

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 raffreddamento 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 insegue 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 rinnovabili¹, crisi climatica² e perdita di biodiversità³ 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 precedenti⁴; 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 2050⁵; 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, raffreddamento 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 / ener-

gia / 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 raffreddamento' 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 raffreddamento' capace di trasformare le isole di calore in vere e proprie 'pompe di raffreddamento 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 (Iftekhhar 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

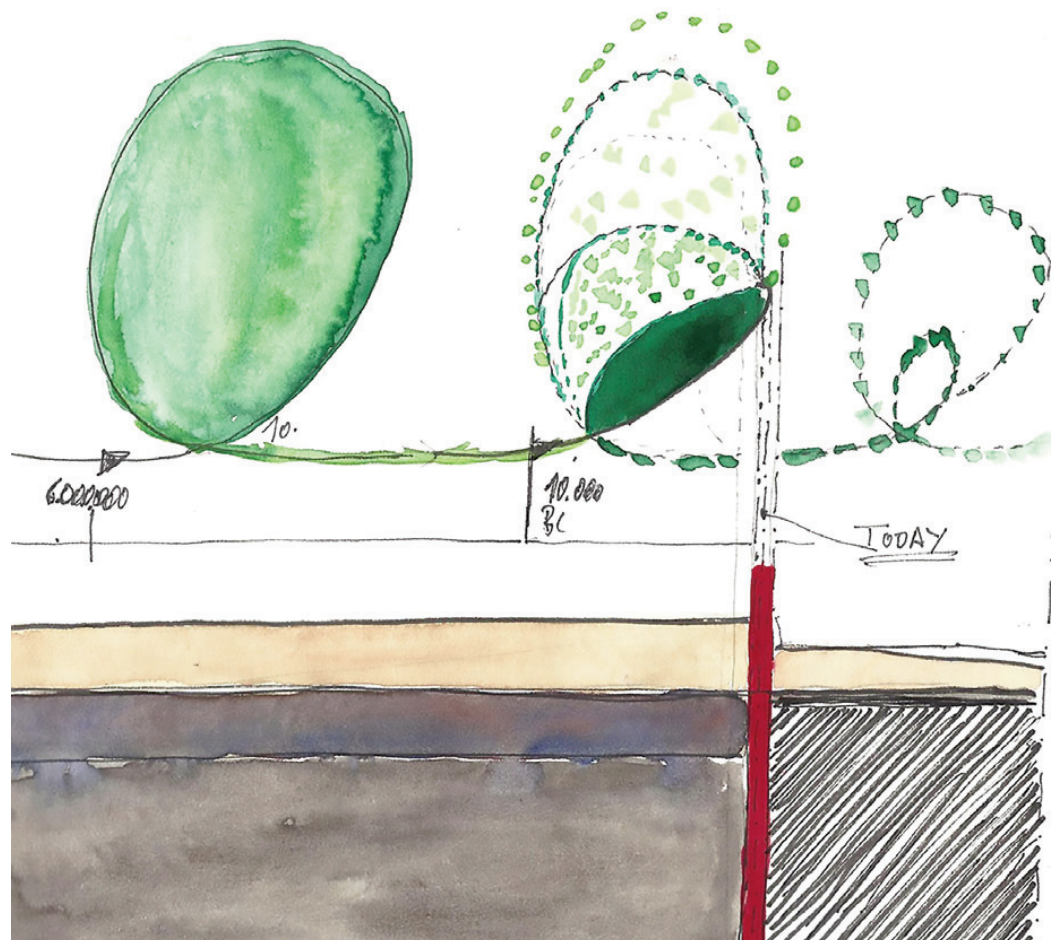


Fig. 2 | A geological explosion, biological implosion (credit: G. Mittersteiner, 2025).

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-monsoonici 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 mi-

liardi 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,

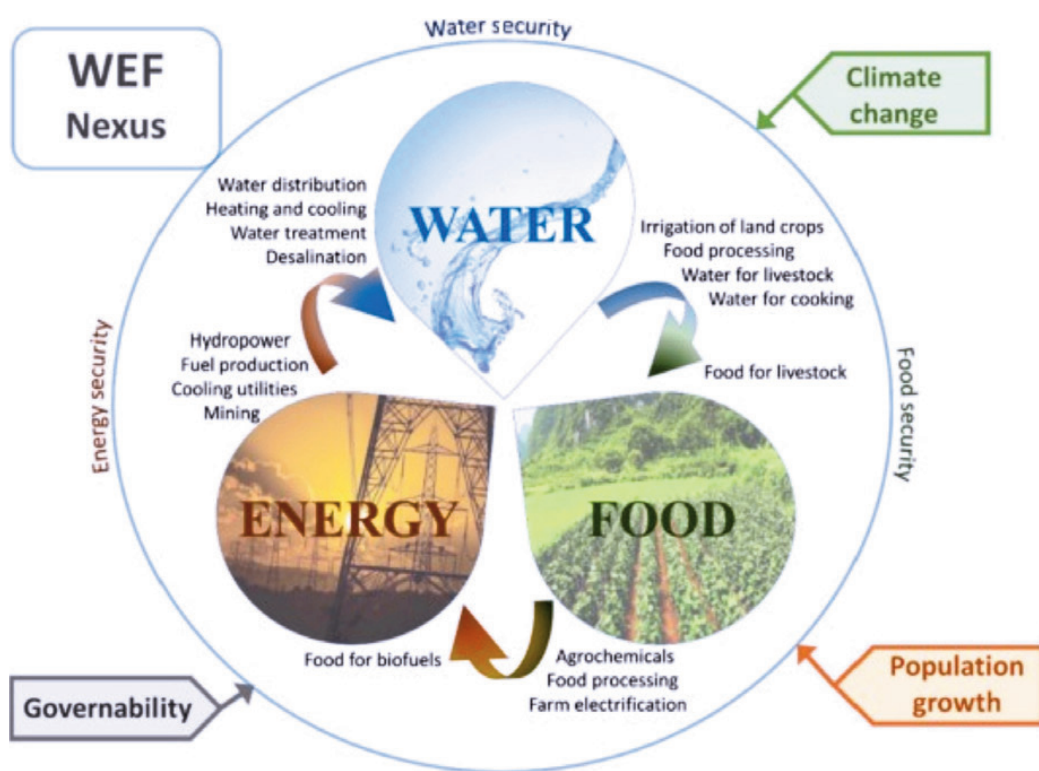


Fig. 3 | The Water / Energy / Food Nexus: this interconnected relationship highlights one of the most significant challenges facing the Earth (source: Mahlknecht, González-Bravo and Loge, 2020).

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 rigenerare 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 polycrisi: 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 (Vercruyse, 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; Bleic 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 mantenuti 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, ri-

carica 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 Stan- tec, 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 modulari, 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 di-

pende 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’ (Baker, 2012) mostrano infatti che la vulnerabilità non dipende solo dalla quantità d’acqua disponibile, ma è legata soprattutto alla capacità istituzionale di gestire 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 – cit-

tadini, politici, tecnici comunali, gestori di rete idrica ed elettrica, protezione civile e pianificatori – prima, durante e dopo l'evento (Vercruyssen, 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 meteorologiche 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 in-

dicatori 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 so-

ciali, 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-occeano 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 CO₂, 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 stra-

tegia 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 ridurre 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 simili. 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 riciccolato 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 recuperare 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 rivendere 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 raffreddamento 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 raffreddamento 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

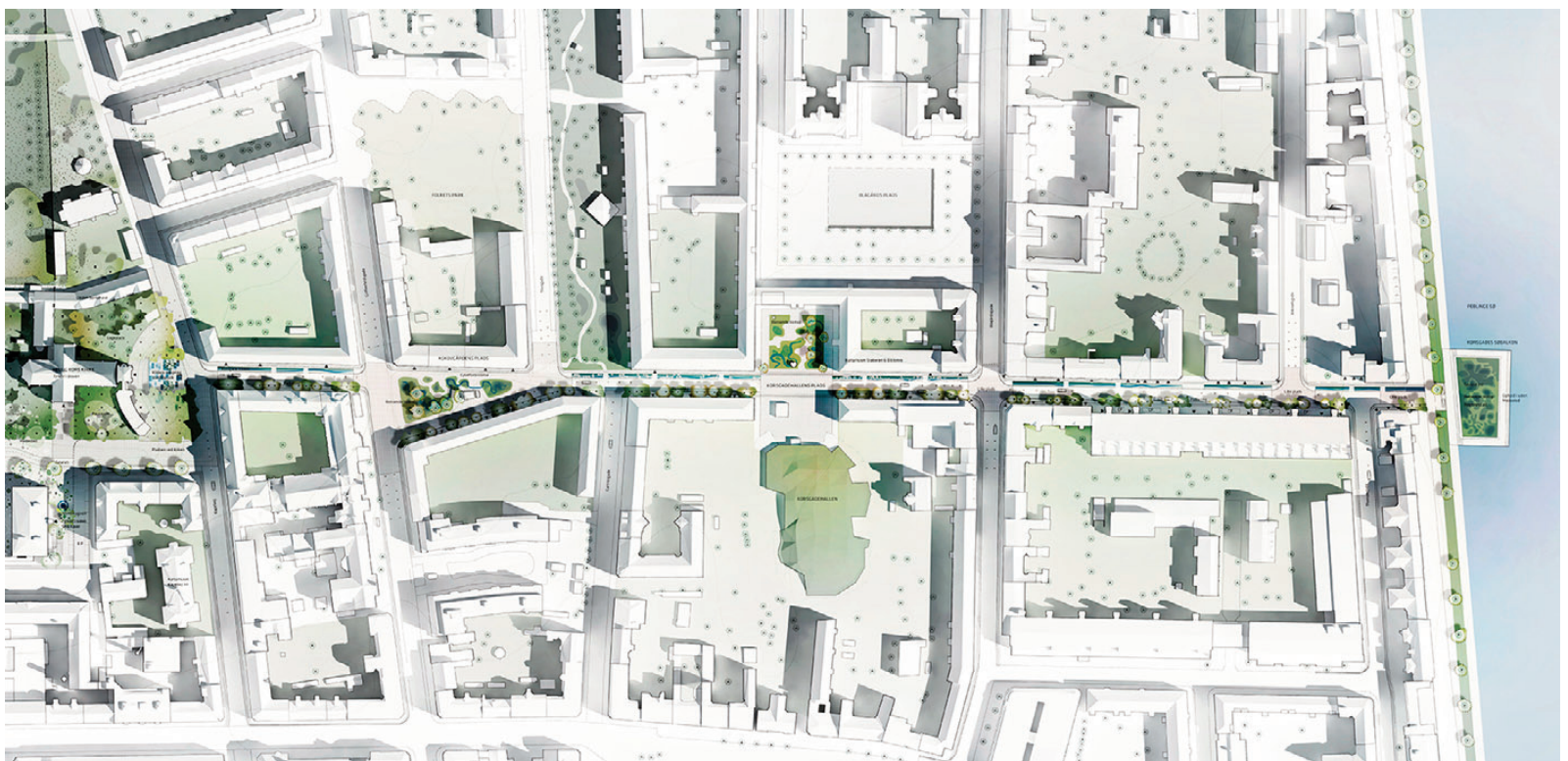


Fig. 11 | Korskgade Street Plan (source: SLA studio).

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).



2014-20237, i giorni con oltre 30 gradi sono passati da 9,4 a 29,6⁸ 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 Vienna⁹; 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'agricoltura¹⁰. 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 annue¹¹. 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 raffreddamento 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 dispo-



ne 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 raffreddamento' 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 (Kalarachichi, 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 orizzon-

tale 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'azien-

da agricola tradizionale¹³. 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 CO₂ dovute al trasporto; è infine ipotizzabile che con la progressiva robotizzazione della produzione orticola si possano ridurre i costi di raccolta e di gestione e aumentare ulteriormente la resa per unità di superficie¹⁵. 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 raffreddamento 4D' – tridimensionale nello spazio e programmabile nel tempo – la città cessa di essere una superficie passiva¹⁶ da mitigare e diventa una 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, vege-

tazionali, 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 raffreddamento 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 raffreddamento 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 qua-

lità 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 raffreddamento 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 raffreddamento: 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, creando 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 Hutrya 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 trasferire 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 Hutrya 2023; Ziaemehr 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 raffreddamento 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 raffreddamento in ambito urbano, mancano ancora studi quantitativi che ne misurino con precisione gli effetti si-

nergici e i compromessi. Inoltre sono necessarie ulteriori ricerche per valutare l'impatto diretto del raffreddamento 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.

Raffreddamento 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 raffreddamento 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 (Nanchariah, 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 (decentralizzati) 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 abitanti¹⁷ 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 km¹⁸ – 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 Paese¹⁹, 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 equivalente²⁰, 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 2024²¹ (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 evapotraspira interamente; è qui che il sistema mostra la sua forza, trasformando il refluo in raffreddamento latente e poiché per ogni litro eva-

porato 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 raffreddamento '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 raffreddamento 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 multiscale, dimostrando che i principi dell'autosufficienza idrico-energetica e del raffreddamento 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 ot-

timizzare 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 spesso 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 vengo-

no 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 assessore, 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-

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).

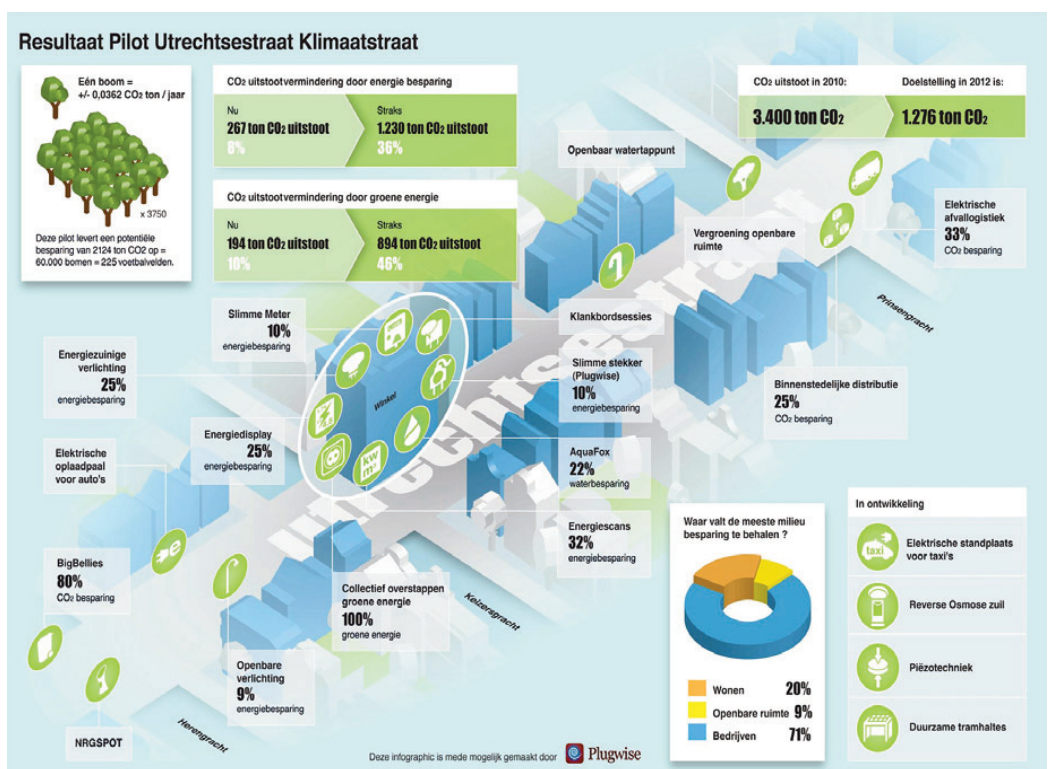


tive sociali agricole (Follesa et alii, 2024) o agevolazioni tariffarie per i cittadini prosumer.

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 am-



bientale 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. 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).



catori 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, preconditione per superare la fase pilota e scalare gli interventi. Nella sua attuale formulazione concettuale la matrice multi-driver non è esente da

(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 sociurbani, 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 indi-



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 Swynghedouw (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 tariffe siano proporzionate ai costi di gestione.

Il secondo nodo riguarda il mito che 'la tecnologia possa azzerare l'impatto ambientale'; la pro-

messa 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 CO₂ 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 multiscale: 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 impiantisti-

ca', 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 refluò. 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 aperto²² (Boogaard et alii, 2020).

Su questa base un'agenda di ricerca dovrebbe testare come densità e posizione dei sensori in-

fluenzino 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 (Iftekhhar 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 confluiscono 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

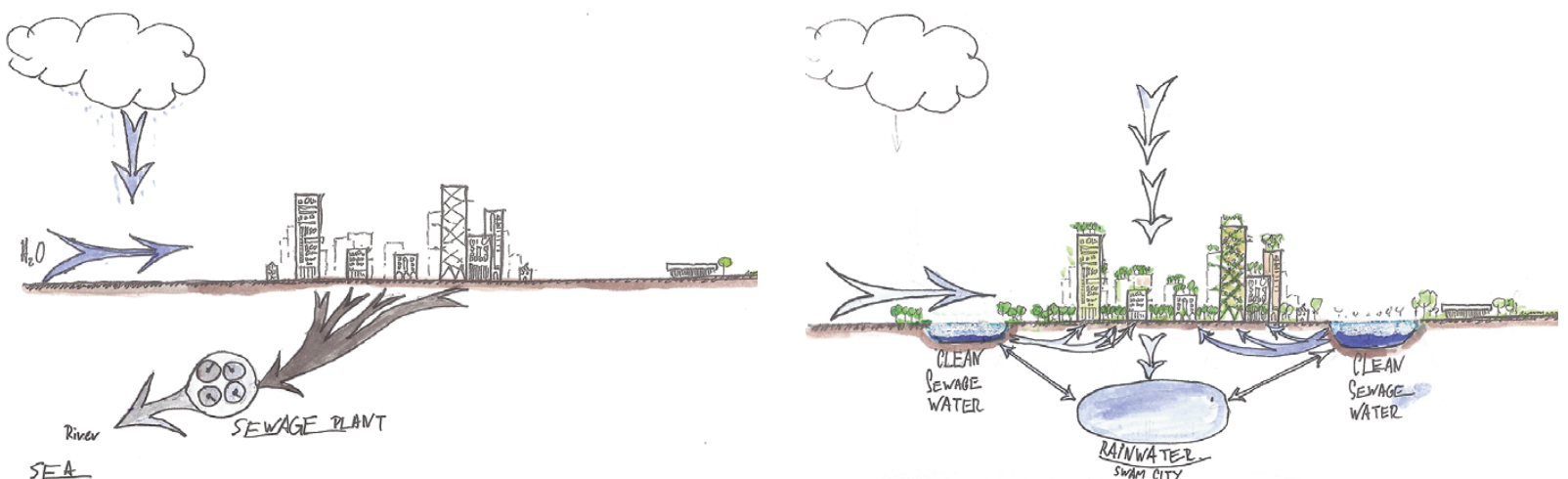
potrebbe quindi verificare se modelli blockchain con 'contratti smart' che distribuiscono i crediti in tempo reale fra utenti, gestore e Pubblica Amministrazione siano in grado di incrementare la trasparenza percepita e ridurre i contenziosi su qualità e disponibilità dell'acqua di riciclo.

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).

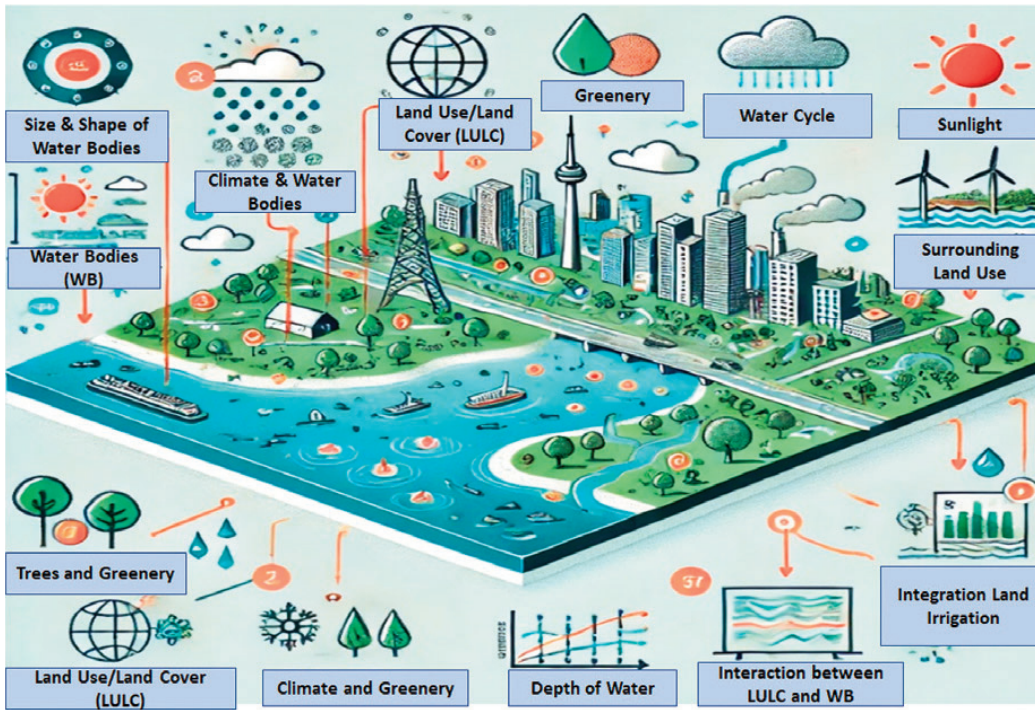


Fig. 29 | Factors influencing the cooling efficiency of water bodies (source: Jandaghian and Colombo, 2024).

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 Polit-*

ical 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 resources¹, the climate crisis², and biodiversity loss³ 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 decades⁴; 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 2050⁵. 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 ecogentrification 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 Bro-uwer, 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, fire-fighting, 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 (Fig. 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 (Fig. 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 sig-

nificantly, 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 (Fig. 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 wa-

ter 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 (Vercruyssen, 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; Blečić 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 stor-

age 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 [m ²] (net area)	
7	79,504,762	
or waterconsumption of aeroponic roofs [l/d]	Total size of aeroponic roofs that can be irrigated [m ²] (net area)	
5	111,306,667	

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
354,667	100 litres / 1 Tree per day 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. 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).

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 Ek-

Waste water – Cooling capacity / 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).

strom, 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).

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 (Vercruyssen, 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).

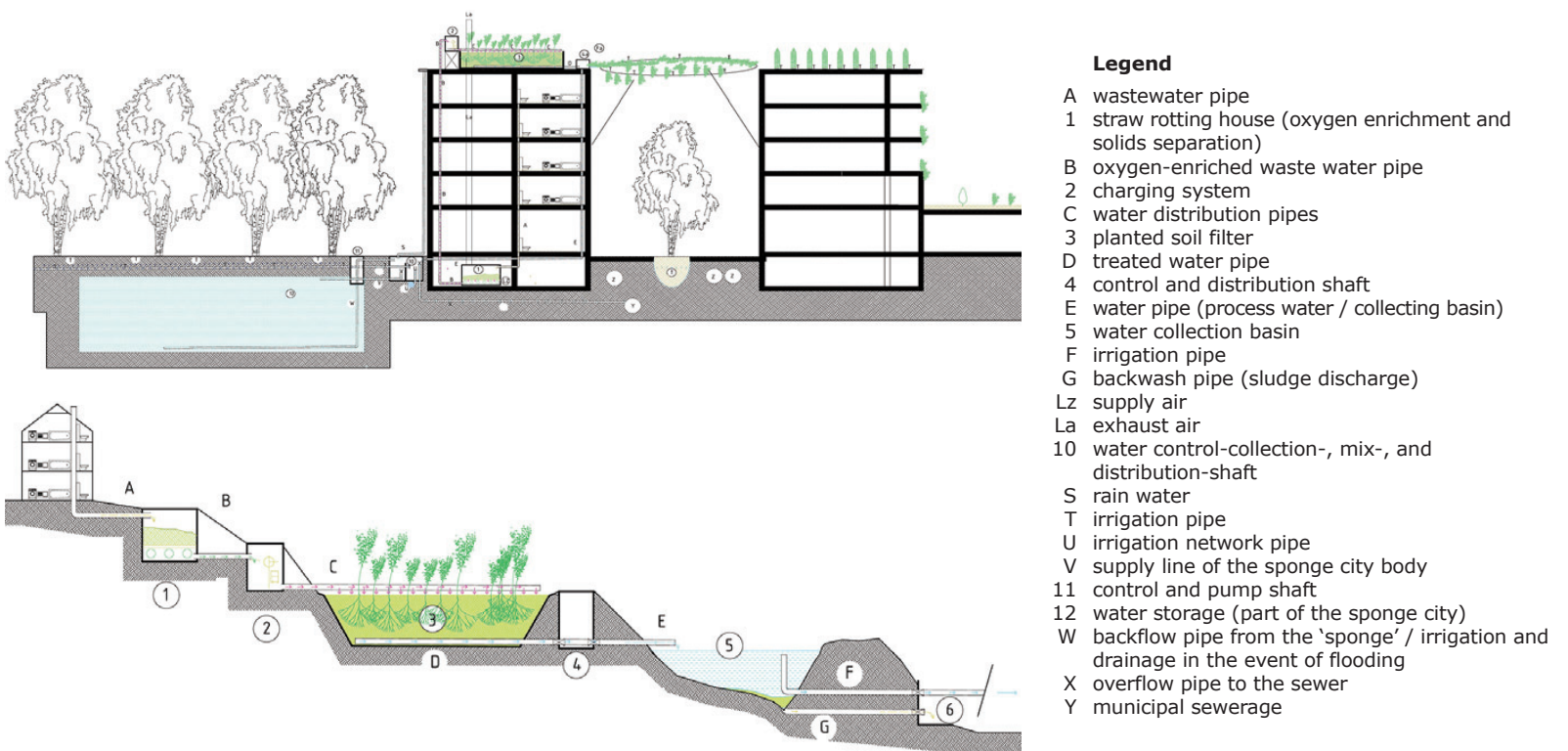
With this agenda, proactive planning can move from theory to shared operation: increasingly ac-

curate 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-



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 (Fig. 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 CO₂ 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 'hydromorphologies', 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 2014-2023⁷. The number of days exceeding 30 degrees has increased from 9.4 to 29.6⁸, 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 risk¹⁰. 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 year¹¹. 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, reflec-

tive 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 (Kalarachichi, 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 Sriwanit, 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/m² 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 Jersey¹³. The Parisian experience of Agropolis 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 CO₂ 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 increased¹⁵. 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 mo-

saic, 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 surface¹⁶ 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, tradi-

tionally 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

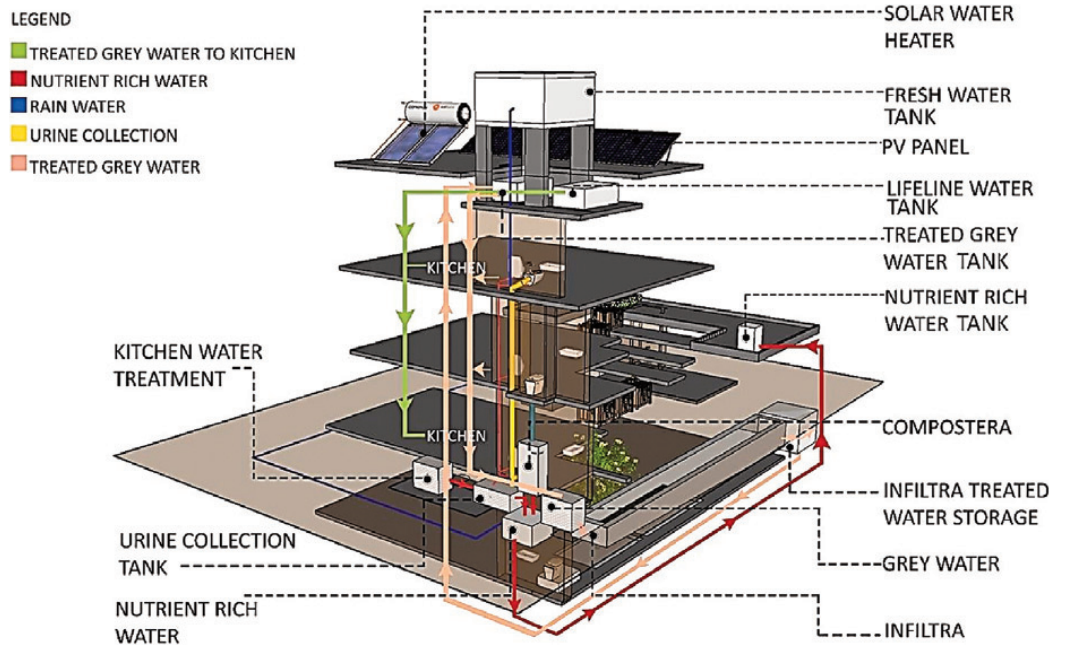


Fig. 33, 34 | The ‘ecological house’ in Bangalore: the main facade and rear with part of the water treatment plant and overview of the water and sanitation system setup (source: Drangert and Kjerstadius, 2023).



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 (Fig. 27, 28). With this in mind, careful urban planning should create artificial water bodies and en-

hance 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 Hutrya 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 Hutrya 2023; Ziaemehr 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 (Nanchaiah, Venkata Mohan and Lens, 2016). The al-

temative is to change the scale and purification system: small (decentralised) phytoremediation plants with gravel beds and plants, built for a maximum of 50 equivalent inhabitants according to UNI EN 12566-3:2016 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 inhabitants¹⁷, 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 km¹⁸ – 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 phytoremediated 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 dur-

ing 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 country¹⁹, thanks to large centralised treatment plants which, using different technologies, consume an average of 1 kWh per cubic metre treated (Walker, Pryor 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 inhabitant²⁰, 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 2024²¹ (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 centralized 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. Vstik, 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 – con-

sumption 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	m ³ / year						
		U-B2	% non-potable demand covered	%						
		U-B3	Average use cycles per litre	no.						
		U-B4	Energy saved from pumping	kWh / m ³						
		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	€ / m ³						
		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. / km ²						
		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	m ³ / 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	m ²						
		G-B2	Average daytime UHI reduction	°C						
		G-B3	Infiltrated / evapotranspired volume	m ³ / year						
		G-B4	Urban biodiversity index	Shannon						
		G-B5	Blue-green roof coverage	m ² / 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)	€ / m ²						
		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 AFFORDABLE AND CLEAN ENERGY	8 DECENT WORK AND ECONOMIC GROWTH	9 INDUSTRY, INNOVATION AND INFRASTRUCTURE	10 REDUCED INEQUALITIES	11 SUSTAINABLE CITIES AND COMMUNITIES	12 RESPONSIBLE CONSUMPTION AND PRODUCTION
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	m ³ / year						
		U-B2	% non-potable demand covered	%						
		U-B3	Average use cycles per litre	no.						
		U-B4	Energy saved from pumping	kWh / m ³						
		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	€ / m ³						
		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. / km ²						
		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	m ³ / 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	m ²						
		G-B2	Average daytime UHI reduction	°C						
		G-B3	Infiltrated / evapotranspired volume	m ³ / year						
		G-B4	Urban biodiversity index	Shannon						
		G-B5	Blue-green roof coverage	m ² / 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)	€ / m ²						
		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	m ³ / year						
		U-B2	% non-potable demand covered	%						
		U-B3	Average use cycles per litre	no.						
		U-B4	Energy saved from pumping	kWh / m ³						
		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	€ / m ³						
		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. / km ²						
		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	m ³ / 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	m ²						
		G-B2	Average daytime UHI reduction	°C						
		G-B3	Infiltrated / evapotranspired volume	m ³ / year						
		G-B4	Urban biodiversity index	Shannon						
		G-B5	Blue-green roof coverage	m ² / 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)	€ / m ²						
		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 ne-

xus 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 startups 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 CO₂ 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 space²² (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 (Iftexhar 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 ur-

ban metabolism and its projection into the future, demonstrating that only effective decoupling can transform the city into the cooling node of a planetary network (Fig. 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: national-geographic.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-bio-diversitaet-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/m15/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: agteacher.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., Kraslinskoff, 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., Matheny, A., Gallez, E., Oscilowicz, E., López Máñez, J., Sarzo, B., Beltrán, M. A. and Martínez 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].
- Ashgari, 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 Sub-sahariana | 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., Casanti, A. C., Roest, A. H. and Zuurman, A. (2020), “Climate-Café – 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 re-design 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., Fougereon, 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’efficiamento 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 Andarolo, B. (2024), “Rigenerazione climatica green degli street-scapes – 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 environment*, 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), *Transition 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 52021DC 0550, 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 52020DC 0098, 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 32024R 1991, 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 [Accessed 11 November 2025].

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].

García, 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-Baggeth, 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/annurev-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].

Iftexhar, 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/AR6-9789291691647 [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 Srivani, 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), *Atlas 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].
- Nanchariaiah, Y. V., Venkata Mohan, S. and Lens, P. N. L. (2016), "Recent advances in nutrient removal and recovery in biological and bioelectrochemical systems", in *Bioresour. 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., Armeth, 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., Inzarov, 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., Diaz, 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 Simeons, 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., Garshabi, 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 Hutyrá, L. R. (2023), "Urban green space and albedo impacts on surface temperature across seven United States cities", in *Science of The Total Environment*, 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., Koukoulou, 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., Paggiaccia, 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 Mániz, 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].
- Vercruyssen, 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., Pryor 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., Agha-Kouchak, 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.ijdr.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].
- Ziaemehr, 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].