespread, lacks shared perceptual and theoretical foundations. The adopted methodology integrates colour theory, the analysis of existing visual identities, and perceptual validation through simulation based on Large Language Models, modelling differentiated user profiles. The research aims to develop an accessible, coherent, and transferable visual language that can effectively express the complexity of energy processes and enhance the cognitive sustainability of environmental communication.

Keywords

stoccaggio dell'idrogeno ad alta efficienza, progettazione visiva, classificazione del colore dell'idrogeno, intelligenza artificiale, transizione sostenibile

hydrogen, colour theory, visual design, artificial intelligence, ecological transition, perception, sustainability

Fabio Bianconi, Engineer, PhD, is a Full Professor of Drawing at the University of Perugia (Italy), where he focuses on architectural drawing, landscape representation, and digital innovation. E-mail: fabio.bianconi@unipg.it

Marco Filippucci, Engineer, PhD, is an Associate Professor of Drawing at the University of Perugia (Italy). His research interests include representation, perception, landscape, and digital techniques. He is the Scientific Coordinator of national and international research projects. E-mail: marco.filippucci@unipg.it

Federico Rossi, Engineer, PhD, is a Full Professor of Environmental Technical Physics at the University of Perugia (Italy). His research focuses on hydrogen, renewable energy, climate change, gas hydrates, and energy efficiency. E-mail: federico. rossi@unipg.it

Michela Meschini, Engineer, Architect, PhD, is an Assistant Professor of Drawing at the University of Perugia (Italy). Her research activity concerns architectural drawing, digital representation, surveying, and BIM, with particular attention to the built heritage. E-mail: michela.meschini@unipg.it

Nel panorama della transizione ecologica l'idrogeno si configura come vettore strategico per la decarbonizzazione dei sistemi energetici, assumendo un ruolo centrale nelle agende politiche, nei piani industriali e nella ricerca scientifica (European Commission, 2019, 2021b; IEA, 2019; IPCC, 2023; Vivanco-Martín and Iranzo, 2023). La sua capacità di integrarsi nei settori hard-to-abate lo rende essenziale per il raggiungimento della neutralità climatica come delineato nel Green Deal Europeo, nel pacchetto Fit for 55 e nel Piano REPowerEU (European Commission, 2019, 2021a, 2022). In Italia il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE, 2023a), la Strategia Nazionale per l'Idrogeno (MISE, 2020) e il PNRR (Governo Italiano, 2023) promuovono la realizzazione di hydrogen valley e l'adozione di tecnologie avanzate (Battisti and Calvano, 2024), anche attraverso strumenti regolatori quali le Direttive 2018/2001 e 2023/2413 (European Parliament and Council, 2018, 2023).

In questo contesto si colloca il progetto High Efficiency Hydrogen Storage (HEHS), finanziato con fondi PNRR[1], che propone un sistema innovativo di stoccaggio e trasporto dell'idrogeno basato sull'impiego di clatrati idrati. Queste strutture cristalline, capaci di intrappolare gas a basse pressioni e temperature moderate, rappresentano un'alternativa promettente rispetto alle tecnologie convenzionali in termini di efficienza, sicurezza e sostenibilità (Davoodabadi, Mahmoudi and Ghasemi, 2021; Veluswamy, Kumar and Linga, 2014; Di Giuseppe and Gambelli, 2024; Gambelli, Rossi and Gigliotti, 2024). La letteratura più recente ne sottolinea il potenziale supportato da evidenze sperimentali e da modelli predittivi applicati a miscele complesse in condizioni porose reali (Gambelli, Rossi and Gigliotti, 2025; Giampaoli et alii, 2025; Paltsev et alii, 2021).

La sperimentazione scientifica è affiancata da una struttura metodologica guidata dai dati, fondata su simulazioni termodinamiche e tecniche di machine learning (Jordan and Mitchell, 2015; Giampaoli et alii, 2025), ma anche su sistemi di validazione cognitiva, basati sull'uso di Large Language Models (LLM). Recenti studi hanno dimostrato come tali modelli siano in grado di replicare valutazioni coerenti con i paradigmi della percezione cromatica umana (Marjieh et alii, 2023), di simulare comportamenti psicologici complessi (Aher, Arriaga and Kalai, 2023) e di generare risposte comparabili a quelle di esperti umani (Binz and Schulz, 2023), aprendo nuove prospettive per l'analisi delle interazioni visive.

La transizione energetica richiede infatti anche una progettazione simbolica e culturale dei processi, capace di orientare la percezione pubblica e generare consenso informato: in questa prospettiva il colore è indagato come strumento attivo nella rappresentazione dell'idrogeno. Il contributo si propone di superare l'attuale Hydrogen Colour Classification, affetta da arbitrarietà semantiche, incoerenze percettive e mancanza di standard condivisi (Kusoglu, 2022; Ocenic, 2023) attraverso un modello di codifica cromatica fondato su criteri scientifici, percettivi e progettuali.

La proposta si basa su tre ipotesi: il colore è un codice semantico efficace nella comunicazione ambientale; la rappresentazione cromatica deve essere accessibile, coerente e riconoscibile; la validazione può avvenire tramite simulazioni LLM-based capaci di riprodurre differenti profili percettivi (Luo et alii, 2025; Aher, Arriaga and Kalai, 2023). Tali modelli offrono una struttura statistica capace di anticipare pattern interpretativi, generare valutazioni controllabili e ampliare l'affidabilità dei sistemi visuali. Lo studio intende così dimostrare come la teoria del colore, integrata con l'intelligenza artificiale, possa costituire un dispositivo progettuale strategico per il coinvolgimento della comunità nella transizione verde, fornendo strumenti comunicativi robusti, scalabili e cognitivamente fondati.

Alla luce di queste premesse il contributo si propone di indagare il potenziale del colore come dispositivo cognitivo nella rappresentazione della transizione energetica, elaborando un modello di codifica visiva dell'idrogeno fondato su criteri teorici, percettivi e comunicativi. L'obiettivo è dimostrare la possibilità di integrare teoria del colore, sperimentazione scientifica e intelligenza artificiale in un framework progettuale capace di restituire la complessità dei processi energetici attraverso linguaggi accessibili e verificabili.

Il lavoro si articola in quattro passaggi: un inquadramento teorico sulla relazione tra transizione energetica e codici visivi; la descrizione del metodo di costruzione e validazione del modello cromatico; la presentazione dei risultati dell'indagine percettiva basata su profili simulati; infine la proposta di una nuova classificazione visiva dell'idrogeno fondata sull'intensità emissiva di CO_2. Per la sua natura interdisciplinare il contributo può offrire un impatto significativo nella comunità scientifica, proponendo un modello replicabile di comunicazione ambientale in grado di connettere conoscenza tecnica e cultura visiva all'interno dei processi di transizione ecologica.

Transizione energetica e codici visivi | La transizione energetica, oltre che rappresentare una sfida tecnologica, implica una trasformazione culturale che richiede nuovi linguaggi, sistemi simbolici e infrastrutture comunicative. In questo contesto la comunicazione visiva non è solo mezzo informativo, ma dispositivo epistemico e relazionale, capace di generare comprensione e coinvolgimento (Tufte, 2006; Ware, 2004; Valenti et alii, 2024). Il colore, in particolare, svolge un ruolo centrale come sistema cognitivo e semiotico (Albers, 1963; Itten, 1961; Bertin, 1983; Kress and van Leeuwen, 2020; Lupton, 2017), abilitando strutture percettive e significati condivisi. Negli studi più recenti la riflessione sul colore si è progressivamente estesa dall'ambito percettivo a quello cognitivo e comunicativo, configurandolo come dispositivo interpretativo della realtà visiva e culturale (Gage, 1999; Heller, 2009; Fairchild, 2013; Falcinelli, 2017): tali contributi hanno ridefinito il ruolo del colore come elemento di costruzione simbolica, in grado di integrare dimensioni estetiche, psicologiche e informative, offrendo nuovi strumenti per la rappresentazione dei processi complessi e per il design della comunicazione ambientale.

In questa prospettiva il Visual Design può configurarsi come strumento di sostenibilità cognitiva, coniugando accessibilità e rigore (Casiddu, Burlando and Chen, 2024; Valenti et alii, 2024; Zannoni et alii, 2024). La capacità del colore di costruire relazioni simboliche è oggi riconosciuta nella comunicazione ambientale e nei processi progettuali complessi. Nel caso dell'idrogeno la Hydrogen Colour Classification associa cromie a specifici processi produttivi; nata con finalità divulgative, tale classificazione è stata recepita in documenti istituzionali e strategie comunicative (IEA, 2021; Confindustria, 2021; Reitsma, 2023), assumendo un valore prescrittivo privo di fondamento teorico.

La letteratura ne ha evidenziato vari limiti: arbitrarietà percettiva (Kusoglu, 2022), mancanza di standard condivisi (Ocenic and Tanau, 2023), difficoltà nel rappresentare tecnologie ibride (Ajanovic, Sayer and Haas, 2022; Noussan et alii, 2021) e scarsa inclusività verso soluzioni emergenti (Chew et alii, 2023; Paltsev et alii, 2021): Boretti (2021) propone di ampliare la gamma cromatica, introducendo tonalità come il bianco per tecnologie come la pirolisi solare; in alternativa recenti studi suggeriscono modelli fondati su gradienti cromatici capaci di esprimere relazioni tra fonti energetiche e intensità emissive (Arcos and Santos, 2023; Vezzoni, 2024).

In tali approcci il colore assume una funzione interpretativa, diventando interfaccia cognitiva tra sistemi complessi e narrazione visiva (Bertin, 1983; Kress and van Leeuwen, 2020). La costruzione di linguaggi visivi accessibili si inserisce nei paradigmi della sostenibilità e dell'economia circolare, contribuendo alla ridefinizione qualitativa dello sviluppo (Capra and Luisi, 2014; Raworth, 2017; Sachs, 2019; Hickel, 2017): in questo quadro la comunicazione ambientale orienta comportamenti e rappresentazioni (Rawsthorn and Antonelli, 2022; Manzini, 2015).

In tale scenario è da collocarsi il progetto HEHS che rappresenta un caso studio in cui ricerca scientifica e comunicazione visiva si integrano in una sintassi cromatica armonica, validata empiricamente e replicabile: l'adozione di sistemi visivi basati su gradienti, accessibilità (W3C, 2025) e riconoscibilità percettiva contribuisce alla costruzione di un ecosistema simbolico per la transizione, come indicato anche nei documenti europei e nazionali (European Commission, 2021b; European Parliament and Council, 2023; MISE, 2020; MASE, 2023b; Confindustria, 2021).

Costruzione del modello cromatico | L'elaborazione di un sistema cromatico per la rappresentazione visiva dell'idrogeno è stata strutturata secondo una metodologia integrata che ha combinato l'analisi critica delle identità visive esistenti con la costruzione teorica di un repertorio armonico e la successiva validazione percettiva (Fig. 1). Il campione di partenza è costituito da diciannove casi studio selezionati a livello internazionale tra operatori, consorzi, Enti pubblici e aziende attive nella produzione, distribuzione e promozione dell'idrogeno (Figg. 2, 3). I loghi e i sistemi grafici associati a ciascun soggetto sono stati analizzati mediante estrazione diretta dei valori cromatici RGB e HSB con il supporto di strumenti vettoriali e software di lettura parametrica (Fig. 4).

Contestualmente è stata verificata la conformità delle combinazioni di colore rispetto ai criteri di contrasto previsti dalle linee guida WCAG 2.1, al fine di valutare il grado di accessibilità visiva in ottica comunicativa. L'analisi ha incluso anche componenti tipografiche, struttura compositiva, tecniche grafiche prevalenti, nonché la lettura semiotica dei segni impiegati, con riferimento alla teoria della percezione e della comunicazione visiva (Itten, 1961; Arcos and Santos, 2023).

Per la fase di validazione la ricerca ha adottato una metodologia di simulazione semantica controllata, fondata sull'impiego dei Large Language Models (LLM) per la generazione di profili utente: in luogo della somministrazione tradizionale a un campione reale, è stata costruita una popolazione artificiale composta da cinquanta persone simulate, modellate in funzione di variabili anagrafiche, cul-

turali e professionali. Tali profili sono stati calibrati per restituire la varietà tipologica di un'utenza potenziale, mantenendo coerenza interna tra ruolo, formazione, contesto e livello di alfabetizzazione visiva. Inoltre l'approccio seguito, dalla fase teorica alla validazione percettiva, configura un metodo sperimentale strutturato, impostato per garantire coerenza interna e possibilità di riuso in contesti analoghi.

I questionari, di tipo semistrutturato e a prevalenza descrittiva, sono stati articolati in cinque sezioni principali (Tab. 1) e sono stati somministrati ai profili simulati tramite interazione iterativa controllata, in cui il modello è stato guidato a rispondere secondo vincoli semantici, coerenze narrative e comportamenti plausibili. Questo ha consentito di esplorare scenari di risposta diversificati, rappresentativi di differenti livelli di sensibilità percettiva, competenza comunicativa e consapevolezza simbolica, senza incorrere nei limiti logistici e statistici tipici delle indagini reali.

Il processo ha generato dati articolati, con esiti convergenti in termini di preferenza cromatica, efficacia simbolica e riconoscibilità percettiva, che sono stati interpretati alla luce delle ipotesi di partenza e dei principi teorici assunti. L'adozione di una simulazione basata sull'LLM non ha inteso sostituire l'indagine empirica, bensì configurarsi come dispositivo esplorativo e riflessivo, coerente con un approccio etico alla progettazione comunicativa, in cui l'intelligenza artificiale opera come infrastruttura cognitiva in grado di supportare la generazione di scenari valutativi, ampliare l'orizzonte delle possibilità progettuali e testare la coerenza simbolica delle soluzioni in contesti differenziati.

Palette cromatiche ed esiti dell'indagine percettiva | A partire dalla sistematizzazione dei dati cromatici è stato costruito un repertorio di trentuno palette tipo, ciascuna composta da tre a cinque colori e organizzata in otto gruppi armonici da A ad H (Figg. 5-8): i primi quattro (A-D) seguono i canoni della teoria di Itten (monocromatico, analogo, complementare), mentre i gruppi E-H derivano da configurazioni ricorrenti nei sistemi visivi del settore energetico. Le palette sono state ricostruite in formato vettoriale, codificate e predisposte per la verifica percettiva mediante simulazione semantica controllata.

La validazione percettiva è stata condotta attraverso la simulazione di cinquanta profili, ottenuti mediante sistemi di LLM calibrati su variabili anagrafiche, formative e professionali. L'analisi delle risposte ha evidenziato un quadro di coerenza narrativa che consente di cogliere non solo le preferenze cromatiche generali, ma anche le motivazioni sottese alle scelte (Fig. 9). Dall'analisi emerge una chiara polarizzazione simbolica: il verde e il blu vengono ricondotti alla dimensione della sostenibilità ambientale e dell'innovazione tecnologica (Fig. 10).

Tale convergenza semantica, diffusa e trasversale rispetto ai diversi profili, conferma la pertinenza di queste tonalità come codici cromatici privilegiati nella comunicazione energetica. Accanto a questa prima evidenza, si registra una valutazione fortemente orientata verso le palette costruite secondo armonie che seguono le teorie del colore (Fig. 11), percepite come più leggibili, stabili e adeguate a contesti istituzionali. Le configurazioni non canoniche, pur riconosciute in alcuni casi come portatrici di originalità, sono state ritenute meno efficaci nella trasmissione immediata dei significati; ne deriva l'affermazione di un principio di continuità percettiva, in cui la solidità teorica della composizione cromatica si traduce in un più elevato grado di comprensione e di riconoscibilità.

La validazione finale ha evidenziato la netta preferenza per la palette 'P22' (48%), costruita su un gradiente verde-blu e coerente con la teoria del colore (Fig. 12); in seconda posizione la 'P31' (26%), confrontata come palette di carattere sperimentale. La forza di questa scelta non risiede unicamente nella gradevolezza estetica, ma soprattutto nella sua capacità di integrare in un continuum visivo i due poli simbolici centrali della transizione energetica: naturalità e tecnologia. Il gradiente verde-blu che la caratterizza è stato percepito come rappresentazione dinamica ed evolutiva, capace di narrare processi di trasformazione senza soluzione di continuità, in un equilibrio cromatico che unisce coerenza percettiva, armonia tonale e leggibilità funzionale in accordo con i criteri WCAG 2.1.

La validazione condotta tramite modelli linguistici LLM, pur offrendo un controllo semantico e narrativo elevato, riflette la dimensione di un esperimento simulato, costruito per restituire coerenza percettiva in condizioni controllate. Tale impostazione, per quanto efficace nel garantire replicabilità e trasparenza metodologica, si colloca entro un orizzonte di rappresentazione, più che di misurazione diretta dell'esperienza, e va quindi interpretata come strumento di esplorazione cognitiva. Allo stesso modo la selezione dei casi cromatici, derivata da criteri teorici e percettivi consolidati, risponde a un ambito applicativo circoscritto, quello della comunicazione visiva nel settore energetico, che potrà essere esteso e verificato in ulteriori contesti di sperimentazione.

L'applicazione del modello evidenzia infine alcune barriere di trasferibilità, legate alla diversa alfabetizzazione visiva, alla variabilità normativa e culturale dei contesti, che rappresentano al tempo stesso un limite e una potenziale area di sviluppo per la ricerca futura.

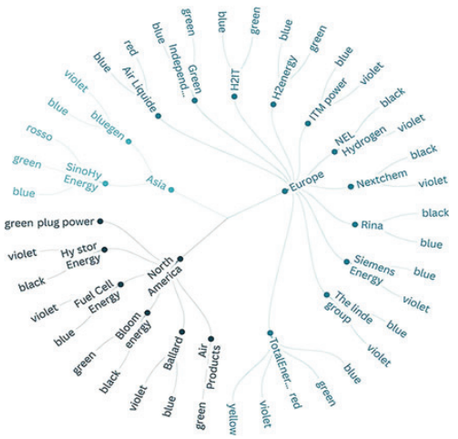
Superare la Hydrogen Colour Classification | I risultati emersi dall'indagine percettiva confermano, in modo articolato, la validità dell'assunto teorico da cui muove il progetto HEHS: la necessità di superare l'attuale sistema cromatico dell'idrogeno, rigido e convenzionale, in favore di un linguaggio visivo basato su continuità percettiva, coerenza simbolica e leggibilità semantica. Come evidenziato da numerosi studi recenti (Kusoglu, 2022; Ocenic, 2023; Chew et alii, 2023), l'Hydrogen Colour Classification presenta criticità sostanziali: assenza di uno standard condiviso, sovrapposizione tra cromie e processi produttivi, incoerenze teoriche e limiti nella rappresentazione di tecnologie ibride (Fig. 13).

L'approccio basato su etichette fisse appare inadatto a restituire la complessità dinamica della filiera e a sostenere la costruzione di un immaginario riconoscibile e condiviso. In questa direzione anche Boretti (2021) invita a includere nel repertorio cromatico nuove configurazioni tecnologiche oggi escluse dalle tassonomie ufficiali, rafforzando l'ur-



Fig. 1 | Methodology (credit: M. Meschini, 2025).

Fig. 2 | Case studies used in the research (credit: M. Meschini, 2025).



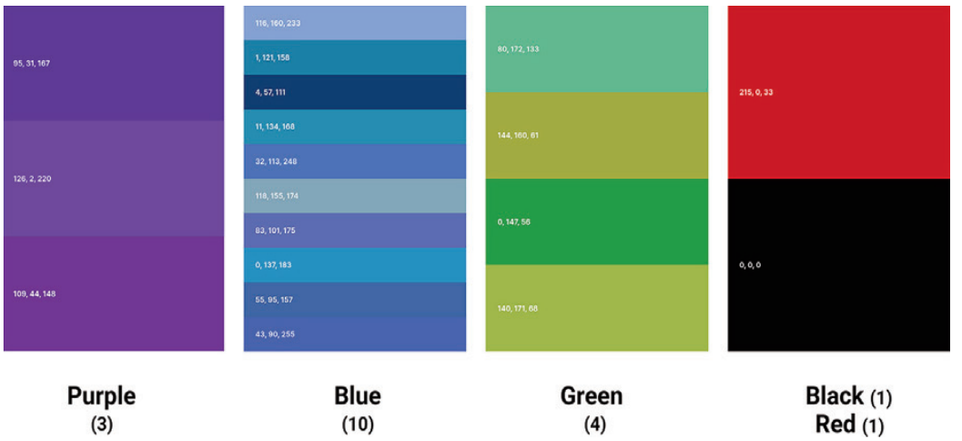


Fig. 3 | Radial map of the prevailing chromatisms in corporate logos operating in the hydrogen sector, classified by continent (credit: M. Meschini, 2025).

Fig. 4 | Main chromaticities extracted from the samples (credit: M. Meschini, 2025).

genza di una riformulazione epistemologicamente fondata. Le cinque tonalità selezionate, appartenenti allo stesso asse analogico blu-verde, possono essere reinterpretate come segmenti di un gradiente classificatorio in grado di rappresentare la complessità e la variabilità dei processi produttivi. La classificazione proposta organizza i cromatismi in una sequenza progressiva ordinata per intensità emissiva di CO_2, assumendo come parametro principale il grado di sostenibilità delle tecnologie di produzione dell'idrogeno (Fig. 14).

Il primo colore della palette (#8EA641) corrisponde al livello a CO_2 molto bassa o negativa, associato ai processi biochimici e alla conversione da biomassa; il secondo colore (#6B9D5C) rappresenta un livello a CO_2 quasi nulla, esemplificato dall'elettrolisi alimentata da fonti rinnovabili; il terzo colore (#489476) è riferito a un livello a CO_2 ridotta, tipico di soluzioni ibride low-carbon quali la pirolisi del metano; il quarto colore (#248B91) si colloca in corrispondenza di un livello a CO_2 medio-bassa, riconducibile allo steam reforming con cattura e stoccaggio della CO_2 (CCS); infine, il quinto colore (#0179AB) individua un livello a CO_2 elevata, rappresentativo delle tecnologie mature, ma ancora ad alta intensità emissiva, come lo steam reforming privo di sistemi di cattura.

Tale logica graduale consente di superare l'approccio segmentato, abilitando la rappresentazione visiva di zone liminari e traiettorie evolutive. Il colore non è più mera etichetta, ma sintassi visiva: sistema codificabile, interpretabile e adattivo, in grado di coniugare coerenza percettiva, fondatezza teorica (Itten, 1961) e potenzialità comunicative. La validazione empirica ne attesta l'efficacia, aprendo alla possibilità di costruire codici visivi condivisi attraverso processi progettuali che integrano scienza, design e rappresentazione.

Visione strategica: SDG e impatti trasversali | Il progetto HEHS si configura come dispositivo integrato capace di attivare sinergie multilivello all'interno dell'Agenda 2030 (UN, 2015), con particolare riferimento a quattro obiettivi cardine (Fig. 15). In primo luogo l'SDG 7 (energia pulita e accessibile) viene direttamente interpellato attraverso lo sviluppo di un sistema di stoccaggio dell'idrogeno ad alta efficienza, fondato su tecnologie innovative a ridotto impatto ambientale. L'adozione di clatrati idrati, unitamente all'uso di modelli predittivi e simulazioni termodinamiche, orienta la ricerca verso soluzioni tecniche scalabili, sicure e sostenibili.

L'SDG 9 (industria, innovazione e infrastrutture) trova riscontro nella matrice del progetto guidata dai dati, che coniuga sperimentazione scientifica, digitalizzazione e trasferibilità industriale, promuovendo infrastrutture intelligenti e resilienti. Al contempo l'elaborazione di un codice cromatico armonico e verificabile in termini percettivi risponde ai principi dell'SDG 12 (produzione e consumo responsabili), ponendo la comunicazione visiva come leva per la trasparenza informativa, la responsabilizzazione degli attori e la diffusione di pratiche sostenibili. Infine l'intero impianto si orienta verso l'SDG 13 (azione per il clima), collocandosi in una visione sistemica della decarbonizzazione, che riconosce nella dimensione simbolica e narrativa un fattore abilitante della transizione.

Pur mantenendo una coerenza generale con gli obiettivi dell'Agenda 2030, il progetto HEHS evidenzia alcuni punti di bilanciamento tra obiettivi differenti. Il perseguimento dell'efficienza energetica (SDG 7) e dell'innovazione infrastrutturale (SDG 9) richiede infatti l'impiego di materiali e tecnologie avanzate che possono comportare impatti ambientali e costi di produzione superiori nelle fasi iniziali di sviluppo. Analogamente l'applicazione di un codice cromatico armonico orientato all'SDG 12 implica una mediazione tra rigore scientifico e accessibilità comunicativa, al fine di garantire una comprensione inclusiva senza ridurre la complessità informativa. Questi compromessi, più che rappresentare limiti, costituiscono elementi di consapevolezza progettuale che rafforzano la capacità del sistema di operare in modo responsabile e adattivo all'interno dei diversi ambiti dell'Agenda 2030.

Conclusioni | Il progetto HEHS, attraverso l'integrazione tra sperimentazione scientifica e progettazione comunicativa, ha generato un modello operativo in cui soluzioni tecniche e codici visivi convergono in una visione sistemica della transizione energetica. La validazione sperimentale della formazione di idrati in miscele ternarie H_2-CO_2-idrocarburi leggeri in condizioni porose (Di Giuseppe and Gambelli, 2024) e l'efficienza dello stoccaggio mediante clatrati con CO_2 / N_2 (Gambelli, Rossi and Gigliotti, 2024) confermano la trasferibilità del sistema HEHS in scenari applicativi reali, garantendone affidabilità termodinamica e sostenibilità ambientale.

Parallelamente la costruzione di una palette cromatica fondata su criteri percettivi, armonie teoriche (Itten, 1961) e validazione basata sull'LLM, risponde all'urgenza di superare i limiti comunicativi dell'attuale Hydrogen Colour Classification (Kusoglu, 2022; Chew et alii, 2023). Il gradiente proposto introduce una sintassi cromatica continua e modulare, capace di rappresentare le traiettorie evolutive della filiera idrogeno in chiave non dicotomica ma relazionale. La classificazione visiva si emancipa dal paradigma prescrittivo dei codici-colore fissi, per configurarsi come sistema dinamico e semanticamente fondato.

Questa articolazione consente di connettere eterogeneità tecnologica e accessibilità cognitiva, offrendo un framework replicabile per la comunicazione ambientale. Il sistema può essere applicato a etichettature tecniche, interfacce informative, comunicazione istituzionale e progetti di eco-design, promuovendo un nuovo ruolo del Visual Design nei processi di sostenibilità. La centralità della dimensione cromatica, spesso relegata a funzione decorativa, emerge come fattore di senso e coesione simbolica in un contesto energetico complesso. In tale ottica la proposta contribuisce a delineare una prospettiva epistemologica alternativa, in cui la rappresentazione grafica non è mera traduzione di contenuti tecnici, ma forma di conoscenza che orienta percezioni, decisioni e comportamenti.

In the context of ecological transition, hydrogen is emerging as a strategic vector for the decarbonisation of energy systems, assuming a central role in political agendas, industrial strategies, and scientific research (European Commission, 2019, 2021b; IEA, 2019; IPCC, 2023; Vivanco-Martín and Iranzo, 2023). Its capacity to integrate into hard-to-abate sectors makes it essential for achieving climate neutrality, as outlined in the European Green Deal, the Fit for 55 package, and the REPowerEU Plan (European Commission, 2019, 2021a, 2022). In Italy, the Ministry of the Environment and Energy Security (MASE, 2023a), the National Hydrogen Strategy (MISE, 2020) and the PNRR (Governo Italiano, 2023) promote the creation of hydrogen valleys and the adoption of advanced technologies (Battisti and Calvano, 2024),

also through regulatory instruments such as Directives 2018/2001 and 2023/2413 (European Parliament and Council, 2018, 2023).

Within this framework lies the High Efficiency Hydrogen Storage (HEHS) project, funded by the PNRR programme, which proposes an innovative hydrogen storage and transport system based on hydrate clathrates. These crystalline structures, capable of trapping gases at low pressures and moderate temperatures, represent a promising alternative to conventional technologies in terms of efficiency, safety, and sustainability (Davoodabadi, Mahmoudi and Ghasemi, 2021; Veluswamy, Kumar and Linga, 2014; Di Giuseppe and Gambelli, 2024; Gambelli, Rossi and Gigliotti, 2024). The most recent literature highlights their potential, supported by experimental evidence and predictive models applied to complex mixtures under real porous conditions (Gambelli, Rossi and Gigliotti, 2025; Giampaoli et alii, 2025; Paltsev et alii, 2021).

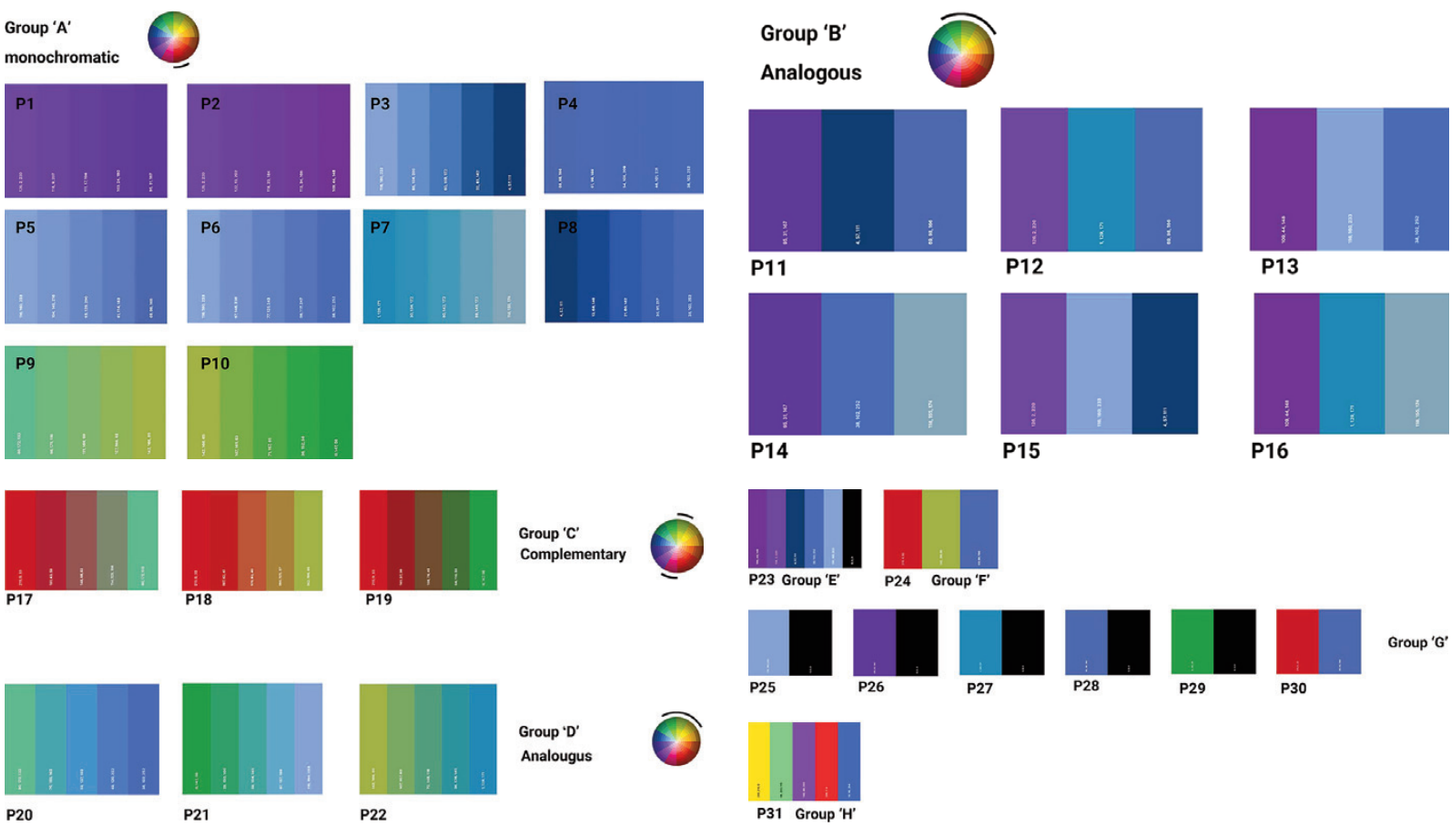
Scientific experimentation is supported by a data-driven methodological framework based on thermodynamic simulations and machine learning techniques (Jordan and Mitchell, 2015; Giampaoli et alii, 2025), as well as on cognitive validation systems employing Large Language Models (LLMs). Recent studies have shown that such models are capable of replicating evaluations consistent with human colour perception paradigms (Marjieh et alii, 2023), simulating complex psychological behaviours (Aher, Arriaga and Kalai, 2023), and generating responses comparable to those of human experts (Binz and Schulz, 2023), thereby opening new perspectives for the analysis of visual interactions.

The energy transition also requires a symbolic and cultural design of processes that can guide public perception and foster informed consensus. In this perspective, colour is explored as an active tool for representing hydrogen. The paper aims to overtake the current Hydrogen Colour Classification, affected by semantic arbitrariness, perceptual inconsistencies, and a lack of shared standards (Kusoglu, 2022; Ocenic, 2023), by proposing a chromatic coding model grounded in scientific, perceptual, and design criteria. The proposal is based on three hypotheses: colour functions as an effective semantic code in environmental communication; chromatic representation must be accessible, coherent, and recognisable; validation can be conducted through LLM-based simulations capable of reproducing differentiated perceptual profiles (Luo et alii, 2025; Aher, Arriaga and Kalai, 2023). Such models provide a statistical framework for anticipating interpretative patterns, conducting controlled evaluations, and enhancing the reliability of visual systems. The study therefore seeks to demonstrate how colour theory, integrated with artificial intelligence, can serve as a strategic design device for community engagement in the green transition, providing robust, scalable, and cognitively grounded communication tools.

In light of these premises, the contribution investigates the potential of colour as a cognitive device in representing energy transition, developing a visual coding model for hydrogen based on theoretical, perceptual, and communicative criteria. The objective is to demonstrate the possibility of integrating

	Section	Objective	Type of response
1	Chromatic association	To analyse the semantic relationships between colour and the concepts of sustainability and innovation	Multiple choice
2	Harmonic preference	To assess the tendency towards palettes based on colour theory or experimental solutions	Single choice
3	Visual identity	To identify the palette perceived as most representative for hydrogen-related brand communication	Single choice
4	Gradient interpretation	To explore the perception of the green–blue gradient and its coherence with the values of the energy transition	Short descriptive response
5	Overall feedback	To collect general opinions on the communicative effectiveness of the proposed chromatic model	Open-ended

Tab. 1 | Structure and typology of the perceptual questionnaire (credit: the Authors, 2025).



Figg. 5-8 | Palettes used in the survey (credits: M. Meschini, 2025).

colour theory, scientific experimentation, and artificial intelligence within a design framework capable of conveying the complexity of energy processes through accessible and verifiable visual languages.

The work is structured in four parts: a theoretical framework on the relationship between energy transition and visual codes, the description of the method for constructing and validating the chromatic model, the presentation of the results of the perceptual survey based on simulated profiles, and the proposal of a new visual classification of hydrogen grounded on CO_2 emission intensity. Due to its interdisciplinary nature, the contribution offers potential relevance within the scientific community by proposing a replicable model of environmental communication that connects technical knowledge and visual culture in the processes of ecological transition.

Energy Transition and visual codes | The energy transition, beyond representing a technological challenge, implies a cultural transformation that demands new languages, symbolic systems, and communicative infrastructures. In this context, visual communication is not only an informative medium but also an epistemic and relational device capable of generating understanding and engagement (Tufte, 2006; Ware, 2004; Valenti et alii, 2024). Colour, in particular, plays a central role as a cognitive and semiotic system (Albers, 1963; Itten, 1961; Bertin, 1983; Kress and van Leeuwen, 2020; Lupton, 2017), enabling perceptual structures and shared meanings. In recent studies, the colour reflection has progressively expanded from the perceptual to the cognitive and communicative domain, defining it as an interpretative device of visual and cultural reality (Gage, 1999; Heller, 2009; Fairchild, 2013; Falcinelli, 2017). These contributions have redefined the role of colour as an element of symbolic construction, capable of integrating aesthetic, psychological, and informational dimensions, offering new tools for the representation of complex processes and for the design of environmental communication.

From this perspective, Visual Design can be understood as a tool for cognitive sustainability, combining accessibility with scientific rigour (Casiddu, Burlando and Chen, 2024; Valenti et alii, 2024; Zannoni et alii, 2024). The ability of colour to build symbolic relationships is now recognised in environmental communication and complex design processes. In the case of hydrogen, the Hydrogen Colour Classification associates hues with specific production processes; although conceived initially for dissemination purposes, it has been adopted in institutional documents and communication strategies (IEA, 2021; Confindustria, 2021; Reitsma, 2023), acquiring a prescriptive value devoid of theoretical grounding.

The literature has highlighted several limitations: perceptual arbitrariness (Kusoglu, 2022), lack of shared standards (Ocenic and Tantau, 2023), difficulty in representing hybrid technologies (Ajanovic, Sayer and Haas, 2022; Noussan et alii, 2021), and limited inclusivity toward emerging solutions (Chew et alii, 2023; Paltsev et alii, 2021). Boretti (2021) proposes to expand the chromatic range, introducing hues such as white for technologies like solar pyrolysis. Alternatively, recent studies suggest that models based on chromatic gradients can express the relationships between energy sources and emission intensities (Arcos and Santos, 2023; Vezzoni, 2024).

In such approaches, colour assumes an interpretative function, becoming a cognitive interface be-

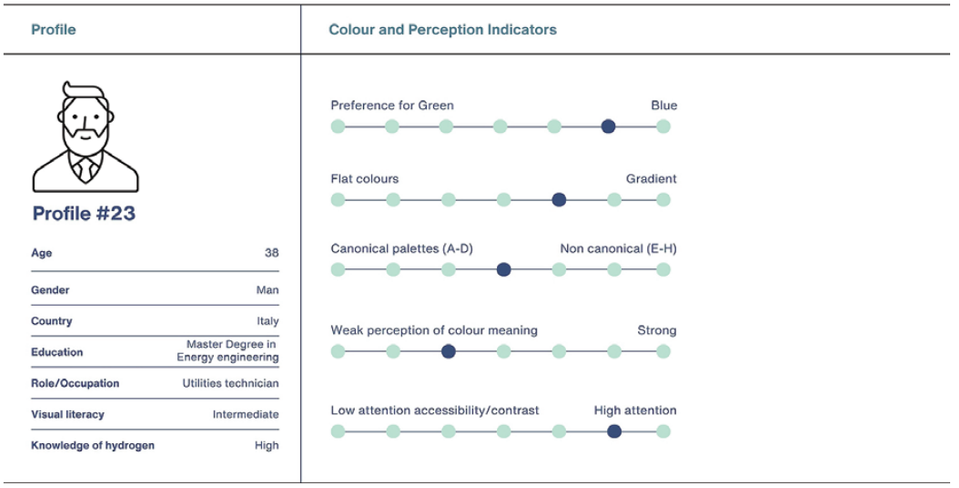
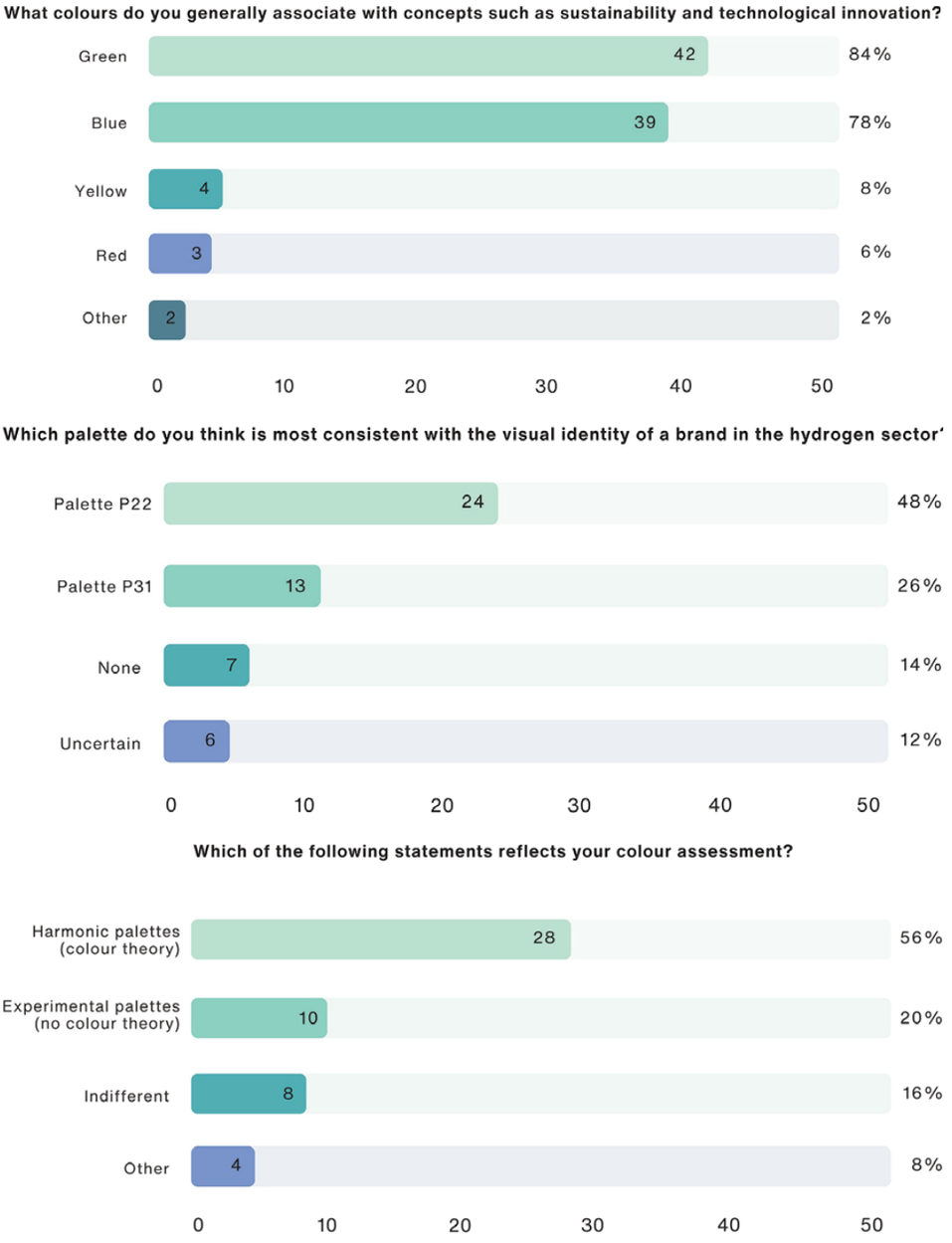


Fig. 9 | Example of profile obtained using Large Language Model systems (credit: M. Meschini, 2025).



Figg. 10-12 | Some answers to the survey questions (credits: M. Meschini, 2025).

tween complex systems and visual narratives (Bertin, 1983; Kress and van Leeuwen, 2020). The construction of accessible visual languages aligns with the paradigms of sustainability and the circular economy, contributing to the qualitative redefinition of development (Capra and Luisi, 2014; Raworth, 2017; Sachs, 2019; Hickel, 2017): within this framework, environmental communication helps orient behaviours and collective representations (Rawsthorn and Antonelli, 2022; Manzini, 2015).

Within this scenario, the HEHS project serves as a case study in which scientific research and visual communication are integrated into a harmonious chromatic syntax, empirically validated and replicable. The adoption of visual systems based on gradients, accessibility (W3C, 2025) and perceptual recognisability contributes to the construction of a symbolic ecosystem for transition, as also outlined in European and national policy documents (European Commission, 2021b; European Parliament and Council, 2023; MISE, 2020; MASE, 2023b; Confindustria, 2021).

Construction of the chromatic model | The development of a chromatic system for the visual representation of hydrogen was structured according to an integrated methodology that combined the critical analysis of existing visual identities with the theoretical construction of a harmonic repertoire and subsequent perceptual validation (Fig. 1). The initial sample consisted of nineteen international case studies, selected among operators, consortia, public bodies, and companies involved in the production, distribution, and promotion of hydrogen (Figg. 2, 3). The logos and graphic systems associated with each entity were analysed by directly extracting RGB and HSB colour values using vector tools and parametric reading software (Fig. 4).

At the same time, the compliance of colour combinations with the contrast criteria established by WCAG 2.1 was verified to assess the degree of visual accessibility from a communicative perspective. The analysis also included typographic components, compositional structure, and predominant graphic techniques, as well as the semiotic reading of the visual signs employed, with reference to the theory of perception and visual communication (Itten, 1961; Arcos and Santos, 2023).

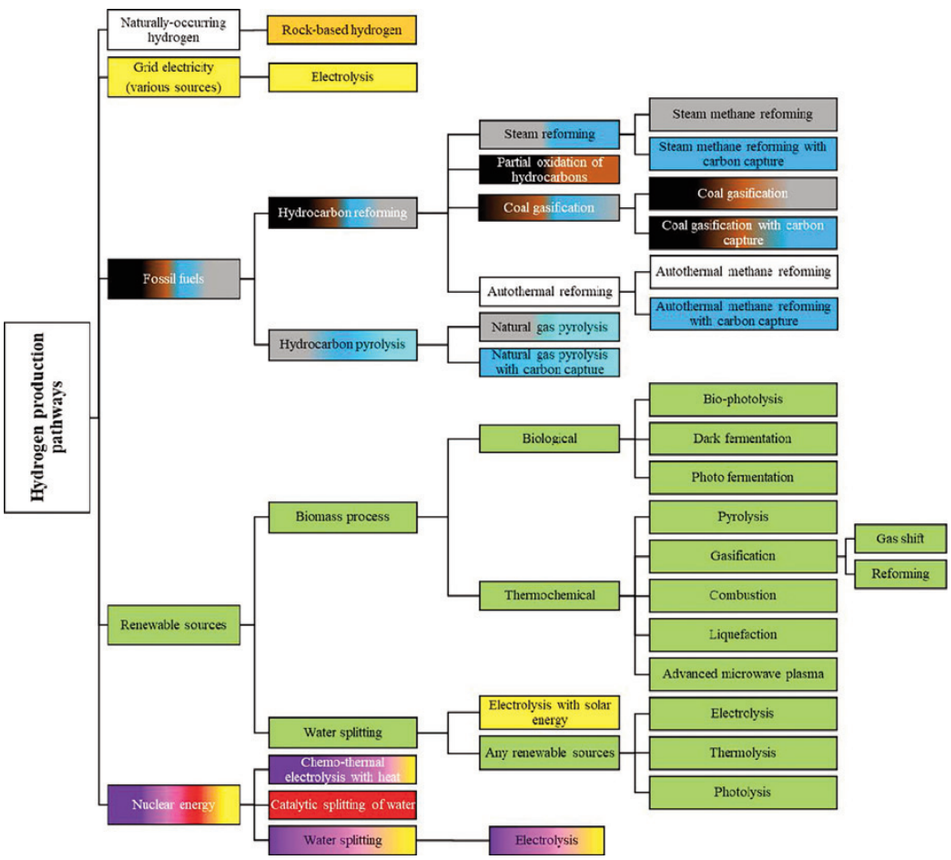
For the validation phase, the research adopted a controlled semantic simulation methodology, based on the use of Large Language Models (LLMs) to generate user profiles. Instead of traditional administration to a real sample, an artificial population of fifty simulated individuals was constructed, modelled according to demographic, cultural, and professional variables. These profiles were calibrated to reproduce the typological variety of a potential user base, maintaining internal consistency among role, education, context, and level of visual literacy. Moreover, the overall approach, from the theoretical phase to perceptual validation, was conceived as a structured experimental method, designed to ensure internal coherence and facilitate reuse in analogous research contexts.

The questionnaires, semi-structured and primarily descriptive, were organised into five main sections (Tab. 1) and administered to the simulated profiles through a controlled iterative interaction, in which the model was guided to respond according to semantic constraints, narrative coherence, and plausible behaviour. This process enabled exploration of diverse response scenarios, representative of different levels of perceptual sensitivity, communicative competence, and symbolic awareness, without the logistical and statistical limitations typical of real-world surveys.

The process generated a rich dataset, with convergent outcomes in terms of chromatic preference, symbolic effectiveness, and perceptual recognisability, which were interpreted in light of the initial hypotheses and theoretical principles adopted. The adoption of an LLM-based simulation was not intended to replace empirical investigation, but rather to act as an exploratory and reflective device, consistent with an ethical approach to communicative design, in which artificial intelligence functions as a cognitive infrastructure capable of supporting the generation of evaluative scenarios, expanding the horizon of design possibilities, and testing the symbolic coherence of visual solutions across differentiated contexts.

Chromatic palettes and outcomes of the perceptual survey | Starting from the systematisation of chromatic data, a repertoire of thirty-one reference palettes was constructed, each composed of three to five colours and organised into eight harmonic groups, labelled A to H (Figg. 5-8). The first four groups (A-D) follow the canons of Itten's theory (monochromatic, analogous, complementary). In contrast, groups E-H derive from configurations recurrent in the visual systems of the energy sector. The palettes were reconstructed in vector format, encoded, and prepared for perceptual verification through controlled semantic simulation.

Perceptual validation was conducted by simulating 50 profiles generated by LLMs calibrated on demographic, educational, and professional variables. The analysis of responses revealed a consistent narrative coherence, allowing not only the identification of general chromatic preferences but



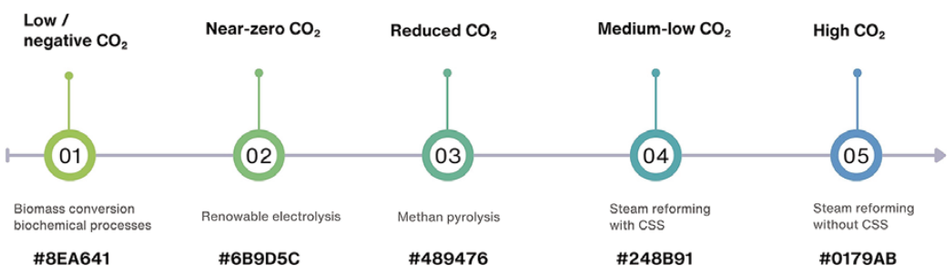


Fig. 13 | Current classification of hydrogen with different colour (source: Ocenic and Tantau, 2023).

Fig. 14 | Proposal for a new classification (credit: M. Meschini, 2025).

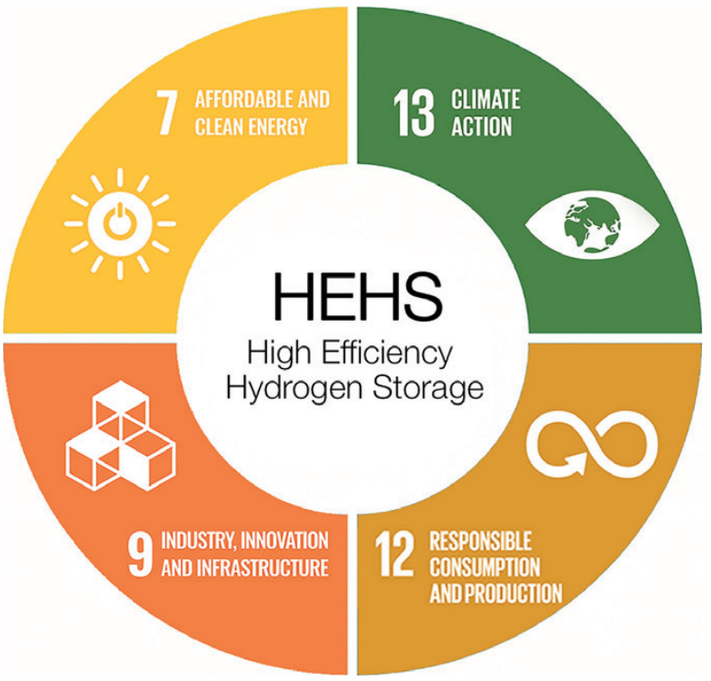


Fig. 15 | Correlation map between the HEHS project and the four Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda (credit: M. Meschini, 2025).

also the underlying motivations behind the choices (Fig. 9). The analysis highlights an evident symbolic polarisation: green and blue are respectively associated with environmental sustainability and technological innovation (Fig. 10).

This semantic convergence, widespread and transversal across the different profiles, confirms the relevance of these hues as privileged chromatic codes in energy communication. Alongside this evidence, there is a strong preference for palettes constructed according to harmonic relationships derived from colour theory (Fig. 11), perceived as more legible, stable, and appropriate for institutional contexts. Non-canonical configurations, while occasionally recognised as original, were considered less effective in the immediate transmission of meaning. From this emerges a principle of perceptual continuity, in which the theoretical solidity of chromatic composition translates into a higher degree of comprehension and recognisability.

The final validation revealed a clear preference for the 'P22' palette (48%), built on a green-blue gradient consistent with colour theory (Fig. 12), followed by 'P31' (26%), characterised as an experimental palette. The strength of this choice lies not only in its aesthetic appeal but, above all, in its ability to integrate the two central symbolic poles of the energy transition into a single visual continuum: naturalness and technology. The green-blue gradient that characterises it was perceived as a dynamic and evolutionary representation, capable of narrating transformation processes without interruption, in a chromatic balance that combines perceptual coherence, tonal harmony, and functional readability, in accordance with WCAG 2.1 criteria.

The validation conducted through LLM-based models, while offering a high degree of semantic and narrative control, reflects the dimension of a simulated experiment, designed to ensure perceptual coherence under controlled conditions. This approach, although effective in guaranteeing replicability and methodological transparency, must be interpreted within a representational rather than an experiential horizon, and should thus be understood as a cognitive exploration tool. Similarly, the selection of chromatic cases, derived from consolidated theoretical and perceptual criteria, is limited to a circumscribed application domain – visual communication in the energy sector – and may be further extended and verified in future experimental contexts. Finally, the application of the model highlights some transferability barriers, related to differing levels of visual literacy and to the normative and cultural variability of contexts, which represent both a limitation and a potential area for future research development.

Beyond the Hydrogen Colour Classification | The results of the perceptual survey confirm, in an articulated manner, the validity of the theoretical premise underlying the HEHS project: the need to overcome the current chromatic system of hydrogen, rigid and conventional, in favour of a visual language based on perceptual continuity, symbolic coherence, and semantic legibility. As highlighted by several recent studies (Kusoglu, 2022; Ocenic, 2023; Chew et alii, 2023), the Hydrogen Colour Classification presents several critical issues: the absence of a shared standard, overlapping between hues and production processes, theoretical inconsistencies, and limitations in representing hybrid technologies (Fig. 13).

The approach based on fixed labels appears inadequate to reflect the dynamic complexity of the hydrogen value chain and to support the construction of a recognisable and shared visual imagery. Along this line, Boretti (2021) also calls for the inclusion of new technological configurations, currently excluded from official taxonomies, within the chromatic repertoire, reinforcing the urgency of an epistemologically grounded reformulation.

The five selected hues, belonging to the same blue-green analogous axis, can be reinterpreted as segments of a classificatory gradient that can represent the complexity and variability of production processes. The proposed classification organises the chromatisms into a progressive sequence ordered by CO_2 emission intensity, adopting as its main parameter the degree of sustainability of hydrogen production technologies (Fig. 14).

The first colour of the palette (#8EA641) corresponds to very low or negative CO_2 levels, associated with biochemical processes and biomass conversion; the second colour (#6B9D5C) represents near-zero CO_2 levels, exemplified by electrolysis powered by renewable sources; the third colour (#489476) refers to reduced CO_2 levels, typical of low-carbon hybrid solutions such as methane pyrolysis; the fourth colour (#248B91) corresponds to medium-low CO_2 levels, linked to steam reforming with Carbon Capture and Storage (CCS); finally, the fifth colour (#0179AB) identifies high CO_2 levels, representative of mature technologies still characterised by high emission intensity, such as steam reforming without capture systems. This gradual logic enables overcoming the segmented approach, allowing the visual representation of liminal zones and evolutionary trajectories. Colour thus ceases to be a mere label and becomes a visual syntax: a codifiable, interpretable, and adaptive system capable of combining perceptual coherence, theoretical soundness (Itten, 1961), and communicative potential. The empirical validation confirms its effectiveness, opening the way to the construction of shared visual codes through design processes that integrate science, design, and representation.

Strategic Vision: SDGs and Cross-cutting Impacts | The HEHS project is configured as an integrated device capable of activating multi-level synergies within the framework of the 2030 Agenda for Sustainable Development (UN, 2015), with particular reference to four key goals (Fig. 15). First, SDG 7 (Affordable and Clean Energy) is directly addressed through the development of a high-efficiency hydrogen storage system based on innovative technologies with low environmental impact. The adoption of hydrate clathrates, combined with predictive models and thermodynamic simulations, steers research toward scalable, safe, and sustainable technical solutions.

SDG 9 (Industry, Innovation and Infrastructure) is reflected in the project's data-driven matrix, which integrates scientific experimentation, digitalisation, and industrial transferability to promote intelligent and resilient infrastructures. At the same time, the elaboration of a harmonic and perceptually verifiable chromatic code aligns with the principles of SDG 12 (Responsible Consumption and Production), positioning visual communication as a lever for transparency in information, stakeholder accountability, and the dissemination of sustainable practices. Finally, the overall framework aligns with SDG 13 (Climate Action), situating itself within a systemic vision of decarbonisation that recognises the symbolic and narrative dimensions as enabling factors in the transition.

While maintaining overall coherence with the objectives of the 2030 Agenda, the HEHS project also reveals specific balancing points among different goals. The pursuit of energy efficiency (SDG 7) and infrastructural innovation (SDG 9) necessarily requires the use of advanced materials and technologies that may involve higher environmental impacts and production costs during initial development phases. Similarly, the application of a harmonic chromatic code consistent with SDG 12 implies a mediation between scientific rigour and communicative accessibility, aiming to ensure inclusive understanding without reducing informational complexity. These trade-offs, rather than representing limitations, constitute elements of design awareness, reinforcing the project's capacity to operate responsibly and adaptively within the interconnected framework of the 2030 Agenda.

Conclusions | Through the integration of scientific experimentation and communicative design, the HEHS project has generated an operational model in which technical solutions and visual codes converge within a systemic vision of energy transition. The experimental validation of hydrate formation in ternary mixtures of H_2-CO_2-light hydrocarbons under porous conditions (Di Giuseppe and Gambelli, 2024) and the efficiency of storage through CO_2 / N_2 hydrates (Gambelli, Rossi and Gigliotti, 2024) confirm the transferability of the HEHS system to real-world application scenarios, ensuring its thermodynamic reliability and environmental sustainability.

In parallel, the construction of a chromatic palette grounded in perceptual criteria, theoretical harmonies (Itten, 1961), and LLM-based validation responds to the urgency of overcoming the communicative limits of the current Hydrogen Colour Classification (Kusoglu, 2022; Chew et alii, 2023). The proposed gradient introduces a continuous and modular chromatic syntax, capable of representing the evolutionary trajectories of the hydrogen supply chain in a relational rather than dichotomous manner. The visual classification thus moves beyond the prescriptive paradigm of fixed colour codes, configuring itself as a dynamic and semantically grounded system.

This articulation enables the integration of technological heterogeneity and cognitive accessibility, offering a replicable framework for environmental communication. The system can be applied to technical labelling, information interfaces, institutional communication, and eco-design projects, promoting a new role for Visual Design within sustainability processes. The centrality of the chromatic dimension-often relegated to a merely decorative function-emerges here as a factor of meaning and symbolic cohesion within a complex energy context. In this light, the proposal contributes to defining an alternative epistemological perspective, in which graphic representation is not a mere translation of technical content but a form of knowledge that orients perceptions, decisions, and behaviours.

Notes

1) Next Generation EU Funds, Project co-financed under the Public Notice pursuant to Article 1, paragraph 5, letter a, of the Ministerial Decree of 23 December 2021 – Research Projects for Hydrogen within the PNRR-M2C2 Line of Action 3.5; project code RSH2B_000052; CUP F19J2200183 0004; duration 36 months; Scientific Director Prof. F. Cotana.

References

Aher, M., Arriaga, R. I. and Kalai, A. T. (2023), "Using large language models to simulate multiple humans and replicate human subject studies", in *Proceedings of the 45th Annual Meeting of the Cognitive Science Society, Sydney, Australia, July 26-29, 2023*, pp. 1-43. [Online] Available at: doi.org/10.48550/arXiv.2208.10264 [Accessed 30 September 2025].

Ajanovic, A., Sayer, M. and Haas, R. (2022), "The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen", in *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, issue 57, pp. 24136-24154. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094 [Accessed 30 September 2025].

Albers, J. (1963), *Interaction of Color*, Yale University Press, New Haven.

Arcos, J. M. M. and Santos, D. M. F. (2023), "Hydrogen Colour Spectrum – Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production", in *Gases*, vol. 3, issue 1, pp. 25-46. [Online] Available at: doi.org/10.3390/gases3010002 [Accessed 30 September 2025].

Battisti, A. and Calvano, A. (2024), "Hydrogen Valleys – Scenari di transizione energetica e sviluppo locale per città medie | Hydrogen Valleys – Energy transition and local development scenarios for medium-sized cities", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 48-57. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1532024 [Accessed 30 September 2025].

Bertin, J. (1983), *Semiology of Graphics – Diagrams, networks, maps*, University of Wisconsin Press, Madison.

Binz, M. and Schulz, E. (2023), "Using cognitive psychology to understand GPT-3", in *PNAS | Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 120, issue 6, article e2218523120, pp. 1-10. [Online] Available at: doi.org/10.1073/pnas.2218523120 [Accessed 30 September 2025].

Boretti, A. (2021) "White is the color of hydrogen from concentrated solar energy and thermochemical water splitting cycles", in *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, issue 39, pp. 20790-20791. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.178 [Accessed 30 September 2025].

Capra, F. and Luisi, P. L. (2014), *The Systems View of Life – A Unifying Vision*, Cambridge University Press, Cambridge.

Casiddu, N., Burlando, F. and Chen, B. (2024), "Human-de-centred design – Verso una (nuova) era della sofferenza | Human-de-centred Design – Towards a (new) era of suffering", *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 16, pp. 242-249. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/16212024 [Accessed 30 September 2025].

Chew, Y. E., Cheng, X. H., Loy, A. C. M., How, B. S. and Andiappan, V. (2023), "Beyond the Colours of Hydrogen – Opportunities for Process Systems Engineering in Hydrogen Economy", in *Process Integration and Optimization for Sustainability*, vol. 7, Springer, Cham, pp. 941-950. [Online] Available at: doi.org/10.1007/s41660-023-00324-z [Accessed 30 September 2025].

Confindustria (2021), *Piano d'Azione per l'Idrogeno – Settembre 2020*. [Online] Available at: public.confindustria.it/repository/2025/06/09121127/documenti-piano-dazione-per-lidrogeno-PositionPaper_Pianodazioneperlidrogeno_ott2020_Confindustria.pdf [Accessed 30 September 2025].

Davoodabadi, A., Mahmoudi, A. and Ghasemi, H. (2021), "The potential of hydrogen hydrate as a future hydrogen storage medium", in *iScience*, vol. 24, issue 1, article 101907, pp. 1-35. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.isci.2020.101907 [Accessed 30 September 2025].

Di Giuseppe, A. and Gambelli, A. M. (2024), "CO_2 Storage in Deep Oceanic Sediments in the form of Hydrates – Energy Evaluation and Advantages Related to the Use of N_2-Containing Mixtures", in *Energies*, vol. 17, issue 16, article 4102, pp. 1-17. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en17164102 [Accessed 30 Settembre 2025].

European Commission (2022), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – REPowerEU Plan*, document 52022DC0230, COM/2022/230 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022DC0230 [Accessed 30 September 2025].

European Commission (2021a), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – Fit for 55 – Delivering the EU's 2030 climate target on the way to climate neutrality*, document 52021DC0550, COM/2021/550 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0550 [Accessed 16 September 2025].

European Commission (2021b), *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A Hydrogen Strategy for a Climate-neutral Europe*, document 52020DC0301, COM/2020/301 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/

?uri=CELEX%3A52020DC0301 [Accessed 15 March 2024].

European Commission (2019), *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – The European Green Deal*, document 52019DC0640, 640 final. [Online] Available at: eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN [Accessed 30 September 2025].

European Parliament and Council (2023), *Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652*, document 32023L2413, PE/36/2023/REV/2. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj [Accessed 30 September 2025].

European Parliament and Council (2018), *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources*, document 32018L2001, PE/48/2018/REV/1. [Online] Available at: data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj [Accessed 30 September 2025].

Fairchild, M. D. (2013), *Color Appearance Models*, John Wiley & Sons, Chichester.

Falcinelli, R. (2017), *Cromorama – Come il colore ha cambiato il nostro sguardo*, Einaudi, Torino.

Gage, J. (1999), *Colour and Meaning – Art, Science and Symbolism*, University of California Press, Berkley and Los Angeles.

Gambelli, A. M., Rossi, F. and Gigliotti, G. (2025), "Measure of the Hydrate-Liquid-Gas Phase Boundary Thermodynamic Conditions for Ethane within a Pure Quartz Porous Sand – Differences from the Ideal Equilibrium Associated to the Sediment", in *Heat Transfer Research*, vol. 56, issue 15, pp. 43-56. [Online] Available at: doi.org/10.1615/HeatTransRes.2025057469 [Accessed 30 September 2025].

Gambelli, A. M., Rossi, F. and Gigliotti, G. (2024), "Cold Energy Storage via Hydrates Production with Pure CO_2 and CO_2/N_2 (70/30 and 50/50 vol%) Mixtures – Quantification and Comparison between Energy Stored and Energy Spent", in *Energies*, vol. 17, issue 9, article 2211, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en17092211 [Accessed 30 September 2025].

Giampaoli, D., Parodi, G., Cipollini, F., Vattakunnel, S., Gambelli, A. M. and Oneto, L. (2025), "Partial Knowledge Predictive Models for Hydrocarbon Storage", in Pereira, A., Fernandes, F. P., Coelho, J. P., Teixeira, J. P., Lima, J., Pacheco, M. F., Oneto, L. and Lopes, R. P. (eds), *Optimisation, Learning Algorithms and Applications*, Springer, Cham, pp. 67-82. [Online] Available at: doi.org/10.1007/978-3-032-00140-5_5 [Accessed 30 September 2025].

Governo Italiano (2023), *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza – #NextGenerationItalia*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/documenti/PNRR_Aggiornato.pdf [Accessed 30 September 2025].

Heller, E. (2009), *Psychologie de la couleur – Effets et symboliques*, Pyramyd, Paris.

Hickel, J. (2017), *The Divide – A Brief Guide to Global Inequality and its Solutions*, Random House, London.

IEA – International Energy Agency (2021), *Global Hydrogen Review 2021*. [Online] Available at: iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021 [Accessed 30 September 2025].

IEA – International Energy Agency (2019), *The Future of Hydrogen – Seizing Today's Opportunities*. [Online] Available at: iea.org/reports/the-future-of-hydrogen [Accessed 30 September 2025].

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023), *Climate Change 2023 – Synthesis Report – Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Online] Available at: doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647 [Accessed 30 September 2025].

Itten, J. (1961), *The Art of Color – The subjective experience and objective rationale of color*, Van Nostrand Reinhold, New York.

Jordan, M. I. and Mitchell, T. M. (2015), "Machine learning – Trends, perspectives, and prospects", in *Science*, vol. 349, issue 6245, pp. 255-260. [Online] Available at: doi.org/10.1126/science.aaa8415 [Accessed 30 September 2025].

Kress, G. and van Leeuwen, T. (2020), *Reading Images – The Grammar of Visual Design*, Routledge, London. [Online] Available at: doi.org/10.4324/9781003099857 [Accessed 30 September 2025].

Kusoglu, A. (2022), "(Re)Defining Clean Hydrogen – From Colors to Emissions", in *The Electrochemical Society Interface*, vol. 31, issue 47, pp. 47-51. [Online] Available at: doi.org/10.1149/2.F08224IF [Accessed 30 September 2025].

Luo, X., Rechardt, A., Sun, G., Nejad, K. K., Yáñez, F., Yilmaz, B., Lee, K., Cohen, A. O., Borghesani, V., Pashkov, A., Marinazzo, D., Nicholas, J., Salatiello, A., Sucholutsky, I., Minervini, P., Razavi, S., Rocca, R., Yusifov, E., Okalova, T., Gu, N., Ferianc, M., Khona, M., Patil, K. R., Lee, P.-S., Mata, R., Myers, N. E., Bizley, J. K., Musslick, S., Bilgin, I. P., Niso, G., Ales, J. M., Gaebler, M., Murty, N. A. R., Loued-Khenissi, L., Behler, A., Hall, C. M., Dafflon, J., Bao, S. D. and Love, B. C. (2025), "Large language models surpass human experts in predicting neuroscience results", in *Nature Human Behaviour*, vol. 9, pp. 305-315. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41562-024-02046-9 [Accessed 30 September 2025].

Lupton, E. (2017), *Design Is Storytelling*, Cooper Hewitt, Smithsonian Design Museum, New York.

Manzini, E. (2015), *Design, When Everybody Designs – An Introduction to Design for Social Innovation*, MIT Press, Cambridge (MA). [Online] Available at: doi.org/10.7551/mitpress/9873.001.0001 [Accessed 30 September 2025].

Marjieh, R., Sucholutsky, I., van Rijn, P., Jacoby, N., Griffiths, T. L. (2024), "Large language models predict human sensory judgments across six modalities", in *Scientific Reports*, vol. 14, article 21445, pp. 1-12. [Online] Available at: doi.org/10.1038/s41598-024-72071-1 [Accessed 30 September 2025].

MASE – Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (2023a), *Investimento 3.5 – Ricerca e sviluppo sull'idrogeno*. [Online] Available at: mase.gov.it/portale/investimento-3-5-ricerca-e-sviluppo-sull-idrogeno [Accessed 30 September 2025].

MASE – Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (2023b), *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima*. [Online] Available at: mase.gov.it/portale/documents/d/guest/pniec_2023-pdf [Accessed 20 September 2025].

MISE – Ministero dello Sviluppo Economico (2020), *Strategia Nazionale Idrogeno – Linee Guida Preliminari*. [Online] Available at: mimit.gov.it/images/stories/documenti/Strategia_Nazionale_Idrogeno_Linee_guida_preliminari_nov20.pdf [Accessed 30 September 2025].

Noussan, M., Raimondi, P. P., Scita, R. and Hafner, M. (2021), "The role of green and blue hydrogen in the energy transition – A technological and geopolitical perspective", in *Sustainability*, vol. 13, issue 1, article 298, pp. 1-26. [Online] Available at: doi.org/10.3390/su13010298 [Accessed 30 September 2025].

Ocenic, E.-L. (2023), "Harmonizing Hydrogen Colour Codes – Need for an Economic Policy Framework for a Global Hydrogen Market", in *Ovidius University Annals | Economic Sciences Series*, vol. 28, issue 1, pp. 458-465. [Online] Available at: stec.univ-ovidius.ro/html/anale/RO/2023-i1/Section%203/29.pdf [Accessed 30 September 2025].

Ocenic, E. and Tanțău, A. (2023), "Redefining the Hydrogen 'Colours' based on Carbon Dioxide Emissions – A New Evidence-Based Colour Code", in *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*, vol. 17, issue 1, pp. 111-121. [Online] Available at: doi.org/10.2478/picbe-2023-0013 [Accessed 30 September 2025].

Paltsev, S., Morris, J., Kheshgi, H. and Herzog, H. (2021), "Hard-to-abate sectors – The role of industrial Carbon Capture and Storage (CCS) in emission mitigation", in *Applied Energy*, vol. 300, article 117322, pp. 1-11. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117322 [Accessed 30 September 2025].

Raworth, K. (2017), *Doughnut Economics – Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist*, Chelsea Green Publishing, Vermont.

Rawsthorn, A. and Antonelli, P. (2022), *Design Emergency – Building a Better Future*, Phaidon Press, London and New York.

Reitsma, A. (2023), *European Hydrogen Valleys – An Energy Security Perspective*, Doctoral Thesis, University of Groningen, Netherlands. [Online] Available at: heavenn.org/wp-content/uploads/2023/07/Master-thesis_AnniekReitsma_European-Hydrogen-Valleys_an-energy-security-perspective_1-gecomprimeerd.pdf [Accessed 30 September 2025].

Sachs, J. D. (2019), *The Ages of Globalization – Geography, Technology, and Institutions*, Columbia University Press, New York. [Online] Available at: doi.org/10.7312/sach19374 [Accessed 30 September 2025].

Tufte, E. R. (2006), *Beautiful Evidence*, Graphics Press, Cheshire.

UN – United Nations (2015), *Transforming our World – The 2030 Agenda for Sustainable Development*. [Online] Available at: sdgs.un.org/2030agenda [Accessed 2 September 2025].

Valenti, A., Scalisi, F., Sposito, C., Dellamotta, L. and Masserdotti, A. (2024), "Energia, tecnologia emotiva e valore culturale dei dati – Creare consapevolezza nell'utente con lo storytelling | Energy, emotional technology and cultural value of data – Creating user awareness through storytelling", *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 70-83. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/1552024 [Accessed 30 September 2025].

Veluswamy, H. P., Kumar, R. and Linga, P. (2014), "Hydrogen storage in clathrate hydrates – Current state of the art and future directions", in *Applied Energy*, vol. 122, pp. 112-132. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.063 [Accessed 30 September 2025].

Vezzoni, R. (2024), "How clean is the hydrogen economy? – Tracing the connections between hydrogen and fossil fuels", in *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 50, article 100817, pp. 1-16. [Online] Available at: doi.org/10.1016/j.eist.2024.100817 [Accessed 30 September 2025].

Vivanco-Martín, B. and Iranzo, A. (2023), "Analysis of the European Strategy for Hydrogen – A Comprehensive Review", in *Energies*, vol. 16, issue 9, article 3866, pp. 1-36. [Online] Available at: doi.org/10.3390/en16093866 [Accessed 30 September 2025].

W3C – World Wide Web Consortium (2025), *Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.1*. [Online] Available at: w3.org/TR/WCAG21/ [Accessed 30 September 2025].

Ware, C. (2004), *Information Visualisation – Perception for Design*, Morgan Kaufmann, San Francisco (CA).

Zannoni, M., Succini, L., Rosato, L. and Pasini, V. (2024), "Transitional industrial designer – La responsabilità di progettisti e imprese per una transizione sostenibile | Transitional industrial designer – The responsibility of designers and companies for a sustainable transition", in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, vol. 15, pp. 332-343. [Online] Available at: doi.org/10.19229/2464-9309/15282024 [Accessed 30 September 2025].

Printed in December 2025
by The Factory S.r.l.
via Triburtina n. 912 | 00156 Roma (IT)