



Blu Shift – L'acqua nel XXI secolo

Strategie, tecnologie e modelli di governance per la resilienza
idrica in un'epoca di cambiamenti sistemici

Flavio Petricca
PHERKARD TECH

NOTA SULL'AUTORE

Flavio Petricca integra competenze nei sistemi ambientali, nello sviluppo sostenibile e nella chimica avanzata, con una formazione accademica in *Scienze Chimiche (LM54)* ed *Environmental Change and Global Sustainability (LM75 R)*, entrambe conseguite presso l'Università degli Studi di Milano. Il suo lavoro si concentra sull'applicazione di tecnologie innovative a soluzioni sostenibili e scalabili.

Ha maturato esperienza prima nella ricerca scientifica presso il Dipartimento di Chimica dell'Università di Milano, e poi nel campo del trasferimento tecnologico di tecnologie emergenti, sviluppando una solida capacità di analisi strategica e di valorizzazione dell'innovazione.

Flavio affianca alla preparazione tecnica competenze gestionali e flessibilità operativa in contesti interdisciplinari. Il suo approccio mira a trasformare sfide ambientali e tecnologiche complesse in strategie concrete, generando valore sistemico.

Attualmente è fondatore di Pherkard Tech, azienda tecnologica focalizzata sullo sviluppo di soluzioni innovative per la sostenibilità ambientale e la resilienza dei sistemi industriali.

Contatti

✉ flavio.petricca@pherkardtech.com

EXECUTIVE SUMMARY – BLU SHIFT: L’ACQUA NEL XXI SECOLO

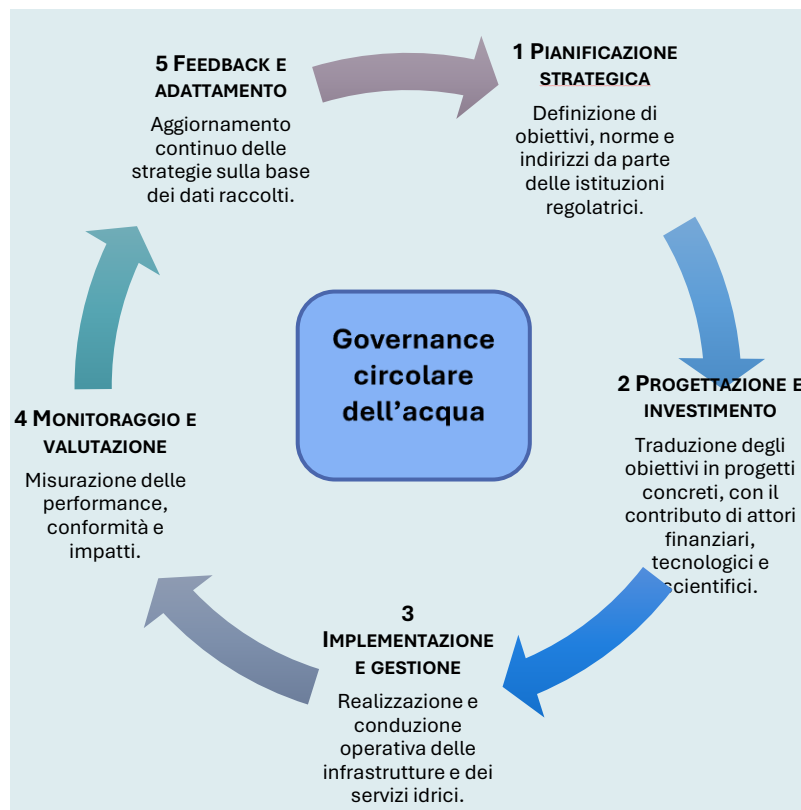
L’acqua non è più una risorsa scontata. È oggi un rischio sistemico che minaccia sicurezza alimentare, stabilità urbana e competitività industriale. Più di 2 miliardi di persone vivono già in aree sotto stress idrico, e il dato è in aumento.

Questo report propone una visione trasformativa: l’acqua come “infrastruttura invisibile” e capitale naturale rigenerabile, alla base della coesione sociale e della resilienza climatica.

LE 5 CRITICITÀ CHIAVE

	Criticità	Impatto primario
1	Stress idrico strutturale – WEI ⁺ > 20 % inoltre 1/3 del territorio europeo; picchi > 40 % in Mediterraneo.	Sicurezza approvvigionamenti, discontinuità produttiva
2	Perdite di rete e inefficienze – fino al 35 – 50 % nei sistemi urbani; inefficienze di processo > 45 % in molti settori industriali.	Costi operativi elevati, spreco di risorsa
3	Riuso idrico sottoutilizzato – < 4 % dei reflui trattati riutilizzati a livello globale, nonostante il 56 % sia potenzialmente idoneo.	Pressione sulle fonti convenzionali, mancate economie circolari
4	Barriere normative e finanziarie – iter autorizzativi lenti, standard disomogenei, gap di investimento stimato in 28 mld €/anno (UE).	Ritardi negli impianti, costi di capitale elevati
5	Accettazione sociale e governance frammentata – bassa fiducia nel riuso potabile/industriale, conflitti inter-settoriali, scarsa partecipazione.	Rischio progetto, iniquità ed esclusione idrica

GOVERNANCE CIRCOLARE DELL’ACQUA



LE 5 SOLUZIONI SISTEMICHE

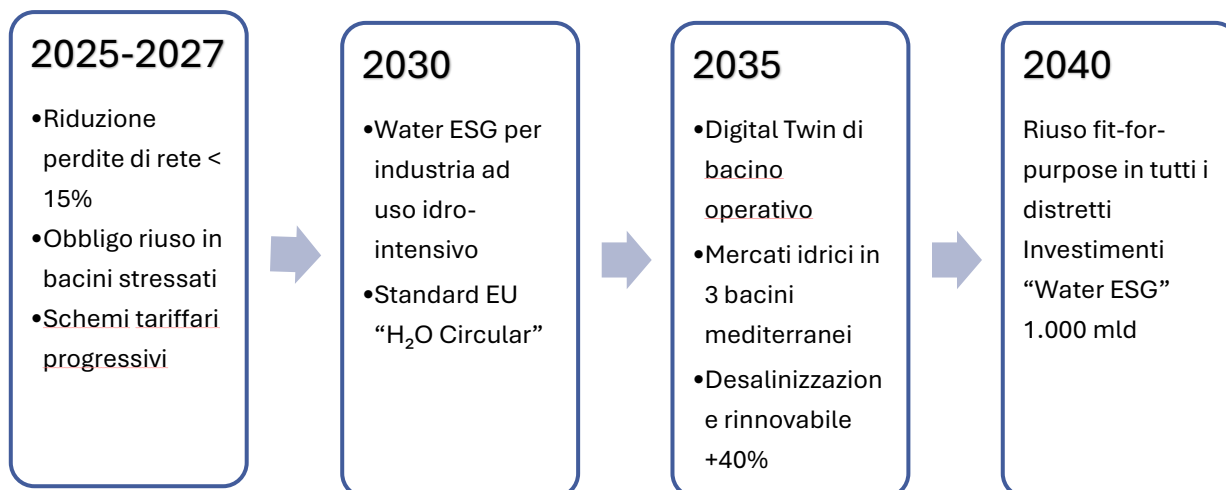
1. Economia circolare dell'acqua: riuso *fit-for-purpose*, recupero di energia e nutrienti dai reflui, simbiosi industriale.
2. *Digital Water* & reti intelligenti: *smart-metering*, IoT, modelli Digital Twin per ridurre perdite 30-50 % e ottimizzare OPEX.
3. Finanza resiliente & blended finance: tariffe progressive, *green/blue bonds*, PPP performativi, tassonomia UE e SEEA-Water per bancabilità.
4. Governance adattiva multistakeholder: pianificazione scenariale (*Adaptive Pathways*), mercati idrici regolati, piattaforme di bacino inclusive.
5. *Nature-Based* & soluzioni decentralizzate: fitodepurazione, raccolta pluviale, MAR; moduli MBR containerizzati per comunità peri-urbane.

LE 10 AZIONI PRIORITARIE (2025-2030)

1. Riduzione perdite di rete al < 15 % entro il 2030 tramite 100 % smart-metering e manutenzione predittiva.
2. Obbligo di riuso reflui in agricoltura ≥ 25 % nei bacini con $WEI^+ > 20$ % (recepimento Reg. UE 741/2020).
3. Schemi tariffari progressivi + fondi sociali: recupero di 0,20 €/m³ per finanziare CAPEX circolari.
4. Piani di investimento "Water-ESG" per il settore manifatturiero (> 250 mld € di fatturato idro-intensivo), con target di riciclo/riuso interno ≥ 60 %.
5. Piattaforme Digital Twin di bacino per tutti i distretti idrici critici UE entro il 2028.
6. Standard unico di qualità «H₂O-Circular» per acqua riutilizzata in processi industriali e *cooling towers*.
7. Programma MAR/NBS urbano in 50 città europee vulnerabili: laghi di ritenzione, tetti verdi, wetlands.
8. Mercati idrici pilota in tre bacini mediterranei, ispirati al Murray-Darling Basin, per allocazione flessibile dei diritti.
9. Capacità di desalinizzazione rinnovabile +40 % con solar-RO dove $WEI^+ > 40$ % e potenziale FV > 1 400 kWh/m²/a.
10. Formazione & campagne di *behavioural change* ("Water Smart Citizens") per ridurre i consumi civili a 100 L pro-capite/die.

Target da calibrare sulle specificità della rete locale

ROADMAP STRATEGICA PER LA RESILIENZA IDRICA (2025-2040)



STIMA SINTETICA COSTI/BENEFICI (ORIZZONTE 10 ANNI, UE-27)

Macro-intervento	CAPEX/Pubblico + Privato*	Benefici annui attesi**	Pay-back	Note principali
Riduzione perdite rete	45 mld €	9-13 mld €/a (acqua ed energia risparmiate)	4-6 anni	Include digitalizzazione + replac. condotte
Riuso agricolo + industriale	32 mld €	11-15 mld €/a (acqua, fertilizzanti, CO ₂ evitata)	3-5 anni	Copertura 7 % fabbisogno irriguo UE
NBS & MAR urbane	18 mld €	4-6 mld €/a (riduzione flood + heat island)	6-8 anni	Valore ecosistemico incluso
Impianti circolari reflui (energia + nutrienti)	25 mld €	7-9 mld €/a (biogas, struvite, minori scariche)	4-5 anni	Autosufficienza energetica 70-80 %
Desalinizzazione FV	12 mld €	2-3 mld €/a (acqua potabile addizionale)	6-7 anni	Solo in zone costiere ad alto stress
Totale	≈ 132 mld €	≈ 33-46 mld €/a	< 5 anni media	*Finanziamento blended 45 % pubblico / 55 % privato

*CAPEX= costo di investimento iniziale. Valore annuale dei benefici comprensivo di: riduzione costi di approvvigionamento/energia, valore fertilizzanti, servizi ecosistemici (EU ENV valuation), CO₂ evitata a 95 €/t (ETS 2025).

CONCLUSIONI

L'efficienza idrica non è solo una questione ambientale, ma una leva strategica per la competitività industriale, la sicurezza alimentare e la resilienza urbana. Le tecnologie sono disponibili, ma la loro diffusione richiede politiche integrate, modelli di governance flessibili e investimenti mirati. La transizione verso un'economia idrica circolare è un'opportunità sistemica che può generare benefici economici, ambientali e sociali nel lungo periodo.

Ogni euro investito in resilienza idrica genera 2,5-3,5 euro di benefici economici, sociali e ambientali entro dieci anni.

Le soluzioni circolari e digitali oggi disponibili consentono di ridurre lo stress idrico, decarbonizzare i cicli produttivi e creare valore sistemico. Agire nel periodo 2025-2030 è strategico per evitare costi di inazione stimati in oltre 6 % del PIL nelle regioni più vulnerabili entro il 2050.

SOMMARIO

Executive Summary – Blu Shift: L’acqua nel XXI secolo	II
Abstract	1
1 Introduzione	2
1.1 La scarsità idrica come sfida globale emergente.....	2
1.2 Impatti trasversali su sicurezza alimentare, settori industriali e sistemi urbani	3
1.3 Obiettivi e struttura del Report	3
1.4 Metodologia, fonti e strumenti	4
2 Focus settoriale: strategie e criticità	5
2.1 Industria agroalimentare.....	5
2.1.1 Una dipendenza critica: la fragilità idrica dell'agricoltura.....	5
2.1.2 Tecnologie per l'efficienza irrigua e la resilienza climatica	6
2.1.3 Riutilizzo delle acque reflue trattate in agricoltura.....	8
2.2 Industrie Manifatturiere e Chimiche	9
2.2.1 Consumi idrici nei processi industriali e rischi operativi	9
2.2.2 Strategie di riduzione, riciclo e riutilizzo dell'acqua di processo	9
2.2.3 Ostacoli normativi, costi di transizione e incentivi economici	10
2.2.4 Industrie Manifatturiere e Chimiche – Analisi Quantitativa.....	12
2.2.5 Pressione idrica nei settori ad alta intensità tecnologica	14
2.3 Trattamento delle Acque Reflue e dei Fanghi	15
2.3.1 Economia circolare nel trattamento delle acque reflue	15
2.3.2 Recupero di risorse: acqua, energia, nutrienti	16
2.3.3 Modelli di business innovativi e scalabilità delle soluzioni	18
2.4 Interconnessioni e sinergie intersettoriali nel ciclo idrico	19
2.4.1 Competizione per la risorsa	19
2.4.2 Sinergie attraverso il riutilizzo e la simbiosi	20
2.4.3 Verso una pianificazione integrata.....	20
2.5 Tabelle e comparazioni.....	22
2.5.1 Tabella compara le tecnologie di recupero da acque reflue e fanghi	22
2.5.2 Tabella riepilogativa con le strategie e le criticità principale.....	22
2.5.3 Tabella modelli di business trattamento acque reflue e fanghi.....	22
2.6 Punti principali	23
3 Misurare l'Efficienza Idrica	24
3.1 Indicatori quantitativi: <i>water footprint</i> , stress idrico, <i>performance</i> settoriali.....	24
3.1.1 Limiti fisici e qualitativi alla disponibilità idrica reale	26
3.2 Strumenti di monitoraggio e reporting per la gestione industriale.....	28
3.3 Valutazioni integrate: contabilità idrica, analisi costi-benefici e SDG 6.4	30

3.4	Tabelle e comparazioni	34
3.4.1	Tabella comparativa degli indicatori di efficienza idrica	34
3.4.2	Tabella standard e monitoraggio	34
3.4.3	Confronto tra Indicatori Tradizionali ed Indicatori Sistemici per la Valutazione dell'Efficienza Idrica nei Processi Industriali	35
3.5	Punti principali	36
4	Tecnologie e Innovazione	37
4.1	Tecnologie per la chiusura del ciclo idrico	37
4.1.1	Sistemi di monitoraggio e digitalizzazione delle reti	37
4.1.2	Riuso <i>fit-for-purpose</i> : adattare il trattamento all'uso finale	39
4.1.3	T Trattamenti avanzati: membrane, processi ossidativi, separazione selettiva	39
4.1.4	Approccio integrato	42
4.2	Soluzioni decentralizzate e Nature-Based per la gestione locale	42
4.2.1	Soluzioni decentralizzate e MAD	43
4.2.2	Soluzioni basate sulla natura (Nature-Based Solutions - NBS)	44
4.2.3	Integrazione e scalabilità	44
4.3	Integrazione con altri settori: energia, agricoltura, manifattura	45
4.4	Casi studio a supporto della transizione	48
4.4.1	Risultati chiave	51
4.5	Tabelle e comparazioni	52
4.5.1	Riuso classificato in base alla fonte e alla destinazione d'uso	52
4.5.2	Riepilogo complessivo delle tecnologie per la chiusura del ciclo idrico	52
4.5.3	Casi studio internazionali per la chiusura del ciclo idrico	53
4.6	Punti principali	56
5	Investire nella Resilienza Idrica: Valore Economico, Strumenti e Opportunità Sistemiche	57
5.1	Oltre l'efficienza: il valore trasformativo della resilienza idrica	57
5.2	Integrazione economica del riuso idrico	58
5.2.1	Riduzione dei costi per l'approvvigionamento idrico	58
5.2.2	Recupero di nutrienti e riduzione dell'utilizzo di fertilizzanti	58
5.2.3	Valorizzazione energetica da fanghi e acque reflue	59
5.2.4	Valutazione costi-benefici ambientale (CBA estesa)	59
5.3	Strumenti economici per la resilienza	60
5.3.1	Tariffazione progressiva dell'acqua e revisione dei sussidi perversi	60
5.3.2	Crediti fiscali e incentivi per investimenti resilienti	60
5.3.3	Caso studio: Gestione innovativa delle risorse idriche nel Murray-Darling Basin (Australia)	61
5.4	Innovazione istituzionale e governance economica	62
5.4.1	Contabilità ambientale e idrica (SEEA)	62



5.4.2	Indicatori strategici per la resilienza e la circolarità idrica.....	63
5.4.3	Strumenti di pianificazione adattiva e scenariale	63
5.4.4	Implicazioni per la governance idrica europea e globale	64
5.4.5	Equità, giustizia ambientale e diritto all'acqua	64
5.4.6	Mappa degli stakeholder e flussi decisionali nella governance circolare dell'acqua 65	
5.5	Priorità settoriali e valutazioni economiche integrate	67
5.5.1	Matrice settoriale rischio–opportunità per la resilienza idrica	67
5.5.2	Agricoltura.....	68
5.5.3	Industria.....	70
5.5.4	Città.....	71
5.5.5	Focus UE: settori strategici emergenti	73
5.6	Ritorni settoriali e priorità economiche integrate.....	73
5.7	Tabelle e comparazioni.....	75
5.7.1	Tabella: ritorni Economici Integrati per Settore.....	75
5.7.2	Tabella: Strumenti Economici e Finanziari per la Resilienza Idrica.....	75
5.7.3	Tabella: Strumenti di Governance e Misurazione della Resilienza	75
5.7.4	Tabella: Indicatori di equità e inclusione sociale nella governance idrica	76
5.8	Punti principali	77
6	Conclusioni	78
6.1	Sintesi delle evidenze per ciascun settore analizzato	78
6.1.1	Modelli di governance e strumenti economici per l'efficienza idrica.....	79
6.2	Raccomandazioni operative per imprese, enti regolatori e policymaker	79
6.2.1	Finanza sostenibile e metriche ESG come leve per l'efficienza idrica	81
6.3	Evidenze dai casi studio: lezioni operative per la transizione	82
6.4	Percorsi temporali per la resilienza idrica integrata	84
6.5	Verso una strategia industriale resiliente e circolare in ambito idrico	87
6.6	Tabelle e comparazioni	90
6.6.1	Sintesi settoriale efficienza idrica	90
6.6.2	Tabella raccomandazioni suddivise per target	90
6.6.3	Linee guida per una strategia industriale idrica avanzata	91
6.7	Punti principali	92
7	Limiti dello studio	93
8	Bibliografia	94
	Appendice A: Metodologia per la valutazione comparativa settoriale e tecnologica	106
	Appendice B: Metodologia per la definizione della timeline e delle interdipendenze temporali settoriali	109
	Appendice C: Toolkit operativo per la progettazione di interventi resilienti nel ciclo idrico.....	111



Appendice D: Guida alla scelta delle tecnologie per il trattamento e il riuso idrico	113
Glossario	115
Informazioni sull'autore e licenza	118
Licenza d'uso	118

ABSTRACT

Nel XXI secolo, l'acqua non è più una risorsa illimitata, ma un pilastro strategico per la stabilità globale. Il presente *report* si immerge nelle complesse dinamiche dell'efficienza e resilienza idrica, esplorando le sfide e le opportunità che si presentano nei settori chiave: agricoltura, industria, sistemi urbani e trattamento delle acque reflue. Agendo in un contesto di crescente stress idrico, instabilità climatica e impellente transizione ecologica, la nostra analisi inizia con una ricognizione approfondita delle vulnerabilità settoriali e delle soluzioni tecnologiche all'avanguardia disponibili. Proponiamo quindi un quadro integrato per la misurazione dell'efficienza idrica, basato su indicatori quantitativi robusti, strumenti di *reporting* avanzati e metodologie di contabilità ambientale, in stretta armonia con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile.

Il Capitolo 5 segna un punto di svolta, introducendo un cambio di paradigma che eleva la resilienza idrica ad *asset* strategico per la stabilità macroeconomica e la competitività industriale. Analizziamo i ritorni economici del riuso, esplorando l'efficacia di strumenti di finanziamento sostenibile quali *blended finance*, *green bonds* e Partenariati Pubblico-Privato (PPP) (World Bank, 2023). Approfondiamo inoltre i modelli di *governance* adattiva, come il *System of Environmental-Economic Accounting for Water* (SEEA), l'applicazione di *Key Performance Indicators* (KPIs) e la pianificazione basata su scenari, per affrontare l'incertezza idrologica. Una sintesi valutativa rivela differenze marcate nel valore aggiunto dell'acqua tra i settori – da 1-3 €/m³ in agricoltura a oltre 500 €/m³ nei comparti ad alta tecnologia fornendo uno strumento critico per orientare scelte strategiche e allocative più informate.

Nel capitolo conclusivo, delinearono raccomandazioni operative concrete per imprese, enti regolatori e *policymaker*, supportate da *casi studio* internazionali e *buone pratiche* emergenti. Questo *white paper* propone una visione audace di una strategia industriale resiliente e circolare, che riconosce l'acqua non solo come un costo o un problema, ma come una infrastruttura invisibile e capitale naturale rigenerabile. È questa visione che rappresenta il fondamento indispensabile per la coesione sociale, la sovranità produttiva e la transizione sostenibile dell'Europa.

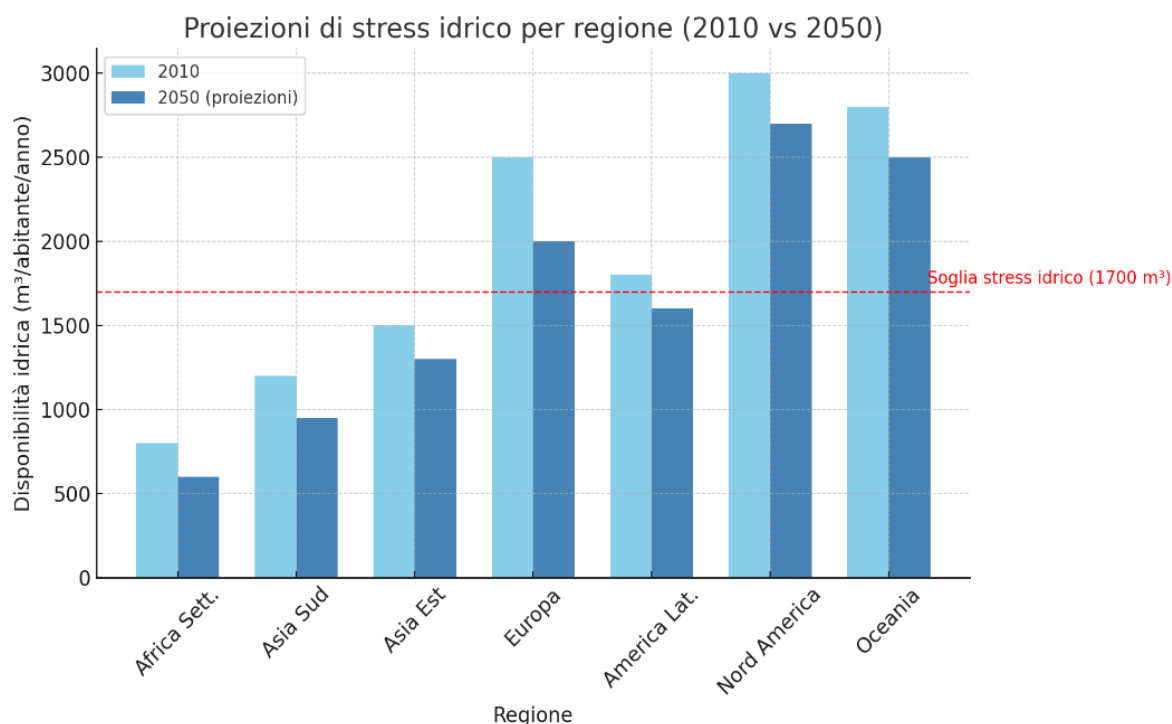
1 INTRODUZIONE

1.1 LA SCARSITÀ IDRICA COME SFIDA GLOBALE EMERGENTE

L'acqua, linfa vitale del nostro pianeta, si trova al centro delle sfide ambientali, economiche e sociali più pressanti del nostro tempo. In un'era definita dall'intensificarsi dei cambiamenti climatici, da una rapida urbanizzazione e da una pressione senza precedenti sugli ecosistemi sia naturali che no, la disponibilità delle risorse idriche sta diventando sempre più incerta e irregolare (Scanlon et al., 2023).

Oltre due miliardi di individui popolano oggi regioni affette da elevato stress idrico, e le proiezioni future delineano un aumento significativo di questo fenomeno, estendendosi anche ai Paesi industrializzati (UNESCO & UN-Water, 2020; Liu et al., 2022). La scarsità idrica trascende la mera dimensione ambientale; essa si configura come un rischio sistemico che minaccia la sicurezza alimentare, la continuità produttiva delle imprese, la stabilità delle città e la resilienza dei territori. Il paradigma lineare di "prelievo, utilizzo e scarico" ha esaurito la sua sostenibilità intrinseca (Lindner & Stamm, 2025). È imperativo un ripensamento radicale della gestione idrica, orientandola verso un'ottica circolare, rigenerativa e intersettoriale (Delgado et al., 2024).

Figura 1 Disponibilità idrica annua pro capite stimata per alcune macroregioni mondiali, paragonando la situazione del 2010 con le proiezioni al 2050. La linea rossa indica la soglia critica di 1700 m³/anno, al di sotto della quale si manifesta uno stato di stress idrico (rielaborazione su dati FAO, UNESCO, Liu et al., 2022).



Come evidenziato nella Figura 1, la disponibilità idrica pro-capite è destinata a subire una riduzione significativa in numerose macroregioni, con valori che si attesteranno al di sotto della soglia critica in gran parte dell'Africa subsahariana e dell'Asia meridionale.

1.2 IMPATTI TRASVERSALI SU SICUREZZA ALIMENTARE, SETTORI INDUSTRIALI E SISTEMI URBANI

Gli effetti della scarsità idrica si manifestano con una eterogeneità marcata nei principali settori economici, ma con un impatto trasversale sulla sicurezza alimentare, sulla stabilità economica e sulla resilienza urbana. Ogni comparto, infatti, sperimenta vulnerabilità specifiche che, se non affrontate con strumenti adeguati, possono amplificarsi e generare criticità sistemiche (Leijnse et al., 2024).

Nel settore agroalimentare, ad esempio, l'incremento della frequenza e dell'intensità degli eventi climatici estremi, unitamente alla crescente instabilità climatica, sta compromettendo la produttività agricola in vaste aree del globo. Questo fenomeno ha ripercussioni dirette sulla disponibilità e sull'accessibilità del cibo, sia a livello globale che locale (Toromade et al., 2024). In particolare, l'irrigazione – componente centrale della produzione primaria – è soggetta a forti pressioni idriche, rendendo indispensabile l'adozione di tecnologie di precisione e sistemi avanzati per ridurre i consumi e ottimizzare l'efficienza (Hrozencik & Aillery, 2021).

Anche le industrie manifatturiere e chimiche si trovano fortemente esposte. La scarsità idrica si traduce in rischi operativi crescenti, interruzioni di processo, aumento dei costi di approvvigionamento e vincoli ambientali sempre più stringenti. In questo scenario, la gestione efficiente delle risorse idriche non è più un'opzione, ma un asset operativo strategico per garantire continuità produttiva, sostenibilità ambientale e competitività economica. Le imprese sono pertanto incentivate a investire in tecnologie per il riutilizzo, la depurazione e il riciclo delle acque reflue, riducendo sia l'impatto ambientale sia i costi operativi (Karki & Rao, 2023).

Nei sistemi urbani, la vulnerabilità è amplificata dalla densità demografica e dalla rigidità delle infrastrutture idriche esistenti (Jones et al., 2024). La crisi idrica di Città del Capo rappresenta un caso emblematico di come le città possano precipitare rapidamente in condizioni di emergenza se sprovviste di strumenti resilienti. Per affrontare queste sfide, è fondamentale adottare soluzioni innovative – come le infrastrutture verdi e i sistemi decentralizzati – capaci di aumentare la flessibilità e la sostenibilità della gestione urbana dell'acqua (Delgado et al., 2024; Mbavira & Grimm, 2021).

A livello sociale ed economico, la scarsità d'acqua accentua le disuguaglianze territoriali e l'inequità nell'accesso alla risorsa. Le fasce più vulnerabili della popolazione sono spesso le più colpite, con effetti che si riflettono sulla coesione sociale e sulla stabilità politica (Jones et al., 2024).

1.3 OBIETTIVI E STRUTTURA DEL REPORT

Questo *report* si propone di offrire una visione integrata e basata sull'evidenza delle opportunità connesse all'efficienza idrica, con un'attenzione particolare ai settori industriale e urbano. L'analisi si focalizzerà su diverse aree cruciali: l'esplorazione di tecnologie avanzate per la chiusura del ciclo idrico, incluse soluzioni a membrana, processi di ossidazione avanzati (AOP) e la digitalizzazione dei sistemi; la disamina di strategie settoriali specifiche per i comparti agroalimentare e manifatturiero, nonché per il trattamento delle acque reflue; la presentazione di strumenti robusti per la misurazione dell'efficienza, come la *water footprint* e indicatori allineati agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG); e, infine, l'analisi di modelli innovativi di *governance*, finanziamento e *policy* volti a sostenere e accelerare questa transizione idrica. L'obiettivo ultimo di questo lavoro è promuovere una gestione dell'acqua che sia intrinsecamente capace di coniugare la competitività economica con la sostenibilità ambientale e la resilienza a lungo termine.

1.4 METODOLOGIA, FONTI E STRUMENTI

La metodologia usata per redigere questo report è articolata in diverse fasi.

In primo luogo, è stata condotta una revisione della letteratura scientifica, privilegiando articoli *peer-reviewed* e *report* istituzionali di enti di riferimento quali FAO, UNESCO, WRI, EEA e World Bank.

Le ricerche sono state effettuate utilizzando *Google Scholar* e *Lens.org*.

In secondo luogo, la selezione di dati quantitativi ha privilegiato fonti ufficiali laddove disponibili, ricorrendo in loro assenza a medie settoriali o stime consolidate per mantenere l'affidabilità delle informazioni. È importante sottolineare che alcuni grafici e tabelle presentati derivano da rielaborazioni su dati disaggregati, un processo che è stato segnalato per assicurare trasparenza e replicabilità.

Infine, sono stati inclusi casi studio selezionati per la loro rappresentatività geografica, la replicabilità tecnica delle soluzioni adottate e la disponibilità di dati verificabili, offrendo esempi concreti di successo e lezioni apprese.

L'intero approccio metodologico è stato guidato da un forte allineamento con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) delle Nazioni Unite, in particolare i target 6.4 (efficienza idrica), 9.4 (ammodernamento industriale), 12.2 (uso efficiente delle risorse naturali) e 13.1 (resilienza ai disastri legati al clima), rafforzando l'impatto e la rilevanza globale delle conclusioni di questo report.

Gli strumenti digitali e analitici utilizzati sono: Microsoft Excel che è stato utilizzato per l'organizzazione e la gestione dei dati, mentre Microsoft Word ha costituito la piattaforma principale per la stesura del testo. Alcune fasi di elaborazione quantitativa e di trattamento dei dati sono state condotte tramite script in linguaggio Python.

Per le attività redazionali e di revisione è stato inoltre integrato l'utilizzo di modelli di intelligenza artificiale generativa (OpenAI, versioni GPT-4o e GPT-4.5). Tali strumenti sono stati impiegati esclusivamente per la rifinitura linguistica della prima bozza, il controllo coesivo dei riferimenti interni, la verifica preliminare di coerenza delle fonti e il supporto editoriale.

L'adozione dell'AI ha avuto funzione ausiliaria e non sostitutiva: tutte le analisi, le interpretazioni e le conclusioni esposte sono state validate manualmente.

2 FOCUS SETTORIALE: STRATEGIE E CRITICITÀ

La gestione delle risorse idriche emerge come una sfida trasversale che pervade l'intero spettro dei settori economici. Tuttavia, la sua rilevanza si amplifica esponenzialmente in contesti caratterizzati da un'elevata intensità idrica, quali l'agroalimentare, l'industria manifatturiera e chimica, e la gestione delle acque reflue e dei fanghi. In questa sezione, esploreremo ciascuno di questi settori, evidenziandone le principali criticità e le risposte strategiche che stanno emergendo per affrontare la crescente pressione idrica.

2.1 INDUSTRIA AGROALIMENTARE

2.1.1 Una dipendenza critica: la fragilità idrica dell'agricoltura

L'agricoltura rappresenta il maggiore consumatore di risorse idriche globali, assorbendo circa il 70% dei prelievi di acqua dolce a livello planetario (FAO, 2021). Questa dipendenza, tuttavia, si manifesta con notevoli disomogeneità tra i continenti. In Asia e Africa, oltre l'80% dell'acqua dolce prelevata è destinata all'irrigazione, mentre in Europa tale quota si riduce a circa il 33%, grazie a una maggiore incidenza di precipitazioni e all'adozione di pratiche agricole meno idro-intensive (FAO, 2021; UNESCO, 2020).

Tabella 1 Dipendenza Idrica del Settore Agricolo per Continente

Continente	Quota irrigazione su prelievi idrici totali (%)	Quota terreni irrigati su SAU (%)
Asia	81	37
Africa	82	6
Europa	33	10
America Latina	71	12
Nord America	41	14
Oceania	56	5

Come illustrato nella Tabella 1, anche la percentuale di superficie agricola effettivamente irrigata rispetto alla Superficie Agricola Utilizzata (SAU) è profondamente disomogenea. In Asia, dove il sistema produttivo è fortemente dipendente dall'irrigazione, il 37% della SAU beneficia di sistemi irrigui, a fronte di un modesto 6% in Africa. Questo dato evidenzia come la fragilità dell'agricoltura alla scarsità idrica non sia unicamente una funzione climatica, ma sia intrinsecamente legata al grado di infrastrutturazione e alla disponibilità tecnologica.

Questa fragilità si acuisce nelle aree a clima semi-arido e arido, dove la dipendenza dall'acqua per l'irrigazione è massima. In queste regioni, anche minime variazioni nella disponibilità idrica possono tradursi in significative riduzioni delle rese agricole, compromettendo gravemente la sicurezza alimentare e la stabilità economica locale (Liu et al., 2022). Studi prospettici indicano che entro il 2050, oltre il 40% dei terreni coltivati sarà soggetto a condizioni di scarsità idrica per almeno una parte dell'anno, con impatti particolarmente severi nelle regioni subtropicali e nei paesi a basso reddito (Liu et al., 2022; Vanham et al., 2021). L'assenza di riserve idriche stabili e

di sistemi di irrigazione moderni rende molte regioni vulnerabili alle fluttuazioni stagionali e a eventi estremi, quali siccità prolungate o precipitazioni irregolari. Aumentare la resilienza del settore agroalimentare richiede interventi trasversali che integrino infrastrutture avanzate, digitalizzazione e una *governance* multilivello.

Tuttavia, la scarsità idrica nel comparto agricolo non può essere disgiunta dal contesto globale degli scambi commerciali. Recenti ricerche hanno evidenziato come il commercio internazionale di prodotti agricoli, sebbene contribuisca a mitigare la scarsità idrica aggregata attraverso il trasferimento di "acqua virtuale", possa innescare effetti regressivi in termini di equità. In particolare, Gu et al. (2024) hanno dimostrato che gli impatti del commercio agricolo sulla scarsità idrica e sull'equità nell'uso dell'acqua sono profondamente asimmetrici: nei paesi in via di sviluppo, i gruppi a basso reddito risultano i più colpiti dall'aggravarsi delle condizioni di scarsità e iniquità idrica, mentre nei paesi sviluppati le fasce meno abbienti beneficiano maggiormente delle sinergie positive tra riduzione della scarsità e maggiore equità distributiva. Tale disuguaglianza è accentuata dal fatto che oltre il 35% della popolazione nei paesi in via di sviluppo sperimenta simultaneamente un incremento della scarsità idrica e della disuguaglianza nell'accesso, a fronte di un reddito medio *pro capite* inferiore del 16% rispetto alla media nazionale. Questi dati sottolineano la necessità impellente di considerare la dimensione redistributiva delle politiche idriche nel contesto agricolo globale, integrando strumenti che possano attenuare i divari territoriali e sociali derivanti dagli scambi agroalimentari internazionali (Gu et al., 2024).

2.1.2 Tecnologie per l'efficienza irrigua e la resilienza climatica

L'agricoltura globale è oggi chiamata a un profondo processo di rinnovamento tecnologico. L'obiettivo è duplice: aumentare la produttività per soddisfare una domanda alimentare in costante crescita e, al contempo, ridurre l'impronta idrica dei processi agricoli. Al centro di questa transizione si colloca l'efficienza irrigua, intesa come la capacità di massimizzare la resa per unità di acqua impiegata, riducendo contemporaneamente le perdite per evaporazione, ruscellamento e percolazione profonda. Le tecnologie disponibili per raggiungere tale efficienza si differenziano sia per il grado di risparmio idrico che per i costi d'implementazione, come evidenziato nella Tabella 2 (Ray & Majumder, 2024).

Tabella 2 Tecnologie irrigue: efficienza media vs costo iniziale

Tecnologia	Efficienza media (%)	Costo iniziale stimato (€/ha)
Irrigazione a scorrimento	40	300
Irrigazione a pioggia	70	900
Irrigazione a goccia	90	1500

Oltre alla sola efficienza percentuale, è cruciale considerare l'impatto reale delle diverse tecnologie in termini di consumo annuo di acqua per ettaro. La Tabella 3 quantifica il risparmio potenziale rispetto al sistema a scorrimento, basandosi su scenari operativi standard secondo le stime di Zhang et al. (2022).

Tabella 3 Consumo idrico annuo medio e risparmio relativo per tecnologia irrigua

Tecnologia irrigua	Consumo medio (m ³ /ha/anno)	Risparmio rispetto a scorrimento (%)
Scorrimento	12.000	–
Sprinkler	8.000	33%
Goccia	5.000	58%
Subirrigazione	4.000	67%

Analizzando le tecnologie, si osserva che:

- Scorrimento: Un sistema ancora ampiamente diffuso in contesti tradizionali, ma caratterizzato da perdite significative e bassissima efficienza, con un consumo che può raggiungere i 12.000 m³/ha/anno.
- Sprinkler: Una soluzione intermedia che migliora la distribuzione idrica, riducendo il consumo a circa 8.000 m³/ha/anno (–33% rispetto allo scorrimento).
- Goccia: Una tecnologia ad alta efficienza che consente una distribuzione mirata dell'acqua direttamente nella zona radicale; consuma 5.000 m³/ha/anno (–58%) ed è particolarmente adatta a colture orticole e a filare.
- Subirrigazione: Un sistema avanzato che rilascia l'acqua sotto la superficie del suolo per capillarità; sebbene comporti costi iniziali elevati, sostenibili principalmente per colture ad alto valore aggiunto, consuma solo 4.000 m³/ha/anno (–67%).

L'adozione dell'irrigazione di precisione – supportata da sensori, sistemi SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), intelligenza artificiale e telemetria – consente una gestione dinamica e adattiva della risorsa idrica. Il monitoraggio in tempo reale dell'umidità del suolo, delle condizioni microclimatiche e dei fabbisogni specifici delle colture permette una somministrazione calibrata, riducendo sprechi e aumentando la resilienza dei sistemi agricoli (Rastogi et al., 2024). Nei contesti semi-aridi, soluzioni come il *deficit irrigation* controllato, l'uso di varietà tolleranti alla siccità e il *dry farming* stanno emergendo come strategie efficaci per mantenere la produttività anche in condizioni di stress idrico prolungato (Hrozencik & Aillery, 2021).

Nonostante i vantaggi dimostrati, l'adozione dell'irrigazione di precisione è ancora limitata da una serie di barriere strutturali. Tra le principali difficoltà si annoverano i costi iniziali elevati per l'acquisto e l'installazione di sensori, attuatori e software gestionali (stimati tra 800 e 2.000 €/ha), la carenza di competenze digitali tra gli operatori agricoli, la scarsa copertura di rete in molte aree rurali e, infine, una generale diffidenza verso le tecnologie non ancora pienamente consolidate a livello locale (Ali et al., 2025; IJSRA, 2024).

Tuttavia, i benefici potenziali sono significativi. I sistemi di irrigazione di precisione consentono una riduzione dei consumi idrici tra il 20% e il 50%, con incrementi di resa agricola che possono raggiungere il 15% per le colture ad elevata intensità idrica. L'automazione permette anche una riduzione della manodopera agricola del 30-40%, migliorando l'efficienza gestionale. Inoltre, l'investimento iniziale può generare un ritorno economico positivo in 3-5 anni grazie al risparmio di risorse e input produttivi (Yasin et al., 2021; Udo et al., 2024). In tali contesti, il ruolo delle politiche pubbliche è cruciale: incentivi fiscali, accesso al credito agevolato e programmi di

formazione tecnica sono strumenti essenziali per accelerare la transizione (UNESCO & UN-Water, 2020).

Infine, la digitalizzazione agricola – alimentata da big data, machine learning e modelli agro-climatici predittivi – offre nuove opportunità per ottimizzare la gestione dell'acqua in modo proattivo, aumentando la capacità di adattamento dei sistemi agricoli di fronte agli eventi climatici estremi. L'integrazione di sensori, piattaforme cloud, sistemi decisionali basati su intelligenza artificiale e modelli previsionali consente agli agricoltori di prendere decisioni più informate, ridurre gli sprechi idrici e migliorare la resilienza dei raccolti. Questa trasformazione digitale rappresenta un pilastro chiave per la transizione verso un'agricoltura sostenibile e adattiva, come sottolineato da recenti contributi scientifici sul tema (Vahdanjoo, Sørensen, & Nørremark, 2025). Una recente review (Lakhiar et al., 2024) sottolinea il ruolo centrale dei sistemi di irrigazione smart nell'aumentare l'efficienza idrica, ridurre l'uso di fertilizzanti e migliorare la resilienza climatica. L'impiego combinato di sensori del suolo, algoritmi predittivi, e piattaforme IoT consente una gestione irrigua mirata, basata su dati real-time. Studi su campo riportano riduzioni dei consumi idrici tra il 25% e il 45%, con incrementi di resa fino al 20% e ritorni economici in meno di 5 anni, a seconda del tipo di coltura e sistema adottato.

2.1.3 Riutilizzo delle acque reflue trattate in agricoltura

Il riutilizzo delle acque reflue trattate emerge come una strategia fondamentale per alleggerire la pressione sulle risorse idriche convenzionali. Nonostante il suo immenso potenziale, le stime più recenti rivelano che il riutilizzo globale delle acque reflue rimane largamente sottoutilizzato. Sebbene circa il 56% dei flussi di acque reflue domestiche mondiali sia stato trattato in modo sicuro nel 2020, solo una frazione minima di questo volume, stimata globalmente non superare il 4%, viene effettivamente riutilizzata (WHO & UN-Habitat, 2021; UNESCO & UN-Water, 2020). Malgrado i consolidati benefici ambientali ed economici, il riutilizzo diretto resta spesso confinato a progetti pilota o a contesti locali in ambito urbano e industriale (World Bank, 2021).

Le acque reflue trattate possono essere impiegate per l'irrigazione di colture non alimentari, foraggi e colture industriali, e, laddove la normativa lo consenta e la qualità sia garantita, anche per produzioni destinate al consumo umano. In contesti aridi e semi-aridi, come Israele, California o Tunisia, il recupero idrico ha già raggiunto livelli significativi, contribuendo in modo cruciale a garantire la continuità produttiva e la sicurezza alimentare (Delgado et al., 2024).

Dal punto di vista tecnologico, il trattamento delle acque reflue – attraverso processi avanzati come la filtrazione a membrana, la disinfezione con ozono o raggi UV e l'osmosi inversa – permette di ottenere un effluente sicuro e conforme agli standard sanitari internazionali (Sharma et al., 2024).

L'esperienza della regione Axarquía, in Spagna, dimostra l'efficacia di strategie integrate basate su colture resilienti, riutilizzo agricolo e impianti di desalinizzazione alimentati da fonti rinnovabili. Tali approcci hanno ridotto il deficit idrico agricolo, contenendo al contempo le emissioni climalteranti grazie alla sostituzione dei prelievi da falda con acqua rigenerata (Tocados-Franco et al., 2024). Ma è bene notare che stime recenti suggeriscono che il potenziale di riutilizzo dell'acqua trattata sia stato spesso sovrastimato. Expósito et al. (2024) mostrano che in contesti come la Spagna, dove il riutilizzo è diffuso, gli studi precedenti non hanno tenuto conto di fattori cruciali come il ruolo dei flussi di ritorno, l'accessibilità a risorse convenzionali più economiche e la reale disponibilità a pagare da parte degli utenti agricoli.

È importante considerare che il riutilizzo partecipa attivamente alla chiusura dei cicli dei nutrienti, poiché le acque reflue agricole possono contenere azoto e fosforo in forme assimilabili, riducendo la dipendenza da fertilizzanti sintetici.

Tuttavia, in molti Paesi, l'assenza di un quadro regolatorio chiaro limita l'adozione sistematica del riuso. A ciò si aggiungono le preoccupazioni legate alla percezione del rischio e all'accettazione sociale, specialmente per quanto riguarda le colture alimentari (Mbavarira & Grimm, 2021). Per superare questi ostacoli, sono necessari interventi su più fronti:

- ♣ L'adozione di standard di qualità dell'acqua chiari e basati sul rischio, in linea con le direttive dell'OMS o dell'Unione Europea.
- ♣ L'implementazione di campagne di sensibilizzazione e informazione pubblica mirate.
- ♣ L'adozione di modelli di *governance* partecipativa che coinvolgano attivamente gli agricoltori e le comunità locali.

2.2 INDUSTRIE MANIFATTURIERE E CHIMICHE

2.2.1 Consumi idrici nei processi industriali e rischi operativi

Le industrie manifatturiere e chimiche si configurano come grandi consumatrici di volumi d'acqua lungo l'intero ciclo produttivo, impiegando la risorsa principalmente per processi di raffreddamento, lavaggio, trasporto di materiali, reazioni chimiche e produzione di vapore. Globalmente, l'uso industriale dell'acqua si attesta intorno al 19% dei prelievi totali, ma in molte economie avanzate tale percentuale può superare il 40%, con picchi significativi nel settore energetico, chimico, siderurgico e della produzione cartaria (UNESCO & UN-Water, 2020). Ad esempio, la produzione di una tonnellata di acciaio può richiedere fino a 200 m³ di acqua, mentre la raffinazione di un barile di petrolio ne impiega tra 2 e 5 m³, a seconda delle tecnologie utilizzate.

Questa intrinseca dipendenza idrica espone le aziende a una serie di rischi interconnessi:

- ♣ **Rischi fisici:** La scarsità idrica può limitare drasticamente la disponibilità di acqua grezza per l'industria, obbligando a riduzioni di produzione o persino a sospensioni operative.
- ♣ **Rischi normativi:** Le crescenti restrizioni sui prelievi e sugli scarichi impongono alle imprese di adattarsi a standard ambientali sempre più stringenti, richiedendo investimenti in tecnologie e processi più sostenibili.
- ♣ **Rischi reputazionali:** Un uso eccessivo o inquinante dell'acqua può generare conflitti con le comunità locali e compromettere l'immagine e la reputazione aziendale, con ricadute negative sui mercati e sulle relazioni con gli *stakeholder* (Mbavarira & Grimm, 2021).

Un'analisi condotta sul settore manifatturiero statunitense rivela che fino al 60% dei prelievi idrici industriali può essere ridotto attraverso l'implementazione di tecnologie già disponibili e spesso economicamente vantaggiose. Questi interventi includono il riutilizzo delle acque di processo, il recupero termico e il miglioramento dei sistemi di raffreddamento (Karki & Rao, 2023). L'adozione di strategie di gestione integrata dell'acqua industriale non è quindi solo una scelta ambientale, ma un impulso competitivo strategico.

2.2.2 Strategie di riduzione, riciclo e riuso dell'acqua di processo

La crescente pressione normativa, i rischi concreti legati alla scarsità d'acqua e l'imperativo di contenere i costi stanno spingendo molte industrie a riconsiderare radicalmente il proprio rapporto con la risorsa idrica. Questo ha portato all'emergere di strategie multilivello.

RIDUZIONE DEI CONSUMI

Le strategie di riduzione si concentrano sull'ottimizzazione e l'aumento dell'efficienza dei processi e degli impianti. Questi interventi includono:

- ♣ La sostituzione di macchinari idrovori con modelli a basso consumo energetico e idrico.

- ✦ L'implementazione di valvole automatiche e sistemi di monitoraggio in tempo reale per prevenire sprechi.
- ✦ L'adozione della manutenzione predittiva per evitare perdite e malfunzionamenti. In molti casi, l'adozione di soluzioni "water smart" ha permesso di ottenere riduzioni dei consumi tra il 20% e il 50% nel medio periodo, con ritorni economici positivi (Karki & Rao, 2023).

RICICLO INTERNO DELLE ACQUE DI PROCESSO

Il riciclo prevede il trattamento e la re-immissione dell'acqua all'interno dello stesso ciclo produttivo, riducendo drasticamente i volumi di scarico e, di conseguenza, la dipendenza da approvvigionamenti esterni. Le tecnologie principali che abilitano questo approccio includono:

- ✦ **Sistemi di filtrazione a membrana** (Ultrafiltrazione - UF, Nanofiltrazione - NF, Osmosi Inversa - RO).
- ✦ **Trattamenti biologici integrati** (come i bioreattori a membrana - MBR).
- ✦ **Sistemi di distillazione e scambio ionico**. Secondo Sharma et al. (2024), i sistemi a ciclo chiuso (*closed-loop*) si dimostrano particolarmente efficaci in ambiti ad alta intensità idrica, quali la produzione chimica e la lavorazione dei metalli, dove possono recuperare fino al 90% dell'acqua di processo, riducendo significativamente il fabbisogno idrico netto.

RIUSO CON DESTINAZIONI ALTERNATIVE

Il riuso esterno, ovvero l'utilizzo delle acque trattate per scopi diversi da quello originario, rappresenta un'altra direttrice strategica. Tra le possibili destinazioni rientrano:

- ✦ L'irrigazione di aree verdi industriali.
- ✦ L'alimentazione di torri di raffreddamento.
- ✦ Usi civili e municipali (dove consentito dalla normativa locale). Il riuso industriale è particolarmente rilevante nelle aree soggette a stress idrico, dove la normativa ambientale autorizza – e in alcuni casi incentiva – il riutilizzo dell'acqua trattata, purché rispondente a specifici standard di qualità.

BENEFICI E BARRIERE

L'implementazione sinergica delle strategie di riduzione, riciclo e riuso consente di ottenere **benefici tangibili**:

- ✦ **Risparmi significativi** sui costi di approvvigionamento e trattamento dell'acqua.
- ✦ **Riduzione delle emissioni indirette di gas serra**, legate al pompaggio e trattamento dell'acqua.
- ✦ **Miglioramento della *compliance* ambientale** e rafforzamento della reputazione aziendale. Ciononostante, l'adozione su larga scala è ancora ostacolata da costi iniziali elevati, incertezza normativa e una carenza di competenze tecniche, soprattutto tra le Piccole e Medie Imprese (PMI) (Mbavarira & Grimm, 2021).

2.2.3 Ostacoli normativi, costi di transizione e incentivi economici

Nonostante il crescente interesse per strategie di gestione sostenibile delle risorse idriche, le industrie si confrontano con numerosi ostacoli di natura normativa, economica e istituzionale, il cui superamento richiede un approccio integrato.

OSTACOLI NORMATIVI

Molte giurisdizioni non dispongono ancora di un quadro normativo coerente e aggiornato che disciplini specificamente il riutilizzo dell'acqua industriale. Le principali criticità includono:

- ✦ Incertezza sugli standard di qualità per il riuso, in particolare per applicazioni diverse da quelle agricole.
- ✦ L'assenza di linee guida tecniche chiare sui trattamenti necessari per specifiche destinazioni d'uso.
- ✦ Ritardi nei processi autorizzativi, spesso legati alla frammentazione delle competenze tra enti locali, ambientali e sanitari. In Europa, ad esempio, mentre il Regolamento UE 2020/741 ha definito standard armonizzati per il riutilizzo in agricoltura, non esistono ancora linee guida comunitarie vincolanti per il riuso industriale (Mbavarira & Grimm, 2021). Questa lacuna limita la scalabilità dei progetti circolari nel comparto manifatturiero.

COSTI DI TRANSIZIONE

L'adozione di tecnologie per l'efficienza idrica comporta investimenti significativi, specialmente per:

- ✦ L'installazione di sistemi avanzati di trattamento (es. membrane, AOP).
- ✦ La riconfigurazione degli impianti per il riciclo interno.
- ✦ L'adeguamento dei processi produttivi e dei sistemi di monitoraggio. Secondo Karki e Rao (2023), il costo livellato dell'acqua risparmiata (*Levelized Cost of Conserved Water*) varia da -4000 a +85 €/1000 m³, dove i valori negativi indicano soluzioni economicamente vantaggiose. Tuttavia, nei casi in cui il ritorno dell'investimento si realizza solo nel medio-lungo termine, molte imprese esitano a adottare misure strutturali, specialmente in assenza di obblighi normativi stringenti. Le PMI, inoltre, risultano particolarmente svantaggiate a causa della minore capacità di accesso al credito e della scarsità di competenze tecniche interne.

INCENTIVI ECONOMICI E STRUMENTI DI SUPPORTO

Per superare queste barriere, numerosi Paesi hanno introdotto strumenti economici a sostegno della transizione idrica dell'industria. I principali meccanismi includono:

- ✦ Crediti d'imposta per investimenti in tecnologie "water efficient".
- ✦ Sgravi sulle tariffe idriche per utenti che riducono il carico inquinante o chiudono il ciclo idrico.
- ✦ Programmi di finanziamento agevolato (es. Horizon Europe, BEI Green Loans).
- ✦ Certificazioni ambientali volontarie (es. ISO 14046, AWS Standard) che premiano le imprese virtuose sul piano reputazionale e competitivo.

Secondo lo studio di Mbavarira e Grimm (2021), l'adozione combinata di incentivi economici, semplificazioni procedurali e partenariati pubblico-privati è la strategia più efficace per accelerare la transizione idrica nell'industria, in particolare nei contesti decentralizzati e ad alta intensità idrica.

2.2.4 Industrie Manifatturiere e Chimiche – Analisi Quantitativa

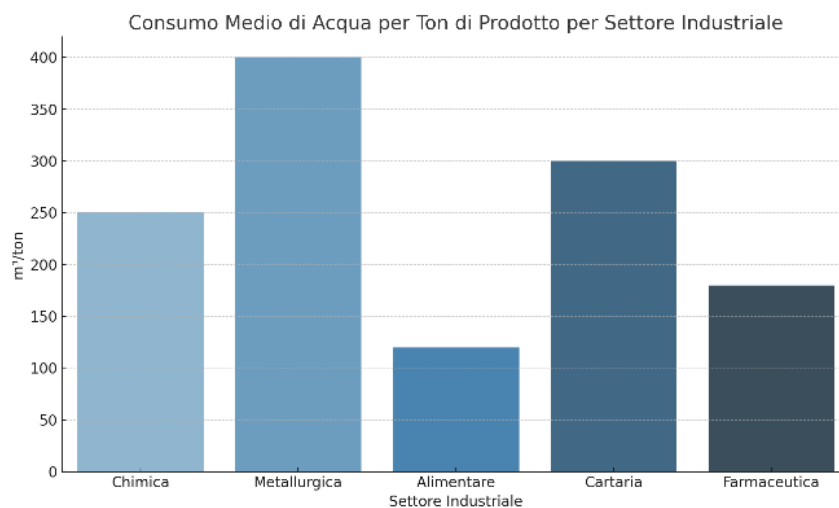
Questa sezione si dedica a un'analisi comparativa dei consumi idrici, del potenziale di riduzione e dei tempi di rientro degli investimenti in tecnologie idriche nei principali settori industriali manifatturieri e chimici. I dati presentati, che includono stime di consumo idrico medio, potenziale di riduzione e ritorno dell'investimento per i vari comparti, sono il risultato di una rielaborazione dei dati contenuti in Karki & Rao (2023), integrati con fonti statistiche nordamericane (USGS, Statistics Canada) e modellizzazioni basate sul *Levelized Cost of Conserved Water*.

È importante sottolineare che i valori sono medie settoriali indicative e possono variare significativamente in funzione delle specifiche tecnologie adottate e dei contesti applicativi.

Tabella 4 Consumi e Potenziale di Riduzione nei Settori Industriali

Settore Industriale	Consumo medio (m ³ /ton)	Potenziale di riduzione (%)	Tempo rientro investimento (anni)
Chimica	250	55	3.2
Metallurgica	400	60	2.8
Alimentare	120	50	4.5
Cartaria	300	45	3.7
Farmaceutica	180	58	3.1

Figura 2 Consumo idrico medio in m³ per tonnellata di prodotto



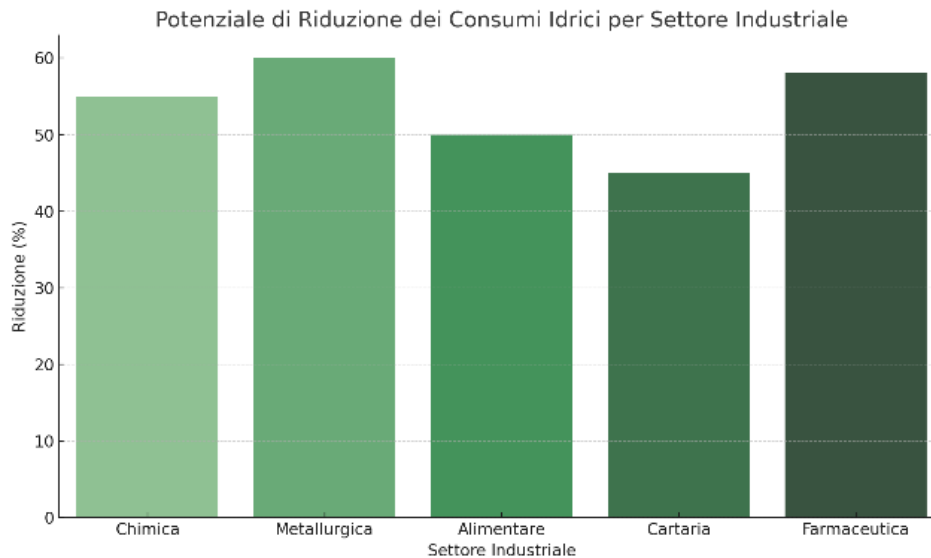
La Figura 2 fornisce un confronto visivo dei consumi idrici medi per tonnellata di prodotto tra i cinque settori industriali esaminati:

- ♣ Il **settore Metallurgico** emerge come il maggiore consumatore, con 400 m³/ton, a causa dell'uso massiccio di acqua per il raffreddamento e la lavorazione dei metalli.
- ♣ Il **settore Cartario** si posiziona al secondo posto, con 300 m³/ton, data l'ingente quantità d'acqua richiesta nei processi di produzione della carta.
- ♣ Il **settore Chimico**, con 250 m³/ton, include processi che spaziano da reazioni e diluizioni a lavaggi intensivi.

- ✦ I settori **Farmaceutico** e **Alimentare**, pur avendo esigenze stringenti in termini di purezza dell'acqua, presentano consumi più contenuti, rispettivamente di 180 e 120 m³/ton.

Questi dati mettono in luce i settori prioritari su cui è cruciale intervenire per ridurre la pressione sulle risorse idriche, in particolare quelli caratterizzati da un'elevata intensità idrica come il metallurgico e il cartario.

Figura 3 Margine di miglioramento (in %)

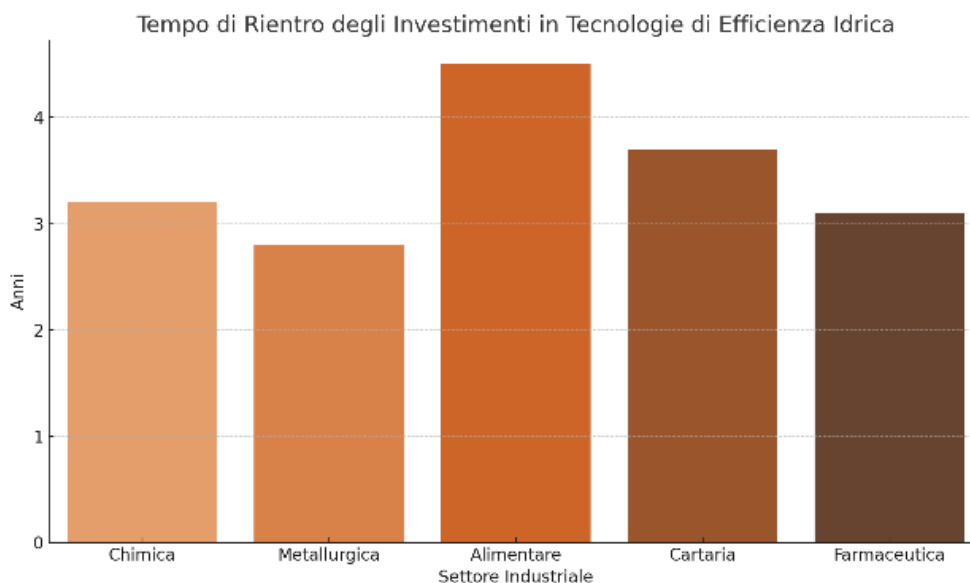


La Figura 3 illustra il **margin**e di miglioramento potenziale che ciascun settore può raggiungere attraverso l'adozione di tecnologie per l'efficienza idrica:

- ✦ È evidente che **tutti i settori mostrano un potenziale di riduzione superiore al 45%**.
- ✦ In particolare, il **settore Metallurgico e Farmaceutico** raggiungono valori che superano il 58-60%, un risultato ottenibile grazie all'introduzione di cicli chiusi, raffreddamento a secco e riutilizzo avanzato delle acque di lavaggio.
- ✦ Anche il **settore Alimentare**, con un potenziale del 50%, può migliorare significativamente la sua impronta idrica tramite l'implementazione di tecnologie a basso consumo e il riuso delle acque di processo.

Questi risultati dimostrano che le industrie, persino le più idrovore, dispongono di **margin**i **tecnicamente ed economicamente praticabili** per ottimizzare i propri consumi idrici, trasformando la sfida della scarsità in un'opportunità di efficienza.

Figura 4 Tempo medio (in anni) per recuperare l'investimento



La Figura 4 presenta il tempo medio (in anni) necessario per recuperare l'investimento in tecnologie volte all'efficienza idrica:

- ◆ Un dato incoraggiante è che tutti i settori considerati presentano tempi di rientro inferiori ai 5 anni.
- ◆ I settori Metallurgico e Chimico si attestano intorno ai 3 anni, grazie al maggior risparmio potenziale derivante dai volumi elevati di acqua che possono essere recuperati o risparmiati.
- ◆ Il settore Alimentare mostra tempistiche leggermente più lunghe (4,5 anni), ma che rimangono ampiamente entro una soglia economicamente sostenibile.

Questi dati rafforzano l'argomento che l'investimento in tecnologie idriche non solo è sostenibile dal punto di vista ambientale, ma si rivela anche economicamente redditizio in tempi compatibili con le logiche aziendali, specialmente se accompagnato da politiche di incentivo mirate. Ciò giustifica pienamente l'implementazione di strategie politiche volte a promuovere l'adozione diffusa di soluzioni efficienti.

2.2.5 Pressione idrica nei settori ad alta intensità tecnologica

Alla pressione idrica esercitata dai comparti industriali tradizionali si aggiunge oggi una nuova e crescente sfida: la rapida espansione di settori tecnologici emergenti. Tra questi spiccano la produzione di semiconduttori, i *data center*, l'industria biofarmaceutica e la produzione di idrogeno verde. Questi settori, sebbene diversi, sono accomunati da una forte dipendenza da acqua ultrapura (UPW), da vincoli stringenti di qualità e da un'elevata sensibilità alle interruzioni idriche.

La produzione di semiconduttori, per esempio, richiede in media tra 2.000 e 7.000 litri di acqua ultrapura per singolo chip, a seconda del processo e delle generazioni tecnologiche (ESIA, 2023; Intel, 2022). Un esempio lampante è Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC), leader mondiale del settore, che consuma circa 150.000 m³/giorno, un fabbisogno idrico equivalente a quello di una città di 600.000 abitanti. Analogamente, i *data center* di ultima generazione utilizzano dai 2 ai 5 milioni di litri d'acqua al giorno per il raffreddamento, a seconda della tecnologia di *cooling* impiegata (evaporativa, adiabatica, ibrida) e delle condizioni climatiche locali (Uptime Institute, 2022).

Nel settore energetico, la produzione di idrogeno verde tramite elettrolisi richiede mediamente 9-12 litri di acqua deionizzata per ogni kg di H₂. Se si dovessero raggiungere gli ambiziosi obiettivi della *Green Hydrogen EU Roadmap*, si stima un fabbisogno idrico complessivo di oltre 21 miliardi di m³/anno entro il 2050 (Hydrogen Europe, 2023; IEA, 2022). Anche la farmaceutica avanzata presenta requisiti idrici qualitativi estremamente elevati (ad esempio, acqua WFI – *Water for Injection*), con cicli di lavaggio e produzione che possono incidere fino al 20-25% del consumo energetico totale degli impianti (EFPIA, 2022).

Questi comparti, sebbene meno idrovori in termini volumetrici rispetto a settori come la metallurgia o la cartaria, generano un'elevata pressione qualitativa e operativa, spesso in territori densamente urbanizzati e già sottoposti a stress idrico stagionale. La loro vulnerabilità al rischio idrico si traduce direttamente in rischio reputazionale, operativo e finanziario, con impatti misurabili in termini di interruzioni produttive, perdite di valore, variazioni del *rating* ESG (*Environmental, Social, and Governance*) e accesso al credito (CDP, 2023).

Secondo lo studio di Water Europe (2024), le tecnologie ad alta intensità idrica rappresentano oggi una delle principali sfide per la compatibilità tra politiche industriali, piani di adattamento climatico e strategie di *governance* della risorsa. Per affrontare questa criticità, è imperativo passare da logiche allocative statiche a modelli di prioritizzazione basati sul valore marginale, sul rischio sistemico e sulla resilienza operativa.

Un'analisi condotta nei Paesi Bassi ha dimostrato che la localizzazione delle industrie è fortemente correlata alla vicinanza a fonti idriche, ma anche condizionata da fattori quali i diritti di estrazione, la competizione per l'uso dell'acqua e la qualità delle risorse disponibili. Lo studio ha evidenziato come alcune regioni ad alta intensità industriale (es. Noord-Brabant) presentino vulnerabilità crescenti legate allo stress idrico, con implicazioni dirette sulla continuità produttiva e sulla pianificazione territoriale. La valutazione dell'impatto economico del consumo idrico per settore suggerisce l'urgenza di strategie di gestione del rischio basate su indicatori territoriali (Teo et al., 2025).

2.3 TRATTAMENTO DELLE ACQUE REFLUE E DEI FANGHI

2.3.1 Economia circolare nel trattamento delle acque reflue

Il trattamento delle acque reflue è stato tradizionalmente percepito come un processo "a valle", finalizzato primariamente alla protezione ambientale attraverso la depurazione degli scarichi. Tuttavia, con l'intensificarsi della scarsità idrica globale e delle crescenti pressioni ambientali, sta emergendo un nuovo paradigma basato sull'economia circolare. In questa visione innovativa, l'acqua non è più solo una risorsa da depurare, ma si configura come un prezioso vettore per il recupero di valore, attraverso il riutilizzo dell'effluente trattato, la produzione di energia e il recupero di nutrienti essenziali.

DAL MODELLO LINEARE AL CICLO CHIUSO

Mentre il modello lineare prevede il semplice prelievo, utilizzo e scarico dell'acqua, l'approccio circolare mira a "chiudere il ciclo" attraverso diverse strategie interconnesse:

- ♣ **Il riuso diretto dell'effluente trattato** per diverse finalità.
- ♣ La **valorizzazione dei fanghi** di depurazione tramite la produzione di biogas o la trasformazione in fertilizzanti.
- ♣ Il **recupero di risorse critiche** come fosforo, azoto, metalli e acqua rigenerata di alta qualità. Secondo la Banca Mondiale (World Bank, 2021), l'integrazione dei principi dell'Economia Circolare nei sistemi di trattamento delle acque può ridurre

significativamente l'impronta ambientale e generare nuove entrate per i gestori idrici (Delgado et al., 2024).

INTEGRAZIONE DI TECNOLOGIE ABILITANTI

Per realizzare un impianto di trattamento circolare, è necessaria l'integrazione di tecnologie avanzate, tra cui:

- ♣ **Bioreattori a membrana (MBR)**, che garantiscono effluenti di altissima qualità.
- ♣ **Digestione anaerobica** per la generazione di biogas dai fanghi.
- ♣ **Recupero di fosforo** tramite precipitazione sotto forma di struvite ($MgNH_4PO_4$).
- ♣ **Sistemi di separazione avanzata** come nanofiltrazione e osmosi inversa, per ottenere acqua con specifiche di purezza elevate. In nazioni all'avanguardia come i Paesi Bassi e la Germania, questi approcci sono già implementati in impianti che operano come vere e proprie "**bio-raffinerie idriche**", capaci di produrre simultaneamente energia, acqua per il riuso e materie prime seconde (Taron et al., 2023).

BENEFICI AMBIENTALI, ECONOMICI E SISTEMICI

I vantaggi derivanti dall'adozione di un approccio circolare sono molteplici e pervadono diverse dimensioni:

- ♣ **Riduzione della dipendenza da risorse primarie**, come i fertilizzanti sintetici.
- ♣ **Abbattimento dei costi di smaltimento dei fanghi**, trasformandoli da rifiuto a risorsa.
- ♣ **Maggiore resilienza dei sistemi idrici urbani**, rendendoli meno vulnerabili agli shock idrici.
- ♣ **Opportunità di integrazione con settori limitrofi** (energia, agricoltura, industria), creando sinergie virtuose. Un'analisi condotta dall'Istituto Internazionale per la Gestione delle Risorse Idriche (IWMI) ha evidenziato come i modelli di business basati sul recupero e riuso dei fanghi possano essere economicamente sostenibili anche nei contesti del Sud globale, a condizione che siano supportati da un quadro normativo favorevole e da un'adeguata pianificazione strategica (Taron et al., 2023).

BARRIERE E LEVE ABILITANTI

Nonostante i notevoli progressi tecnologici, la transizione verso impianti di trattamento circolari è ancora ostacolata da diverse barriere: normative obsolete, una scarsa accettazione sociale del riuso di acqua e fanghi e la mancanza di incentivi economici mirati per i gestori. Per superare questi ostacoli, è essenziale integrare il riuso e il recupero nelle normative ambientali, promuovere collaborazioni pubblico-private e incentivare soluzioni decentralizzate e modelli di economia circolare urbana.

2.3.2 Recupero di risorse: acqua, energia, nutrienti

Le moderne tecnologie di trattamento delle acque reflue non solo consentono la depurazione, ma aprono la strada alla valorizzazione dell'acqua rigenerata, alla produzione di energia rinnovabile e all'estrazione di nutrienti utili per l'agricoltura e l'industria. Stime recenti rafforzano ulteriormente il ruolo strategico della valorizzazione delle acque trattate come *asset* fondamentale per colmare il divario tra disponibilità e domanda idrica. Secondo Kahn et al. (2025), il riuso integrale delle acque reflue disponibili a livello globale potrebbe ridurre il *global water gap* del 9,1% in condizioni climatiche attuali, con un'efficacia solo leggermente inferiore anche in scenari di riscaldamento fino a +3 °C. L'impatto potenziale risulta particolarmente

rilevante in contesti metropolitani altamente stressati: nella città di Delhi, ad esempio, il riuso totale delle acque reflue potrebbe abbattere il deficit idrico urbano del 29,6%, mentre il solo riuso delle acque già trattate porterebbe comunque a una riduzione del 16,6%. Questi dati evidenziano la necessità impellente di investire in infrastrutture per il trattamento e il riuso avanzato, non solo per motivi ambientali, ma anche come risposta adattiva efficace alla crescente variabilità climatica e alla pressione demografica (Kahn et al., 2025).

Per abilitare una valorizzazione efficace delle acque reflue in ambito industriale, è necessario affrontare anche le barriere di tipo normativo, economico e sociale che spesso ostacolano il riuso. Secondo Capodaglio et al. (2023), strategie di riuso "*fit-for-purpose*", basate su approcci multibarriera (tecnologici e gestionali), impianti decentralizzati e percorsi di comunicazione trasparente con gli *stakeholder*, possono superare i principali ostacoli all'adozione diffusa. L'accettabilità sociale, in particolare, si rivela un fattore critico per la scalabilità dei sistemi di riuso e richiede l'integrazione di pratiche partecipative, educazione ambientale e trasparenza nelle *performance* di qualità.

RECUPERO DI ACQUA RIGENERATA

L'acqua trattata può avere diversi impieghi, contribuendo a ridurre la dipendenza dalle fonti primarie:

- ♣ **Irrigazione agricola**, sia per colture alimentari (con standard adeguati) che non alimentari.
- ♣ **Usi industriali**, quali raffreddamento e lavaggi di processo.
- ♣ **Usi urbani non potabili**, come la pulizia delle strade o l'alimentazione di fontane.
- ♣ In casi selezionati e previa filtrazione avanzata (RO, UV, ozono), può essere impiegata anche come **risorsa potabile indiretta**. Tecnologie come i bioreattori a membrana (MBR), la nanofiltrazione (NF) e l'osmosi inversa (RO) consentono di ottenere acqua di alta qualità. Ad esempio, a Singapore, in Israele e in California, l'acqua rigenerata riveste un ruolo cruciale nel soddisfare il fabbisogno urbano e industriale (Delgado et al., 2024).

RECUPERO DI ENERGIA

I fanghi prodotti dal trattamento biologico delle acque reflue sono ricchi di sostanza organica e rappresentano una fonte eccellente per la produzione di energia. Le principali tecnologie di recupero energetico includono:

- ♣ La **digestione anaerobica** per la produzione di biogas (metano), utilizzabile per generare elettricità o calore.
- ♣ La **pirolisi e la gassificazione** per la produzione di *syngas* e *biochar*.
- ♣ Il **co-incenerimento** con recupero di calore. Secondo Taron et al. (2023), la digestione anaerobica può ridurre fino al 50% il volume dei fanghi e produrre fino a 0,8 m³ di biogas per kg di solidi volatili distrutti, rendendo energeticamente autosufficienti gli impianti più avanzati.

RECUPERO DI NUTRIENTI

I fanghi di depurazione e i liquami trattati contengono macroelementi fondamentali per l'agricoltura: azoto (N), fosforo (P) e potassio (K). Il recupero di questi nutrienti riduce la dipendenza da fertilizzanti sintetici, il cui ciclo produttivo è energivoro e, spesso, geopoliticamente vulnerabile. Le tecnologie emergenti permettono:

- ♣ La precipitazione di fosforo sotto forma di struvite ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$).
- ♣ Il recupero di azoto come ammoniaca o nitrati.
- ♣ La valorizzazione agronomica del digestato. In Germania, i nuovi regolamenti (AbfKlärV) impongono dal 2029 il recupero obbligatorio del fosforo dagli impianti con capacità superiore a 50.000 Abitanti Equivalenti (A.E.), favorendo la diffusione di queste tecnologie (Taron et al., 2023).

VALORE ECONOMICO E AMBIENTALE DEL RECUPERO INTEGRATO

Il recupero simultaneo di acqua, energia e nutrienti offre numerosi vantaggi:

- ♣ Riduzione dei costi di smaltimento dei fanghi;
- ♣ Riduzione delle emissioni di gas serra;
- ♣ Generazione di prodotti riutilizzabili e vendibili;
- ♣ Contributo agli obiettivi SDG (in particolare 6, 7, 12 e 13).

Uno studio condotto dall'Istituto IWMI stima che i modelli integrati di recupero e riuso possano ridurre i costi operativi complessivi di oltre il 25%, generando al contempo nuove entrate per i gestori del servizio idrico (Taron et al., 2023).

2.3.3 Modelli di business innovativi e scalabilità delle soluzioni

L'implementazione su vasta scala di pratiche di economia circolare nel trattamento delle acque reflue e dei fanghi non può prescindere dall'adozione di nuovi modelli di business capaci di integrare armonicamente sostenibilità ambientale, efficienza economica e valore sociale. Questi modelli innovativi mirano a superare il tradizionale approccio "utility-centrico", aprendo la strada a partenariati pubblico-privati, investimenti basati sulla performance e logiche di mercato per il recupero delle risorse, trasformando gli impianti di depurazione in vere e proprie bio-raffinerie idriche.

Modelli "Resource-as-a-Service:" Uno dei modelli emergenti più promettenti è quello del "resource-as-a-service", in cui i gestori del servizio idrico non si limitano più a vendere il "trattamento", ma offrono attivamente le risorse recuperate: acqua rigenerata, fertilizzanti, energia e biomateriali. Gli impianti diventano così poli di produzione circolare, generando flussi di entrate multipli:

- ♣ La **vendita di acqua di riuso** a enti pubblici o industrie locali per usi non potabili.
- ♣ La **commercializzazione di fertilizzanti** derivanti da struvite o compost di fanghi.
- ♣ La **generazione di energia** per autoconsumo o vendita in rete (es. biogas o *syngas*). Questo modello è già operativo in impianti all'avanguardia in Belgio, Paesi Bassi, Germania e Svezia, dove i gestori hanno saputo sviluppare mercati locali vivaci per i sottoprodotti della depurazione (Mbavarira & Grimm, 2021; Taron et al., 2023).

Modelli ibridi Pubblico-Privati (PPP): La gestione del rischio intrinseca alla complessità tecnologica e agli ingenti investimenti rende strategici i modelli ibridi PPP, dove soggetti privati apportano competenze specialistiche e capitali in cambio di una condivisione dei benefici. Si assiste così alla diffusione di:

- ♣ **Contratti DBOO (Design-Build-Own-Operate)**, che affidano al privato la progettazione, costruzione, proprietà e gestione dell'impianto.

- ♣ **Joint venture** per la gestione degli impianti di digestione e valorizzazione.
- ♣ **Concessioni multiservizio** con responsabilità estese al trattamento e al recupero di risorse. Queste configurazioni si dimostrano particolarmente efficaci in contesti urbani o industriali ad alta densità, dove la scala permette di sfruttare economie di apprendimento e di scala significative (Delgado et al., 2024).

Schemi basati sulla performance: Nuovi strumenti finanziari legati alla sostenibilità ambientale, come i *green bonds* e i contratti di *performance* ambientale, stanno incentivando la realizzazione di impianti orientati al concetto di "zero waste". In questi schemi, il ritorno economico per l'investitore o il gestore è direttamente legato alla quantità e alla qualità delle risorse recuperate, anziché alla sola quantità di acqua trattata. Tale approccio riduce i costi a lungo termine per la collettività e contribuisce a migliorare la resilienza complessiva del sistema idrico.

Micro-Impianti Decentralizzati: La scalabilità delle soluzioni circolari dipende da una combinazione di fattori, tra cui:

- ♣ La **dimensione degli impianti**, con un maggiore potenziale di recupero in quelli superiori a 100.000 Abitanti Equivalenti (A.E.).
- ♣ La **domanda locale di risorse secondarie**, ad esempio dalla vicina agricoltura periurbana o da distretti industriali.
- ♣ La **presenza di policy favorevoli**, come tariffe incentivanti, obblighi di recupero specifici e standard ambientali chiari.
- ♣ Nel Sud Globale, l'IWMI (2023) ha documentato casi di successo in cui modelli di micro-impianti decentralizzati, gestiti da cooperative locali o *start-up* sociali, hanno prodotto fertilizzanti e acqua per l'agricoltura urbana in modo economicamente sostenibile. Questi successi sono stati resi possibili da una combinazione di innovazione *low-tech*, accesso ai microcrediti e una stretta integrazione con le politiche urbane locali.

I modelli di business per la valorizzazione delle acque reflue e dei fanghi si stanno volgendo verso approcci multiprodotto, multi-attore e multisettoriali. La loro scalabilità dipenderà dalla capacità di creare ecosistemi locali che connettano domanda e offerta di risorse rigenerate.

2.4 INTERCONNESSIONI E SINERGIE INTERSETTORIALI NEL CICLO IDRICO

L'acqua è una risorsa che lega trasversalmente tutti i settori; pertanto, per capirne l'utilizzo, non può essere analizzata in modo compartimentato.

Agricoltura, industria, settore urbano e tecnologie avanzate non solo competono per la risorsa idrica, ma al contempo cooperano nel suo utilizzo. Una *governance* sostenibile e resiliente deve quindi considerare le interconnessioni sistemiche tra i settori, andando oltre la semplice analisi dei consumi diretti.

2.4.1 Competizione per la risorsa

In contesti caratterizzati da un alto stress idrico (indicato da un WEI+ > 20%), l'accesso all'acqua genera dinamiche competitive significative tra settori economici e uso civile, specialmente nei mesi estivi o durante periodi di siccità prolungata.

Le principali aree di tensione si manifestano tra:

- ♣ **Irrigazione agricola e approvvigionamento urbano**, come si osserva in regioni quali il Sud Italia o la Spagna orientale, dove le esigenze idriche per l'agricoltura possono entrare in conflitto con la domanda per usi civili.

- ✦ **Settori industriali energivori e tecnologie digitali**, con esempi come il raffreddamento dei *data center* o l'elettrolisi per la produzione di idrogeno verde, che richiedono ingenti volumi d'acqua.
- ✦ **Protezione ambientale e degli ecosistemi versus usi economici**, in relazione alla necessità di garantire flussi ecologici minimi per la salute degli ecosistemi acquatici (Vanham et al., 2021).

Tali competizioni comportano costi di opportunità, rendendo necessari strumenti di allocazione trasparente e meccanismi di compensazione intersettoriale per una gestione più equa ed efficiente della risorsa (OCSE, 2022).

2.4.2 Sinergie attraverso il riuso e la simbiosi

Parallelamente alle dinamiche competitive, esistono numerose sinergie tecnicamente realizzabili che possono ridurre la pressione sistemica sulla risorsa idrica e migliorare l'efficienza complessiva del ciclo:

- ✦ **Reflui urbani per irrigazione agricola**: Il riutilizzo delle acque reflue depurate per scopi irrigui, anche tramite fitodepurazione, rappresenta un esempio virtuoso di simbiosi tra il settore urbano e quello agricolo.
- ✦ **Acque industriali trattate per usi non potabili urbani**: Le acque industriali adeguatamente trattate possono essere reintrodotte nel ciclo urbano per usi come il lavaggio delle strade o l'irrigazione del verde pubblico.
- ✦ **Fanghi e scarti agroindustriali per produzione di biogas/struvite**: La valorizzazione dei fanghi di depurazione e degli scarti agroindustriali per il recupero di nutrienti (come il fosforo sotto forma di struvite) e per la produzione di energia (biogas) crea un circolo virtuoso.
- ✦ **Acqua di raffreddamento in uscita da *data center* per reti di teleriscaldamento**: L'acqua calda di scarto dei *data center* può essere impiegata per alimentare reti di teleriscaldamento, come già avviene ad Amsterdam e Singapore, trasformando un "rifiuto" in una risorsa energetica.

Questi modelli di simbiosi industriale-idrica possono essere sistematicamente integrati in contesti ad alta densità infrastrutturale attraverso lo sviluppo di *Water-Oriented Living Labs* (Water Europe, 2024), veri e propri ambienti di sperimentazione per soluzioni innovative.

2.4.3 Verso una pianificazione integrata

Per promuovere un uso intersettoriale intelligente e sostenibile della risorsa idrica, è indispensabile l'adozione di strumenti di pianificazione idrica integrata, che includano:

- ✦ **Bilanci idrici multisettoriali**: L'utilizzo di framework come il SEEA-Water (Sistema di Contabilità Economico-Ambientale per l'Acqua) delle Nazioni Unite (UN, 2021) permette una visione olistica dei flussi idrici.
- ✦ **Contabilità ambientale con flussi incrociati**: Per tracciare e valutare l'interscambio di risorse tra i diversi settori.
- ✦ **Indicatori di co-benefici intersettoriali**: Per misurare non solo i benefici diretti, ma anche quelli indiretti e le sinergie (es. gas serra evitati, valore fertilizzante del recupero di nutrienti, miglioramento della sicurezza idrica urbana).

Inoltre, è fondamentale rafforzare i meccanismi di concertazione tra gli attori chiave (agricoltura, *utility*, industria, enti locali) attraverso lo sviluppo di piattaforme stabili e multilivello. Solo un



approccio collaborativo e integrato può garantire la sostenibilità a lungo termine della risorsa idrica in un contesto di crescenti sfide ambientali e demografiche.

2.5 TABELLE E COMPARAZIONI

2.5.1 Tabella compara le tecnologie di recupero da acque reflue e fanghi

Tipo	Tecnologia	Risorsa recuperata	Efficienza stimata (%)	Stato di maturità
Acqua rigenerata	Osmosi inversa (RO)	Acqua per riuso potabile/industriale	95	Avanzata
Acqua rigenerata	Bioreattore a membrana (MBR)	Acqua per usi agricoli/urbani	85	Avanzata
Energia	Digestione anaerobica	Biogas	60	Diffusa
Energia	Pirolisi/ Gassificazione	Syngas, biochar	40	Emergente
Nutrienti	Precipitazione struvite	Fosforo (P)	70	Diffusa
Nutrienti	Separazione ammoniacale	Azoto (N)	50	Emergente

2.5.2 Tabella riepilogativa con le strategie e le criticità principale

Settore	Strategie Chiave	Criticità Principali
Agroalimentare	Irrigazione di precisione, riuso reflui trattati, monitoraggio digitale	Alta vulnerabilità climatica, dispersioni, limiti normativi al riuso agricolo
Industria Manifatturiera	Riciclo interno, ottimizzazione processi, digitalizzazione impianti	Alti costi di investimento iniziale, scarsità idrica localizzata, vincoli regolatori
Trattamento Reflui	MBR, AOP, digestione anaerobica, recupero nutrienti e riuso idrico	Normativa frammentaria, costi operativi, accettazione sociale del riuso

2.5.3 Tabella modelli di business trattamento acque reflue e fanghi

Modello	Descrizione	Esempi Applicativi	Vantaggi Principali
Resource-as-a-Service (RaaS)	Vendita di risorse recuperate dai processi di trattamento	Acqua rigenerata, fertilizzanti, energia	Diversificazione entrate, economia circolare
Partnership Pubblico-Privati (PPP)	Collaborazione tra enti pubblici e privati per la gestione degli impianti	Contratti DBOO, joint venture	Condivisione rischi, accesso a competenze e capitali
Schemi Basati sulla Performance	Modelli finanziari legati ai risultati ottenuti	Green bonds, contratti di performance	Incentivazione all'efficienza, riduzione costi operativi
Micro-Impianti Decentralizzati	Piccoli impianti gestiti localmente	Impianti containerizzati per agricoltura	Flessibilità, adattabilità, riduzione costi di distribuzione

2.6 PUNTI PRINCIPALI

Il settore agroalimentare è il principale consumatore di acqua.

Con circa il 70% dei prelievi globali, l'agricoltura è intrinsecamente dipendente dalla risorsa idrica e particolarmente vulnerabile agli impatti del cambiamento climatico. Il punto cruciale su cui intervenire è l'irrigazione, attraverso l'adozione di tecnologie di precisione e il riuso sicuro delle acque (Liu et al., 2022; Rastogi et al., 2024).

Le industrie manifatturiere affrontano rischi operativi crescenti.

La scarsità d'acqua può compromettere la continuità della produzione, far lievitare i costi e incidere sulla conformità normativa. L'efficienza idrica e il riciclo interno delle acque stanno diventando fattori determinanti per la competitività e la resilienza industriale (Karki & Rao, 2023).

Il trattamento delle acque reflue si sta trasformando da costo a risorsa.

L'adozione di tecnologie avanzate come i Bioreattori a Membrana (MBR), i Processi di Ossidazione Avanzata (AOP) e il recupero di nutrienti sta permettendo di trasformare gli impianti di depurazione in veri e propri *hub* circolari. Questi impianti possono produrre acqua rigenerata, energia (biogas) e fertilizzanti verdi, raggiungendo un potenziale di autosufficienza energetica fino all'80% (Taron et al., 2023).

Esistono soluzioni settoriali efficaci, ma la scalabilità rimane una sfida.

Le tecnologie per l'efficienza idrica e il recupero delle risorse sono pronte e disponibili. Tuttavia, la loro adozione su larga scala è ancora ostacolata da barriere diffuse, tra cui la mancanza di standard chiari, costi iniziali elevati e resistenze di natura normativa e culturale. Per replicare i casi di successo è necessario un coordinamento efficace, l'introduzione di incentivi mirati e lo sviluppo di *partnership* pubblico-private.

È necessario un approccio differenziato ma integrato.

Ogni settore presenta esigenze e vincoli specifici riguardo alla gestione dell'acqua. Tuttavia, la chiave per una transizione sostenibile risiede nell'integrazione dei sistemi (ad esempio, l'uso agricolo delle acque reflue trattate industrialmente o la creazione di distretti idrici condivisi) e nella costruzione di ecosistemi circolari e cooperativi tra i diversi attori.

3 MISURARE L'EFFICIENZA IDRICA

Come osservato da Lord William Thomson Kelvin: "Se non si può misurare qualcosa, non si può migliorarla."

Questa massima è particolarmente calzante quando si parla di efficienza idrica, che rappresenta uno degli indicatori chiave per valutare la sostenibilità di sistemi produttivi, urbani e naturali. Misurare in modo coerente e comparabile il rapporto tra l'uso dell'acqua e i risultati ottenuti è essenziale per pianificare interventi efficaci, monitorare i progressi e identificare le aree prioritarie di intervento.

3.1 INDICATORI QUANTITATIVI: *WATER FOOTPRINT*, *STRESS IDRICO*, *PERFORMANCE* SETTORIALI

Gli indicatori quantitativi offrono strumenti preziosi per valutare l'intensità d'uso dell'acqua, il livello di stress idrico a cui un sistema è sottoposto e le *performance* settoriali rispetto a *benchmark* regionali o internazionali.

WATER FOOTPRINT (WF)

Il concetto di Water Footprint (impronta idrica), sviluppato da Hoekstra et al. (2011), è un indicatore che misura il volume totale di acqua dolce utilizzata per produrre un bene o un servizio. Questo concetto si articola in tre componenti principali:

- ♣ **Blue Water:** Si riferisce all'acqua prelevata da fonti superficiali o sotterranee, come fiumi, laghi e falde acquifere.
- ♣ **Green Water:** Indica l'umidità del suolo proveniente direttamente dalla pioggia e immagazzinata nelle radici, utilizzata dalla vegetazione per la crescita.
- ♣ **Grey Water:** Rappresenta il volume di acqua dolce necessario a diluire gli inquinanti rilasciati durante la produzione fino a raggiungere standard di qualità accettabili.

Per fornire un riferimento concreto circa l'impronta idrica media associata ai principali beni di consumo, ecco alcuni esempi: per la carne bovina, il valore si aggira intorno ai 15.000 litri per chilogrammo; per il riso, si stima un'impronta idrica media pari a circa 2.500 litri per chilogrammo; mentre per il cotone, il fabbisogno idrico si attesta intorno ai 10.000 litri per chilogrammo. Tali stime evidenziano l'elevata intensità d'uso della risorsa idrica nei processi produttivi e sottolineano la necessità di strategie di mitigazione orientate all'uso efficiente e sostenibile dell'acqua (Hoekstra & Chapagain, 2007; Mekonnen & Hoekstra, 2011).

Questo indicatore si rivela estremamente utile per confrontare l'impronta idrica di diversi prodotti, regioni e strategie produttive. Il concetto di WF è inoltre integrato in numerosi standard volontari, come la norma ISO 14046.

STRESS IDRICO

Lo stress idrico è definito come il rapporto tra i prelievi idrici annuali totali e la disponibilità di risorse idriche rinnovabili, secondo l'indicatore SDG 6.4.2 delle Nazioni Unite. Una situazione viene considerata di forte stress quando questo rapporto supera il 40% (UN-Water, 2020). Tuttavia, analisi più avanzate suggeriscono che tale misura risulta incompleta se non considera anche la qualità dell'acqua disponibile (van Vliet et al., 2021).

I dati più aggiornati mostrano un quadro allarmante:

- Nel 2022, circa 2,4 miliardi di persone vivevano in paesi affetti da stress idrico, in aumento rispetto agli anni precedenti (UNESCO & UN-Water, 2024).
- Il 25% della popolazione globale è esposta a stress idrico “estremamente elevato”, ovvero utilizza oltre l’80% delle risorse di acqua dolce disponibili annualmente (WRI, 2023).
- A livello globale, l’indicatore SDG 6.4.2 ha raggiunto il 18,6% nel 2021, con un incremento del 2,8% rispetto al 2015 (FAO & UN-Water, 2024).
- Entro il 2050, circa il 60% della popolazione mondiale potrebbe essere interessata da stress idrico per almeno un mese all’anno (WRI, 2023).
- In Europa, nel 2022, la scarsità idrica ha colpito il 34% del territorio dell’UE durante almeno una stagione; circa il 30% della popolazione europea vive in aree a stress idrico permanente, mentre il 70% sperimenta situazioni di stress stagionale estivo (EEA, 2025).

Van Vliet et al. (2021) propongono un approccio integrato che include anche la qualità dell’acqua superficiale (salinità, inquinanti organici, nutrienti, temperatura) come determinante chiave dello stress idrico. Questo approccio rivela che la quota di popolazione mondiale affetta da grave scarsità idrica passa dal 30% (basata solo sulla quantità) al 40% se si include la qualità. Particolarmente critiche risultano le condizioni in Cina orientale, India, Medio Oriente, Messico e bacino del Mediterraneo, dove l’inquinamento da reflui agricoli, urbani e industriali amplifica le limitazioni legate alla quantità.

L’analisi evidenzia anche il potenziale contributo di tecnologie idriche “pulite”, come la dissalazione e il riuso delle acque reflue trattate, nel ridurre lo stress idrico. Un’espansione della dissalazione (da 2,9 a 13,6 miliardi m³/mese) e del riuso dei reflui (da 1,6 a 4,0 miliardi m³/mese) potrebbe ridurre la popolazione globale esposta a stress severo dal 40% al 14% (van Vliet et al., 2021). Tuttavia, queste soluzioni richiedono una valutazione attenta dei costi energetici, delle emissioni, della gestione dei residui (es. salamoia) e dell’accettabilità sociale.

Infine, gli strumenti di *Water Stewardship*, come il protocollo AWS (*Alliance for Water Stewardship*), permettono di applicare indicatori di stress anche a scala di bacino, promuovendo azioni coordinate tra i diversi utilizzatori e settori (AWS, 2019).

PERFORMANCE SETTORIALI

Per valutare l’efficienza idrica settoriale, si utilizzano indicatori specifici come:

- m³ di acqua per tonnellata di prodotto (industria, agricoltura);
- litri per kWh (energia termoelettrica);
- litri per abitante al giorno (ciclo idrico urbano).
- produttività economica dell’acqua (*Water Productivity*) espressa in €/m³ o \$/m³.

Il consumo idrico varia sensibilmente a seconda del settore di utilizzo e del contesto geografico. Ad esempio, la produzione di acciaio richiede mediamente tra 120 e 200 metri cubi d’acqua per ogni tonnellata di acciaio prodotto, a seconda della tecnologia impiegata e dell’efficienza degli impianti (Karki & Rao, 2023). In ambito agricolo, l’irrigazione del riso rappresenta una delle pratiche a maggiore intensità idrica, con consumi che si attestano generalmente tra 3.000 e 5.000 metri cubi per ettaro, in funzione del sistema irriguo adottato e delle condizioni agro-climatiche locali (Uhlenbrook et al., 2022). Anche in ambito urbano, il consumo d’acqua presenta ampie variazioni: si stima un utilizzo pro capite compreso tra 100 e 250 litri per abitante

al giorno, con differenze marcate dovute a fattori socioeconomici, infrastrutturali e culturali (Millington & Scheba, 2020; Vanham et al., 2021).

Il benchmarking di questi dati rispetto a standard settoriali e best practice consente di:

- ✦ identificare margini di miglioramento.
- ✦ valutare il ritorno degli investimenti in efficienza.
- ✦ integrare gli obiettivi di riduzione nei report ESG e nei bilanci ambientali.

Quando questi indicatori entrano a far parte delle normative, degli standard industriali o dei bilanci ambientali delle imprese, diventano alleati preziosi per una gestione consapevole e trasparente dell'acqua.

Nota operativa: Water Productivity i limiti dell'indicatore economico

L'indicatore di "produttività economica dell'acqua" (espressa in €/m³ o \$/m³) è largamente impiegato per confrontare l'efficienza idrica tra settori e regioni. Tuttavia, se utilizzato da solo, può generare un'illusione di efficienza, poiché non riflette né la scarsità idrica né gli impatti ambientali. Ozcelik et al. (2024) mostrano che la crescita dell'output economico associata a una riduzione del prelievo non implica necessariamente un miglioramento nella sostenibilità: può trattarsi di un decoupling spurio, legato a rialzi di prezzo o variazioni macroeconomiche, piuttosto che a una reale ottimizzazione idrica.

Si raccomanda quindi di integrarlo con metriche biofisiche (es. Physical Water Productivity in kg/m³) e con indicatori contestuali come il Water Stress Index e il grado di pressione sul capitale naturale idrico. Questo approccio consente di evitare sovrastime dell'efficienza e migliora la leggibilità ecologica delle strategie aziendali e territoriali.

3.1.1 Limiti fisici e qualitativi alla disponibilità idrica reale

L'efficienza idrica non può essere valutata unicamente in termini volumetrici. La disponibilità reale di risorsa idrica è, infatti, fortemente condizionata da una serie di limiti fisici (accessibilità, stagionalità, stress climatico) e qualitativi (contaminanti chimici, carichi organici, agenti patogeni) che ne determinano l'idoneità agli usi agricoli, industriali e civili (Jones et al., 2024; Biswas et al., 2025).

LIMITI FISICI ALLA CAPTAZIONE E AL PRELIEVO

- ✦ **Accessibilità topografica:** Bacini idrici e falde sotterranee possono risultare inaccessibili a causa di barriere altimetriche (es. rilievi montuosi) o condizioni geologiche sfavorevoli che ostacolano le tecniche di captazione (Biswas et al., 2025).
- ✦ **Regime stagionale instabile:** In molti bacini idrografici, in particolare quelli mediterranei, la marcata variabilità intra-annuale delle precipitazioni rende il prelievo affidabile solo in periodi limitati dell'anno, aggravando il problema dell'intermittenza dei flussi utili (Jones et al., 2024).
- ✦ **Stress climatico:** Eventi climatici estremi, quali siccità persistenti e piogge torrenziali, alterano profondamente la ricarica naturale delle riserve idriche superficiali e sotterranee. Questo compromette seriamente le previsioni di disponibilità futura (Biswas et al., 2025; Zhang et al., 2022).

LIMITI QUALITATIVI ALLA FRUIBILITÀ

L'acqua, anche quando disponibile in abbondanza, può risultare inadatta a molti usi a causa del superamento delle **soglie normative critiche** stabilite da regolamentazioni internazionali (WHO, 2020; Reg. UE 741/2020).

La tabella 5 riassume i principali parametri limitanti dell'acqua.

Tabella 5 Limiti fruibilità dell'acqua. Fonte: WHO (2020), ISO 16075, Reg. UE 741/2020, D.Lgs. 152/06.

Parametro	Limite critico tipico (UE/OMS)	Impatto sul riuso
Salinità (EC)	1.5–3.0 mS/cm	Fitotossicità, danni ai sistemi di irrigazione
Nitrati	50 mg/L	Rischio sanitario, eutrofizzazione
COD/BOD	125/25 mg/L	Incompatibilità con usi industriali
Patogeni (<i>E. coli</i>)	0 UFC/100 ml (uso potabile)	Riuso urbano diretto escluso
Metalli pesanti (es. Pb)	<0.01 mg/L	Bioaccumulo nella catena alimentare

La qualità dell'acqua condiziona l'efficienza reale della risorsa più della quantità teorica disponibile. Le strategie di riutilizzo devono pertanto basarsi su un'analisi congiunta dei flussi idrici e della loro composizione qualitativa (Jones et al., 2024). Ad esempio:

- ♣ Le acque reflue urbane possono essere impiegate per l'irrigazione solo se rispettano limiti microbiologici stringenti (es. <1000 CFU/L per *E. coli*; Reg. UE 741/2020).
- ♣ Le acque di falda costiere possono subire salinizzazione a causa dell'intrusione marina, rendendole inadatte all'irrigazione agricola (Jones et al., 2024; Zhang et al., 2022).

Diversi contesti territoriali evidenziano in modo emblematico le criticità legate alla gestione delle risorse idriche e al riuso.

In India, l'area metropolitana di Delhi rappresenta un caso di inefficienza nella depurazione delle acque reflue: solo il 15% dei reflui urbani viene sottoposto a trattamento adeguato, mentre la maggior parte presenta elevati livelli di contaminazione da metalli pesanti e carichi organici, rendendo impraticabile qualsiasi forma di riutilizzo sicuro (Giacomini et al, 2024).

Nel delta del Mekong, l'acuirsi della salinizzazione delle falde e dei suoli – dovuta a fattori concomitanti quali l'innalzamento del livello del mare, la subsidenza antropica e il sovrasfruttamento degli acquiferi – ha trasformato l'area in un hotspot idrico a scala regionale. Secondo Lindner e Stamm (2025), tali pressioni hanno compromesso gravemente la sicurezza idrica locale. Leijnse et al. (2024) stimano che circa il 36% della superficie del delta presenti condizioni di degrado idrico tali da configurare una forte vulnerabilità, con impatti significativi sui comparti agricolo e periurbano.

Anche in contesti europei ad apparente disponibilità idrica, come la regione Emilia-Romagna in Italia, si riscontrano limitazioni rilevanti. In particolare, la qualità delle acque superficiali destinate al riuso in ambito irriguo risulta compromessa dalla presenza diffusa di nitrati e fitofarmaci, con effetti restrittivi sull'impiego delle risorse idriche non convenzionali nei distretti agricoli (ISPRA, 2023).

CASO STUDIO – INDIA: SOSTENIBILITÀ VS. EFFICIENZA APPARENTE

Un'efficienza apparente nell'uso irriguo può mascherare criticità strutturali se non si considerano i limiti fisici del sistema idrico, in particolare la sostenibilità delle falde.

Un caso emblematico di disequilibrio strutturale tra efficienza e limiti fisici è illustrato nello studio di Rajput et al. (2024), dove è stato dimostrato come l'eccessivo prelievo di acque sotterranee per la coltivazione del riso stia causando un deficit annuale del 10–15 % nei distretti di Kaithal e Karnal.

L'approccio basato su Water Accounting+ ha consentito di quantificare il divario tra prelievo, ricarica naturale e necessità irrigue, evidenziando come alcune pratiche agricole non siano compatibili con la rigenerazione della risorsa. Il modello suggerisce che ritardare il trapianto del riso di 15–20 giorni potrebbe ridurre significativamente l'*overdraft*, allineando la domanda alla finestra monsonica.

Tali risultati sottolineano l'importanza di integrare gli indicatori di efficienza con bilanci idrici a scala di bacino e scenari idro-climatici reali, per evitare politiche "efficienti ma insostenibili".

3.2 STRUMENTI DI MONITORAGGIO E REPORTING PER LA GESTIONE INDUSTRIALE

Il monitoraggio e il *reporting* dei consumi idrici sono strumenti essenziali per valutare l'efficienza delle operazioni industriali, supportare decisioni basate su dati concreti e garantire la conformità normativa e ambientale. Tuttavia, un monitoraggio efficace non può limitarsi agli aspetti quantitativi; diventa sempre più cruciale includere anche i parametri di qualità dell'acqua. Studi recenti dimostrano che l'inquinamento da sali, composti organici e patogeni compromette gravemente la disponibilità effettiva della risorsa per usi industriali e civili. Secondo Jones, Bierkens e van Vliet (2024), il 55% della popolazione mondiale è già esposta a condizioni di *clean water scarcity* per almeno un mese all'anno, una percentuale destinata ad aumentare fino al 66% entro il 2100. Ciò evidenzia come la qualità delle acque superficiali condizioni direttamente la capacità dei sistemi idrici di soddisfare la domanda, anche in presenza di volumi idrici teoricamente adeguati. L'integrazione di parametri qualitativi nei sistemi di monitoraggio è quindi imprescindibile per garantire una gestione realmente sostenibile e resiliente della risorsa idrica.

SISTEMI DI MONITORAGGIO IN TEMPO REALE

Le tecnologie digitali stanno rivoluzionando il monitoraggio dei flussi idrici all'interno degli impianti industriali. I principali strumenti includono:

- ❖ **Sensori IoT (Internet of Things):** per la misurazione continua di portate, pressioni, perdite e parametri di qualità dell'acqua.
- ❖ **Smart metering:** per un monitoraggio puntuale dei consumi per singola linea produttiva.
- ❖ **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition):** per la gestione centralizzata e automatizzata degli impianti, consentendo il controllo remoto e l'ottimizzazione dei processi.
- ❖ **Piattaforme cloud-based:** per l'analisi predittiva dei dati e il *benchmarking* delle performance tra diversi siti produttivi.

L'integrazione di questi strumenti consente la costruzione di modelli di consumo idrico normalizzati (es. m³/unità di prodotto), che sono essenziali per identificare le inefficienze, intervenire tempestivamente e ottimizzare l'uso delle risorse, passando da una gestione reattiva a una proattiva.

Approfondimenti nel capitolo 4.

INDICATORI CHIAVE DI PERFORMANCE (KPI) IDRICI

L'adozione di KPI consente alle aziende di misurare le performance idriche in modo comparabile e standardizzato. Tra i principali:

- ♣ **Water Intensity** (m³/unità di prodotto);
- ♣ **Recirculation Rate** (percentuale di acqua riciclata rispetto al consumo totale);
- ♣ **Discharge Quality Index** (conformità agli standard ambientali);
- ♣ **Capacità di riuso interno** (% di acque trattate riutilizzate nel processo).

Questi indicatori sono integrati nei sistemi di gestione ambientale (es. ISO 14001) e nelle rendicontazioni ESG.

REPORTING VOLONTARIO E FRAMEWORK INTERNAZIONALI

Molte aziende rendicontano il proprio impatto idrico all'interno di framework riconosciuti a livello globale.

Tra i principali troviamo:

- ♣ **CDP Water Security**
 - Il *Carbon Disclosure Project* invita le aziende a comunicare rischi e strategie idriche. Il questionario "Water" consente una valutazione dettagliata della governance, delle metriche e della resilienza (CDP, 2023).
- ♣ **GRI 303: Water and Effluents (2018)**
 - Il *Global Reporting Initiative* (GRI) richiede il dettaglio su prelievi, scarichi, impatti e strategie per migliorare la gestione idrica nei report di sostenibilità.
- ♣ **ISO 14046 – Water Footprint**
 - Fornisce linee guida per la quantificazione dell'impronta idrica di processi, prodotti e organizzazioni, considerando anche gli impatti ambientali associati.
- ♣ **AWS Standard (Alliance for Water Stewardship)**
 - Standard multi-stakeholder che guida le imprese in una gestione responsabile dell'acqua a scala di bacino, valorizzando il coinvolgimento degli stakeholder.

INTEGRAZIONE NEI PROCESSI DECISIONALI

Gli strumenti di monitoraggio e *reporting* sono più efficaci quando vengono integrati nei sistemi di gestione operativa, finanziaria e ambientale di un'organizzazione. Le aziende all'avanguardia utilizzano dashboard interattive che offrono una visione in tempo reale delle *performance* idriche, collegano le metriche sull'acqua alla *performance* economica complessiva e stabiliscono obiettivi di riduzione specifici e misurabili.

Un esempio chiave di questa integrazione è l'uso crescente dell'Intelligenza Artificiale (AI) per l'ottimizzazione predittiva, specialmente in settori ad alta intensità idrica come il *food & beverage*.

Aziende come Coca-Cola HBC, ad esempio, impiegano sensori IoT e sistemi SCADA per monitorare i consumi idrici in tempo reale. Algoritmi di AI analizzano questi dati per identificare

anomalie, prevedere la domanda idrica e ottimizzare l'uso dell'acqua (ad esempio, per raffreddamento o pulizia). Questo non solo si traduce in una riduzione del consumo effettivo e dei costi operativi, ma contribuisce anche a migliorare il margine di profitto. I dati aggregati, inclusi gli impatti finanziari, vengono presentati nelle dashboard direzionali per guidare la definizione di nuovi *target* e decisioni strategiche.

Benchmarking Geospaziale e Dashboard Direzionali

L'introduzione di benchmark dinamici basati su dati geospaziali e dashboard intelligenti per la gestione industriale consente un controllo continuo dei parametri critici. Queste soluzioni combinano analisi geospaziale e sistemi di business intelligence in grado di integrare dati ambientali, operativi e gestionali in tempo reale. L'uso di dashboard geo-riferite consente una visualizzazione interattiva delle performance idriche su scala urbana, industriale o territoriale, supportando confronti dinamici tra territori, impianti e periodi temporali.

Secondo Dasallas et al. (2024), il framework di KPI sviluppato in contesti urbani europei consente una valutazione comparativa tra città e distretti idrici, orientando le decisioni verso pratiche intelligenti e resilienti

3.3 VALUTAZIONI INTEGRATE: CONTABILITÀ IDRICA, ANALISI COSTI-BENEFICI E SDG 6.4

Oltre all'uso di indicatori tecnici per valutare l'efficienza idrica, è necessario adottare approcci integrati che includano dimensioni ambientale, economica e sociale. Strumenti come la contabilità idrica, l'analisi costi-benefici e l'allineamento agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG), in particolare il *target* 6.4, rappresentano asset fondamentali per guidare decisioni strategiche, promuovere investimenti sostenibili e monitorare i progressi.

Oltre a questi strumenti, è crescente l'interesse per l'applicazione di metriche multidimensionali alla valutazione della sostenibilità di sistemi decentralizzati e integrati per il trattamento e riuso delle acque reflue. Tali metriche includono indicatori di efficienza idrica, qualità dell'effluente trattato, resilienza climatica (es. capacità di risposta a eventi estremi) e livello di integrazione normativa e istituzionale. un approccio basato su questi parametri consente una valutazione più completa dell'adeguatezza tecnica e ambientale degli interventi, facilitando il confronto tra soluzioni, la trasparenza nelle decisioni e la loro allineabilità ai principi dell'economia circolare.

CONTABILITÀ IDRICA (WATER ACCOUNTING)

La contabilità idrica è uno strumento analitico che consente di tracciare in modo sistematico i flussi di acqua in entrata, uscita, uso, riciclo e perdite all'interno di un sistema fisico o economico (UNESCO, 2020). Viene utilizzata per:

- ♣ Quantificare la disponibilità, la domanda e gli usi effettivi dell'acqua.
- ♣ Identificare inefficienze e sprechi all'interno dei sistemi idrici.
- ♣ Supportare l'elaborazione di politiche di allocazione e tariffazione più efficaci.

Esistono due approcci principali:

- ♣ **Contabilità idrica fisica:** Misura i volumi reali di acqua prelevata, usata, restituita o persa (in m³).
- ♣ **Contabilità idrica economica:** Valuta il valore economico dei diversi usi dell'acqua e delle risorse disponibili, seguendo metodologie simili alla contabilità ambientale SEEA-Water (*System of Environmental-Economic Accounting for Water*).

L'uso combinato di entrambi gli approcci è raccomandato per integrare i piani di gestione idrica con obiettivi di sostenibilità ed efficienza a tutto tondo.

Un'evoluzione recente e promettente nell'ambito della contabilità idrica è rappresentata dall'integrazione di indicatori ispirati ai principi dell'economia circolare:

- ♣ **Water Circular Economy Index (WCEI):** misurare il grado di circolarità dell'acqua utilizzata in un sistema territoriale o produttivo, integrando indicatori di prelievo, riuso, perdite, reintegrazione ambientale e autosufficienza idrica (Pot, 2023)
- ♣ **Net Water Value (NwV):** valuta il valore economico netto generato da ogni metro cubo d'acqua prelevato, tenendo conto dei benefici diretti e indiretti ma anche dei costi ambientali, sociali e regolatori associati all'uso della risorsa (Vardon et al, 2025).

ANALISI COSTI-BENEFICI (ACB) APPLICATA ALL'EFFICIENZA IDRICA

L'**analisi costi-benefici (ACB)** rappresenta una metodologia consolidata per valutare la redditività economica e l'impatto sociale e ambientale di interventi volti all'efficientamento idrico. I principali elementi analizzati includono:

- ♣ **Costi:** Di investimento, esercizio e manutenzione degli interventi.
- ♣ **Benefici diretti:** Risparmio idrico ed energetico, minori emissioni, riduzione delle tariffe.
- ♣ **Benefici indiretti:** Miglioramento della reputazione aziendale, riduzione del rischio normativo, valorizzazione di sottoprodotti.

Secondo l'ISPRA (2022), in molti contesti industriali e agricoli, l'ACB mostra un rapporto beneficio/costo superiore a 2, specialmente in presenza di supporti finanziari pubblici e di un valore dell'acqua superiore a 0,5 €/m³. L'analisi viene spesso integrata con metodi multicriterio (MCA) per includere aspetti qualitativi (come equità, accettabilità sociale, impatti sul territorio) e per supportare decisioni in condizioni di incertezza idrologica e climatica (La Rosa, 2019).

KPI E NATURE-BASED SOLUTIONS: VERSO UNA VALUTAZIONE INTEGRATA DELL'EFFICIENZA E DELLA RESILIENZA

In un contesto di crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale, i Key Performance Indicator (KPI) idrici rappresentano uno strumento essenziale per valutare in modo trasparente e comparabile la performance di enti e imprese. Tuttavia, l'utilizzo eccessivo o non selettivo di questi indicatori può generare ridondanze e distorsioni nella rendicontazione ESG. Come dimostrato da Benuzzi, Şahin e Paterlini (2025), solo una quota compresa tra il 20% e il 25% dei KPI normalmente impiegati spiega realmente la varianza nei punteggi ESG, suggerendo l'urgenza di una razionalizzazione delle metriche e di un maggiore focus sulla qualità informativa.

Le valutazioni di efficienza idrica risultano limitate se non considerano anche i co-benefici ecosistemici e gli impatti indiretti delle soluzioni adottate. In questo senso, le Nature-Based Solutions (NbS) – come fasce tampone vegetate, aree umide artificiali, ricarica controllata delle falde (MAR) – possono offrire risultati comparabili o superiori alle tecnologie convenzionali, con vantaggi in termini di biodiversità, sequestro di carbonio e mitigazione del rischio idrogeologico. Marijuan et al. (2024) propongono una matrice di Key Performance Indicators (KPI) multidimensionali per valutare l'efficienza delle NbS nel contesto della sicurezza idrica.

Il framework include:

- ♣ Volume di acqua trattata o risparmiata (m³/ha/anno);
- ♣ Riduzione del rischio da eventi estremi (flood/drought buffer);

- Incremento della resilienza del sistema socio-ecologico (indicatori qualitativi e quantitativi);
- Allineamento allo standard globale IUCN per NbS.

L'inclusione sistematica di tali KPI nelle valutazioni integrate permette un **salto di scala analitico**: dall'efficienza di processo all'efficacia sistemica. Si raccomanda quindi l'utilizzo di tali framework nei bilanci idrici e nelle valutazioni di sostenibilità aziendale e territoriale.

Qualità dei dati e rilevanza statistica degli indicatori idrici

La validità delle valutazioni di efficienza idrica dipende fortemente dalla qualità, completezza e affidabilità dei dati utilizzati.

Dataset incompleti, rumorosi o influenzati da errori sistematici possono compromettere la robustezza degli indicatori, portando a conclusioni fuorvianti.

Uddin et al. (2024) mostrano che l'applicazione di tecniche di data cleaning e outlier detection – come Isolation Forest (IF) e Kernel Density Estimation (KDE) – può migliorare significativamente l'affidabilità degli indicatori compositi, come l'Integrated Environmental Water Quality Index (IEWQI), aumentando il coefficiente di determinazione da $R^2 = 0,92$ a $R^2 = 0,95$.

La tabella seguente riassume alcune tecniche chiave:

Metodo	Applicazione idrica	Vantaggi principali
Isolation Forest	Rilevamento outlier fisico-chimici (pH, TDS)	Non supervisionato, robusto al rumore
KDE	Pattern anomali stagionali	Interpolazione flessibile, adattiva
IQR / Z-score	Pulizia preliminare dati	Implementazione semplice

L'integrazione di questi metodi nei sistemi di monitoraggio consente una gestione più consapevole degli errori di misura, supportando indicatori più affidabili e confrontabili su scala intersettoriale o temporale.

INDICATORI DI CIRCOLARITÀ DEI PROCESSI IDRICI

Per valutare in modo più accurato il grado di circolarità idrica nei processi industriali, è utile adottare strumenti analitici quali il Process Circularity Index (ProCI), recentemente proposto da Pilipenets et al. (2025). Questo framework considera flussi di materiali, energia, acqua e emissioni in modo integrato, permettendo una valutazione più granulare e comparabile della circolarità per settore. Nella componente idrica, il ProCI valuta specificamente la quota di **acqua riutilizzata**, riciclata o recuperata rispetto al totale consumato, includendo indicatori relativi al tipo di trattamento (es. MBR, RO), al livello qualitativo (fit-for-purpose), e alla presenza di flussi persi o evaporati. In aggiunta, considera **l'energia necessaria per ogni m³ trattato** e **le emissioni associate**, offrendo così una misura di efficienza integrata che combina sostenibilità ambientale, efficienza operativa e riduzione dell'impronta ecologica.

L'adozione di indici come ProCI può rafforzare le metriche ESG e facilitare il reporting conforme alla tassonomia europea.



OBIETTIVO DI SVILUPPO SOSTENIBILE 6.4: EFFICIENZA E DISPONIBILITÀ

Il Target SDG 6.4 dell'Agenda 2030 si propone di:

"Aumentare sostanzialmente l'efficienza nell'uso dell'acqua in tutti i settori e garantire prelievi e forniture sostenibili di acqua dolce per affrontare la scarsità d'acqua, riducendo il numero di persone che soffrono la scarsità d'acqua."

Due indicatori chiave sono associati a questo obiettivo:

- ♣ **6.4.1:** Misura il cambiamento nell'efficienza d'uso dell'acqua nel tempo (espressa in USD/m³).
- ♣ **6.4.2:** Valuta il livello di stress idrico per risorsa rinnovabile disponibile (espresso in %).

L'adozione di metodologie armonizzate per il calcolo e la rendicontazione di questi indicatori è fortemente incoraggiata sia da UNEP che da Eurostat, al fine di promuovere una *governance* multilivello, trasparente e coerente della risorsa idrica.

3.4 TABELLE E COMPARAZIONI

3.4.1 Tabella comparativa degli indicatori di efficienza idrica

Indicatore	Descrizione semplificata	Unità di misura	Collegamento SDG
Water Footprint (WF)	Quanta acqua totale viene usata, inclusa quella “nascosta” nella produzione	m ³ , m ³ /kg, m ³ /\$	SDG 6.4.1
Water Use Efficiency (WUE)	Quanto prodotto si ottiene per ogni m ³ d’acqua utilizzata	\$/m ³ , kg/m ³	SDG 6.4.1
Water Stress Index (WSI)	Quanto l’uso dell’acqua supera la disponibilità effettiva del territorio	%	SDG 6.4.2
Reuse Ratio	Percentuale di acqua trattata che viene riutilizzata anziché scaricata	%	SDG 6.3.1
Leakage Rate	Quanta acqua si perde nelle reti di distribuzione	%	SDG 6.4.1
Consumo idrico specifico	Volume d’acqua usato per unità prodotta (es. per ogni kg, litro, tonnellata)	m ³ /unità	SDG 6.4.1

- SDG 6.3.1 – Migliorare la qualità dell’acqua e ridurre gli scarichi non trattati
- SDG 6.4.1 – Aumentare l’efficienza idrica in tutti i settori
- SDG 6.4.2 – Ridurre il livello di stress idrico

3.4.2 Tabella standard e monitoraggio

Strumento/Standard	Finalità	Ambito di applicazione
CDP Water Security	Rendicontazione volontaria per investitori e stakeholder	Corporate, multisettoriale
GRI 303: Water and Effluents	Reporting completo su prelievi, scarichi e strategie idriche	Corporate e industriale
ISO 14046: Water Footprint	Valutazione dell'impronta idrica di prodotti/processi	Prodotti, processi, organizzazioni
AWS Standard	Gestione sostenibile delle risorse a scala di bacino	Siti produttivi, distretti idrici
Smart Metering / IoT	Monitoraggio in tempo reale dei consumi e delle perdite	Impianti industriali e reti urbane
SCADA + Piattaforme Cloud	Controllo centralizzato e analisi predittiva dei dati idrici	Industria, utility, agricoltura

3.4.3 Confronto tra Indicatori Tradizionali ed Indicatori Sistemici per la Valutazione dell'Efficienza Idrica nei Processi Industriali

Dimensione	Indicatori tradizionali	Indicatori sistemici
Volume risparmiato	m ³ /anno di acqua risparmiata rispetto allo scenario di riferimento	% di acqua riutilizzata sul totale trattato (reuse rate), bilanciata da metriche di qualità e uso finale
Efficienza operativa	m ³ di acqua consumata per unità di output (es. €/m ³ o kg prodotto/m ³)	Relazione integrata tra input idrici, recupero e output utile considerando anche perdite, evaporazione e scarti
Energia associata	Generalmente assente o marginale	kWh/m ³ trattato o % energia rinnovabile sul fabbisogno del trattamento idrico
Emissioni di processo	Non considerata	kg CO ₂ eq/m ³ di acqua trattata o recuperata, incluso il contributo di tecnologie di riuso avanzato
Qualità dell'acqua trattata	Conforme o non conforme a standard normativi	Qualità "fit-for-purpose" basata sull'adattamento al bisogno finale (es. cooling tower vs. riuso agricolo)
Riuso e riciclo	% di riuso su scala impianto (qualitativo o dichiarativo)	Indici quantitativi e pesati del ciclo idrico chiuso: reuse, recycle, recovery (acqua + nutrienti)
Approccio Life Cycle	Mancante o limitato a parametri ambientali	LCA idrico integrato: include energia, materiali, impatti ambientali, costi e benefici economici a lungo termine
Interoperabilità ESG	Non allineato ai criteri ESG o tassonomia verde UE	Metrica compatibile con reporting ESG, SSEEA-Water, SDG 6.4 e criteri di bancabilità per finanza sostenibile

- *Indicatori tradizionali*: metodi convenzionali, spesso focalizzati solo sul risparmio idrico volumetrico.
- *Indicatori sistemici*: metodi avanzati che integrano più dimensioni ambientali ed economiche.

3.5 PUNTI PRINCIPALI

Misurare è governare: gli indicatori sono fondamentali.

Per poter migliorare e comunicare efficacemente le *performance* idriche, è essenziale disporre di indicatori chiari, comparabili e allineati agli obiettivi internazionali. Senza una misurazione accurata, è impossibile attuare un processo di miglioramento continuo.

Esistono diversi tipi di indicatori, con finalità complementari:

- ◆ **Quantitativi**, come il *Water Footprint* (Impronta Idrica), lo *Stress Idrico* o il *Water Use Efficiency*, tutti collegati al **SDG 6.4** (Obiettivo di Sviluppo Sostenibile 6.4).
- ◆ **Operativi**, ad esempio il *leakage rate* (tasso di perdite di rete) o il *reuse ratio* (tasso di riuso delle acque reflue).
- ◆ **Specifici di processo**, come il consumo idrico per unità di prodotto (es. m³/tonnellata di prodotto, m³/dollaro di valore prodotto).

Gli SDG 6.3 e 6.4 forniscono un quadro di riferimento normativo e strategico.

Questi obiettivi dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite guidano l'azione per la gestione sostenibile dell'acqua:

- ◆ **SDG 6.4.1** mira ad aumentare l'efficienza d'uso dell'acqua in tutti i settori.
- ◆ **SDG 6.4.2** punta a ridurre lo stress idrico nei territori.
- ◆ **SDG 6.3.1** si concentra sull'aumento del trattamento e del riuso sicuro delle acque reflue.

Gli strumenti di monitoraggio e *reporting* sono in espansione.

Standard riconosciuti a livello internazionale come GRI 303, ISO 14046, CDP Water e AWS (Alliance for Water Stewardship), insieme a tecnologie avanzate come SCADA e IoT, consentono di raccogliere dati affidabili e confrontabili. Questi dati sono cruciali per la rendicontazione ESG (*Environmental, Social, and Governance*).

La contabilità idrica integrata è un approccio avanzato.

Questo metodo combina misurazioni fisiche (volumi) ed economiche (costi/benefici) dell'acqua. Si rivela utile per valutare i *trade-off* tra diversi settori, bacini idrografici o tecnologie, favorendo decisioni più trasparenti e sostenibili.

La trasparenza dei dati rafforza la *governance*.

Indicatori condivisi e accessibili migliorano il coinvolgimento degli *stakeholder*, facilitano il *benchmarking* tra imprese o territori e abilitano meccanismi di incentivo basati sulla *performance*.

4 TECNOLOGIE E INNOVAZIONE

4.1 TECNOLOGIE PER LA CHIUSURA DEL CICLO IDRICO

4.1.1 Sistemi di monitoraggio e digitalizzazione delle reti

La chiusura del ciclo idrico – che implica la minimizzazione dei prelievi e la massimizzazione del riuso – richiede un controllo preciso e in tempo reale dei flussi idrici lungo l'intero sistema. La digitalizzazione delle reti e l'implementazione di sistemi di monitoraggio avanzati sono cruciali per garantire efficienza, tempestività operativa e sostenibilità delle infrastrutture idriche. Moretti et al., 2024 evidenzia l'avanzamento delle tecnologie di monitoraggio in tempo reale nei depuratori, con particolare attenzione a sensori on-line, in-line e soft-sensing basati su intelligenza artificiale. Queste soluzioni, abbinate a IoT e modelli predittivi, consentono non solo di anticipare derive qualitative nei reflui, ma anche di ottimizzare i consumi energetici e l'uso di reagenti. L'adozione estesa di questi strumenti sta riducendo significativamente i tempi di risposta operativa nei principali impianti europei.

INFRASTRUTTURE INTELLIGENTI PER UNA GESTIONE REATTIVA

La digitalizzazione delle reti idriche consente il passaggio da un approccio reattivo a uno più predittivo e adattivo nella gestione dei sistemi. I componenti principali di queste infrastrutture intelligenti includono:

- ✦ **Sensori IoT (Internet of Things):** Dispositivi a basso consumo energetico che misurano continuamente parametri come portata, pressione, qualità dell'acqua (pH, conducibilità, torbidità) e sono in grado di rilevare perdite o anomalie in tempo reale (Zulkifli et al., 2022).
- ✦ **Smart meters (contatori intelligenti):** Strumenti che permettono la rilevazione automatica e dettagliata dei consumi idrici a livello di impianto, reparto o singola utenza (Gupta et al., 2020).
- ✦ **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition):** Sistemi di supervisione e controllo che offrono una gestione in tempo reale, con *dashboard* interattive e sistemi di allerta automatica per anomalie (Ortiz et al., 2024).
- ✦ **Cloud computing e piattaforme *digital twin*:** Ambienti virtuali che replicano in tempo reale lo stato del sistema fisico. Questo consente simulazioni accurate, previsioni sul comportamento della rete e interventi mirati e tempestivi (Wang et al., 2024).

In ambito urbano e agricolo, questi sistemi raggiungono un'accuratezza $\geq 95\%$ rispetto ai metodi tradizionali di laboratorio, con un sensibile abbattimento dei costi di campionamento (fino a -60%) e un miglioramento nel tempo di reazione decisionale (da settimane a poche ore) (Jayaraman et al., 2024).

BENEFICI OPERATIVI E AMBIENTALI

L'integrazione di queste tecnologie digitali nella gestione del ciclo idrico porta a vantaggi misurabili:

- ✦ **Riduzione delle perdite idriche** fino al 30-50% grazie al rilevamento precoce di rotture o malfunzionamenti.
- ✦ **Ottimizzazione dei consumi energetici** negli impianti di sollevamento e trattamento, con conseguente diminuzione dei costi operativi e dell'impronta di carbonio.

- ♣ **Miglioramento continuo della qualità dell'acqua** distribuita, grazie al monitoraggio costante dei parametri critici.
- ♣ **Maggiore trasparenza e *accountability*** nei confronti di utenti, autorità regolatorie e *stakeholder* ESG.

Secondo l'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), l'efficienza operativa dei sistemi idrici può migliorare del 20-40% tramite automazione e sensoristica avanzata (IEA, 2022).

OSTACOLI E SFIDE APERTE

Nonostante il loro enorme potenziale, l'adozione delle tecnologie digitali nel settore idrico è ancora eterogenea. Le principali criticità includono:

- ♣ **Costi iniziali elevati**, che possono rappresentare una barriera significativa, soprattutto per i piccoli gestori.
- ♣ **Mancanza di interoperabilità** tra i sistemi esistenti, che rende complessa l'integrazione di nuove tecnologie.
- ♣ **Resistenza organizzativa e carenza di competenze digitali** tra il personale.
- ♣ **Rischi informatici (cybersecurity)** legati alla gestione di dati sensibili e alla vulnerabilità delle infrastrutture connesse.

Per superare queste barriere, sono cruciali:

- ♣ Programmi di **capacity building** tecnico-amministrativo per sviluppare le competenze necessarie.
- ♣ **Incentivi fiscali o regolatori** (es. tariffe premio) per stimolare gli investimenti.
- ♣ **Standard tecnici condivisi** (es. ISO/IEC 30141 per le architetture IoT) per garantire la compatibilità e l'interoperabilità dei sistemi.

ESEMPI APPLICATIVI E PROSPETTIVE FUTURE

Singapore PUB ha implementato una vasta rete di sensori in tempo reale e modelli predittivi per ottimizzare il trattamento e la distribuzione idrica, ponendosi come un modello a livello globale (Peydayesh & Mezzenga, 2024).

In Italia, il progetto WATER4.0 promuove l'integrazione di *smart metering* e manutenzione predittiva per una gestione più efficiente delle reti idriche urbane e industriali (Cavalieri & Gambadoro, 2024).

L'adozione dei digital twin in ambito idrico è in forte crescita, con applicazioni che spaziano dalla progettazione alla simulazione e alla gestione integrata di cicli idrici complessi (Boogaard et al., 2024).

Anche nell'irrigazione, casi studio dimostrano che l'adozione di tecnologie IoT, sia a basso costo che ad alta intensità digitale, può garantire un'elevata efficienza idrica in contesti molto diversi. In Africa subsahariana, sistemi basati su sensori economici, microcontrollori e reti GSM hanno portato a risparmi idrici del 35%, migliorando la sicurezza alimentare. In parallelo, in California e Israele, l'integrazione di immagini satellitari, modelli predittivi AI e bilanci idrici automatizzati ha permesso una riduzione dei consumi irrigui fino al 50%, con un significativo incremento dell'efficienza produttiva (Udo et al., 2024). Tali esperienze evidenziano l'importanza di un approccio scalabile e contestuale all'adozione tecnologica.

4.1.2 Riuso *fit-for-purpose*: adattare il trattamento all'uso finale

Il paradigma *fit-for-purpose* (FFP) si basa sull'adattamento del trattamento delle acque reflue al livello qualitativo effettivamente necessario per lo specifico uso finale, evitando sovra-trattamenti energivori e promuovendo un impiego efficiente delle risorse (Capodaglio et al., 2023).

In questo approccio, le acque reflue sono trattate in base alla loro origine e destinazione:

- ♣ Le acque grigie (es. da docce, lavabi) possono essere riutilizzate con trattamenti leggeri per usi civili secondari (es. sciacquone del WC, irrigazione giardini).
- ♣ Le acque nere necessitano di processi biologici avanzati per l'impiego agricolo o industriale, dato il loro maggiore carico inquinante.
- ♣ I reflui industriali richiedono trattamenti su misura, spesso finalizzati a usi specifici come lavaggi, raffreddamento o ricircolo tecnico all'interno del processo produttivo (Zhang et al., 2022).

Tra i principali vantaggi del FFP vi sono: la riduzione dell'impronta idrica nei settori ad alta intensità, una maggiore flessibilità normativa (che si adatta alle esigenze specifiche) e lo sviluppo di economie circolari locali. In Israele, oltre il 90% delle acque reflue urbane è reimmesso in agricoltura sotto un costante controllo microbiologico (Capodaglio et al., 2023). Anche in Italia, in distretti industriali e aree agricole, il riuso mirato, se supportato da una governance efficace e infrastrutture adeguate, sta dimostrando di poter migliorare la resilienza climatica e la competitività (Kahn et al., 2025).

Una metodologia innovativa per identificare gli impianti di trattamento più adatti al riuso agricolo in logica *fit-for-purpose* è stata recentemente proposta da Penserini et al. (2024). Essa integra parametri come la qualità dell'effluente, le caratteristiche colturali, il contenuto di nutrienti e la salinità, all'interno di un framework decisionale tecnico-economico che consente di massimizzare i benefici climatici, idrici ed economici in contesti ad alta vulnerabilità.

La diffusione del riuso FFP è, tuttavia, ancora ostacolata da barriere normative, tecniche e culturali. Per superarle, sono necessari quadri regolatori flessibili ma basati su evidenze (es. Reg. (UE) 2020/741), sistemi di monitoraggio digitale affidabili e una maggiore accettazione pubblica, promossa tramite formazione e trasparenza.

4.1.3 Trattamenti avanzati: membrane, processi ossidativi, separazione selettiva

La chiusura del ciclo idrico nelle industrie e nei sistemi urbani richiede l'impiego di tecnologie di trattamento avanzate capaci di rigenerare l'acqua e di recuperare componenti utili, anche in presenza di elevate concentrazioni di contaminanti o condizioni operative critiche.

I trattamenti avanzati rappresentano il cuore tecnologico di questa transizione e comprendono principalmente:

- ♣ **Sistemi a membrana** per la filtrazione spinta.
- ♣ **Processi ossidativi avanzati (AOP)** per la rimozione di microinquinanti.
- ♣ **Tecniche di separazione selettiva** per il recupero mirato di nutrienti e metalli.

SISTEMI A MEMBRANA

I processi a membrana consentono la rimozione di particelle, sostanze organiche, sali e microrganismi con elevata efficienza. Sono impiegati in applicazioni sia industriali che municipali, in particolare per il riuso interno e la produzione di acqua di qualità elevata (Kim et al., 2022).

Le principali tecnologie includono:

- ✦ **Ultrafiltrazione (UF) e nanofiltrazione (NF):** Utilizzate per la rimozione di colloidali, virus, batteri e sali bivalenti, permettendo di ottenere un'acqua di qualità superiore rispetto ai trattamenti convenzionali (Kamal et al., 2024).
- ✦ **Osmosi inversa (RO):** È la tecnologia più avanzata per la dissalazione, la demineralizzazione e la produzione di acqua ultra-pura, efficace nella rimozione di quasi tutti i contaminanti disciolti (Zubair et al., 2023).
- ✦ **MBR (Membrane Bioreactor):** Questa tecnologia innovativa combina la depurazione biologica con la filtrazione a membrana in un unico stadio. I MBR riducono significativamente gli ingombri degli impianti e migliorano drasticamente la qualità dell'effluente, rendendolo spesso idoneo al riuso diretto (Al-Asheh et al., 2021).

I sistemi a membrana offrono numerosi vantaggi. Tra i principali, va sottolineata l'elevata qualità dell'effluente trattato, che in molti casi può raggiungere livelli tali da renderlo idoneo anche per usi potabili. Inoltre, queste tecnologie si caratterizzano per una forte modularità e compattezza, che ne facilita l'integrazione in spazi limitati e in contesti decentralizzati. Nei sistemi multistadio più avanzati, è possibile recuperare oltre il 95% dell'acqua trattata, contribuendo in modo significativo alla riduzione dei prelievi da fonti naturali.

Tuttavia, non mancano alcune criticità. L'osmosi inversa (RO), ad esempio, comporta un consumo energetico elevato, che incide sui costi operativi. Le membrane possono andare incontro a fenomeni di incrostazione e *fouling*, richiedendo interventi regolari di pulizia e manutenzione. A ciò si aggiunge la necessità di sostituzioni periodiche, con costi che possono risultare onerosi, soprattutto in impianti di grande scala o in contesti con scarse capacità gestionali.

PROCESSI OSSIDATIVI AVANZATI (AOP)

I processi ossidativi avanzati (AOP) costituiscono un insieme di tecnologie altamente efficaci per la degradazione di contaminanti organici persistenti, microinquinanti emergenti (come PFAS, pesticidi, residui farmaceutici) e patogeni. Questi sistemi si basano sulla generazione in situ di specie reattive dell'ossigeno (ROS), in particolare radicali ossidrilici ($\bullet\text{OH}$), che possiedono un potere ossidante estremamente elevato (Dong et al., 2022; Kokkinos, Venieri, & Mantzavinos, 2021).

Le tecnologie AOP più diffuse includono:

- ✦ **Ozonizzazione (O_3),** anche in combinazione con perossido di idrogeno ($\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$), efficace nella rimozione di numerosi contaminanti organici e microbiologici (Li et al., 2023).
- ✦ **Fotocatalisi avanzata** (UV/TiO_2 , $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$), che sfrutta la luce ultravioletta per attivare reazioni ossidative (Iqbal et al., 2024). Efficace nella rimozione di microinquinanti organici, farmaci e composti aromatici clorurati, anche a basse concentrazioni.
- ✦ **Processi a base di perossido di idrogeno** in ambienti attivati, come nel trattamento dei fanghi attivi (Guan et al., 2018);
- ✦ **Elettro-ossidazione e sistemi Fenton**, particolarmente efficaci in presenza di carichi contaminanti elevati. Quando integrata con il processo Fenton, che utilizza ferro catalitico e H_2O_2 , l'efficacia nella degradazione di composti organici refrattari aumenta significativamente. Questa combinazione è adatta a reflui industriali complessi, con elevate concentrazioni di COD, metalli pesanti o coloranti sintetici (Nair, Soni, & Shah, 2023).

- ✦ **Plasma ossidativo**, l'utilizzo del plasma nei processi ossidativi avanzati si basa sulla generazione di specie reattive ad alta energia (radicali, elettroni, ioni) capaci di rompere legami molecolari complessi. Questa tecnica si distingue per la rapidità di reazione, l'elevata efficienza di rimozione anche in presenza di contaminanti recalcitranti e la possibilità di operare a temperatura ambiente (Peng et al., 2021).

Queste tecnologie sono impiegate in contesti municipali e industriali per il trattamento terziario delle acque reflue e il trattamento mirato di effluenti complessi, ad esempio nel settore chimico e farmaceutico, dove i contaminanti sono spesso refrattari ai trattamenti convenzionali. Un ulteriore ambito applicativo riguarda la disinfezione virale avanzata, dimostrata efficace anche contro virus resistenti nei sistemi di riuso (Kokkinos et al., 2021).

Numerosi studi sperimentali e di revisione hanno confermato la capacità degli AOP di abbattere completamente composti come il fenolo (Suzuki, Araki, & Yamamoto, 2015), migliorare l'efficacia dei trattamenti biologici convenzionali e facilitare la rimozione sinergica di microinquinanti in combinazione con disinfezione UV. Inoltre, l'assenza di produzione di fanghi secondari rappresenta un vantaggio operativo rilevante.

Tuttavia, la diffusione degli AOP su larga scala richiede un'attenta valutazione economica ed energetica. Alcuni processi, come l'ozonizzazione o la fotocatalisi UV intensiva, sono associati a consumi energetici elevati e alla necessità di reagenti chimici specializzati, con implicazioni in termini di sicurezza e sostenibilità gestionale. Per questo motivo, si raccomanda un'analisi tecnico-economica integrata basata su criteri multi-obiettivo (Saravanan et al., 2022; Pandis et al., 2022). Inoltre, la comprensione approfondita dei meccanismi di formazione, interazione e decadimento delle specie ROS è fondamentale per progettare sistemi selettivi, efficienti e adattabili alle diverse matrici idriche (Oturán & Aaron, 2014).

TECNICHE DI SEPARAZIONE SELETTIVA

Questi processi sono progettati per il recupero mirato di specifiche sostanze presenti nei reflui, come nutrienti (azoto N, fosforo P), metalli rari o contaminanti organici di valore (Chen et al., 2022).

Le tecnologie chiave includono:

- ✦ **Scambio ionico**: Utilizzato per il recupero di ammonio, nitrati e metalli. L'efficacia di questo processo dipende dalla progettazione delle resine o delle membrane, che possono essere ottimizzate per rispondere in modo selettivo e rigenerabile ai vari contaminanti. Recenti sviluppi hanno portato alla produzione di **membrane a scambio ionico intelligenti**, ottenute tramite elettrofilatura, che offrono sensibilità elevata e una capacità superiore di separazione anche in matrici complesse, potenziando l'efficienza di rimozione dei metalli e facilitando il loro recupero (Bandehali et al., 2024).
- ✦ **Precipitazione controllata**: Specificamente impiegata per il recupero del fosforo sotto forma di struvite ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), un fertilizzante ad alto valore aggiunto. Questa tecnica consente di trasformare i carichi fosforici presenti nei reflui in un prodotto commerciabile, contribuendo sia alla riduzione dell'eutrofizzazione sia alla chiusura del ciclo dei nutrienti (Cabo et al., 2025).
- ✦ **Assorbimento su materiali funzionalizzati**: tecnica avanzata che impiega polimeri modificati, nanomateriali o membrane funzionali per la cattura selettiva di inquinanti persistenti come PFAS, metalli pesanti e microinquinanti organici. I recenti sviluppi hanno portato alla creazione di membrane intelligenti e adsorbenti porosi capaci di trattenere selettivamente contaminanti target, e anche di integrarli in processi catalitici

per la loro degradazione o recupero (Makvandi et al., 2021; Georgouvelas et al., 2021; Song et al., 2022).

- ✦ **Elettrodialisi inversa (EDR) e pervaporizzazione:** Tecniche per la concentrazione e la separazione di sali, solventi e **composti volatili**. L'EDR, in particolare, si distingue per la sua capacità di rimuovere in modo mirato ioni specifici da flussi ad alta salinità, sfruttando il principio del campo elettrico alternato per migliorare la selettività e prevenire la polarizzazione di concentrazione (Kaniadakis, van Lier, & Spanjers, 2024). La **pervaporizzazione**, invece, utilizza membrane selettive e gradienti di pressione per separare componenti volatili, risultando particolarmente utile nel trattamento di solventi organici o nel dissalamento spinto.

Queste tecnologie sono alla base dei cosiddetti impianti di valorizzazione, dove il trattamento dei reflui non è più solo una depurazione, ma si trasforma in un processo produttivo per la generazione di risorse (Saleh, Mustaqeem, & Khaled, 2021).

I trattamenti avanzati consentono di superare i limiti dei processi convenzionali, permettendo la rigenerazione dell'acqua, l'abbattimento di inquinanti emergenti e il recupero di risorse. La loro integrazione in sistemi modulari, automatizzati e digitalizzati è essenziale per chiudere il ciclo idrico e rendere le infrastrutture idriche più circolari, resilienti ed efficienti (Metcalf & Eddy, Inc. McGraw-Hill Education 6th).

4.1.4 Approccio integrato

L'efficacia delle soluzioni tecnologiche aumenta esponenzialmente quando sono integrate in un sistema di gestione ciclico, composto da:

- ✦ **Rilevamento e monitoraggio continuo** connesso a dati in tempo reale.
- ✦ **Trattamento modulare e adattivo** in base alla qualità richiesta per lo specifico uso finale.
- ✦ **Valorizzazione delle risorse secondarie:** recupero di energia, nutrienti e acqua riutilizzabile.
- ✦ **Infrastrutture interconnesse e intelligenti** per operazioni predittive e resilienti.

L'adozione integrata di queste tecnologie consente di ottimizzare l'uso della risorsa idrica, chiudendo il bilancio interno e riducendo i prelievi da fonti naturali. Si ottengono al contempo minori impatti ambientali, grazie alla riduzione degli scarichi e delle emissioni climalteranti, e maggiori ritorni economici attraverso il recupero e la vendita di risorse (Narayanamoorthy et al., 2022). Inoltre, migliora significativamente la conformità agli standard ESG e agli obiettivi di sostenibilità globali come l'SDG 6.3 (trattamento e riuso delle acque reflue) e l'SDG 6.4 (efficienza nell'uso dell'acqua e riduzione dello stress idrico).

L'integrazione tra progettazione ingegneristica, simulazioni ambientali e sistemi di supporto decisionale è ormai centrale nei progetti idrici avanzati. Nwankwo et al. (2024) illustrano come le simulazioni ingegneristiche (CFD, GPS-X, Aspen Plus) stiano migliorando l'efficienza di trattamento e riuso, consentendo una gestione ottimizzata dell'intero ciclo idrico. L'approccio sistemico permette di ridurre consumi, valutare scenari e anticipare impatti climatici in contesti agricoli, industriali e urbani.

4.2 SOLUZIONI DECENTRALIZZATE E NATURE-BASED PER LA GESTIONE LOCALE

In un'ottica di maggiore resilienza e circolarità nella gestione idrica, le soluzioni decentralizzate e le Nature-Based Solutions (NBS) offrono approcci adattivi e innovativi. Queste soluzioni sono

ideali per la scala locale e possono essere efficacemente integrate sia nei tessuti urbani che rurali.

4.2.1 Soluzioni decentralizzate e MAD

Le soluzioni decentralizzate si basano sull'installazione di impianti per il trattamento, la raccolta o il riuso dell'acqua direttamente a scala di edificio, quartiere o distretto. Non dipendono da grandi reti centralizzate, ma operano in modo autonomo o in piccoli *cluster*, con gestione locale o comunitaria (Maniam et al., 2022). Le soluzioni MAD (Modulari, Adattive e Decentralizzate) rappresentano un'evoluzione di questo paradigma, promuovendo flessibilità, resilienza e partecipazione locale come elementi fondamentali per la sicurezza idrica nell'era del cambiamento climatico (Wutich et al., 2023).

Tra le tecnologie chiave si includono:

- ◆ **Mini-impianti containerizzati** per il trattamento delle acque grigie (es. docce, lavabi) e delle acque nere in contesti specifici come condomini, scuole, *resort*, cantieri o insediamenti temporanei. Questi sistemi sono progettati per essere rapidamente installati e facilmente trasportabili, e possono includere trattamenti biologici, fisico-chimici e sistemi di disinfezione finalizzati al riuso locale delle acque trattate per scopi irrigui o igienico-sanitari (Adeyinka et al., 2021).
- ◆ **Sistemi di fitodepurazione**, che sfruttano processi naturali mediati dalle piante per depurare l'acqua. Un approccio ecologico e sostenibile, con bassi costi operativi e capacità di integrazione paesaggistica, che trova ampio impiego in contesti rurali, periurbani o decentralizzati. Recenti studi ne confermano l'efficacia anche per la rimozione di metalli tossici da suolo e acqua, evidenziandone la multidisciplinarietà e il potenziale di adattamento a diversi ambienti (Bhat et al., 2022).
- ◆ **Moduli MBR (Membrane Bioreactor) compatti** con disinfezione UV, ideali per il riuso di acque non potabili. I MBR garantiscono un'effluente di qualità superiore, idoneo a molteplici applicazioni come l'irrigazione urbana, il raffreddamento industriale o il riutilizzo ambientale, anche in spazi limitati o in contesti decentralizzati (Huang, Jeffrey, & Pidou, 2024; Lehmann, 2024).
- ◆ **Raccolta e stoccaggio dell'acqua piovana** (*rainwater harvesting*) per usi irrigui o igienico-sanitari, particolarmente utile in contesti urbani densamente popolati o in aree soggette a stress idrico. I sistemi di captazione e accumulo permettono di ridurre la dipendenza da fonti idriche convenzionali, mitigare il deflusso urbano e migliorare la resilienza climatica degli insediamenti (Wartalska et al., 2024).

Le soluzioni decentralizzate offrono una notevole flessibilità, rendendole particolarmente adatte in contesti remoti o periurbani. Permettono di ridurre i costi di trasporto e pompaggio dell'acqua, garantendo al contempo continuità operativa anche in caso di guasti alle reti centrali. Inoltre, facilitano il riutilizzo locale di acqua e nutrienti, promuovendo la circolarità.

Tuttavia, la loro diffusione è ostacolata da una normativa spesso incompleta e dalla mancanza di standard chiari per il riuso. Queste tecnologie richiedono anche una manutenzione costante e lo sviluppo di competenze tecniche locali, presentando sfide in termini di controllo e certificazione in sistemi distribuiti.

Un esempio rappresentativo è quello della località rurale di Bojuritsa, in Bulgaria, dove un progetto di IWRM basato sul riuso combinato di acque grigie e piovane ha portato a una riduzione del consumo di acqua potabile fino al 60% e dei costi operativi del 58%. L'intervento ha incluso fitodepurazione, stoccaggio e disinfezione decentralizzata, con un tempo di ritorno medio

dell'investimento inferiore a 10 anni (Angelova et al., 2024). Questo dimostra la sostenibilità tecnica ed economica delle soluzioni decentralizzate, anche in aree a bassa densità abitativa.

Oltre agli impianti MBR containerizzati, un'opzione promettente per il contesto urbano è rappresentata dai sistemi di recupero delle acque grigie (GRS), che consentono risparmi fino al 43% del fabbisogno idrico domestico. Studi recenti dimostrano che in scenari residenziali europei questi sistemi offrono ritorni economici positivi ($NPV > 0$) con periodi di payback inferiori a 10 anni, soprattutto se supportati da tariffe incentivanti e detrazioni fiscali (Rajski et al., 2024).

4.2.2 Soluzioni basate sulla natura (Nature-Based Solutions - NBS)

Le Nature-Based Solutions (NBS) utilizzano processi ecologici e infrastrutture verdi per migliorare la gestione dell'acqua, ridurre l'inquinamento, aumentare la resilienza dei sistemi idrici e generare molteplici co-benefici ambientali e sociali.

Esempi applicativi includono:

- ♣ **Zone umide naturali o create (*wetlands*):** Impiegate per il trattamento secondario o terziario delle acque reflue, fungendo da filtri naturali. Possono essere progettate per adattarsi a diversi contesti ambientali — urbani, agricoli o industriali — e contribuiscono, oltre che al miglioramento della qualità delle acque, anche alla biodiversità, al sequestro del carbonio e alla resilienza climatica. Le evidenze scientifiche confermano l'efficacia dei *wetlands* come strumenti di gestione sostenibile delle risorse idriche (Ferreira et al., 2023)
- ♣ **Foreste ripariali e *buffer vegetali*:** Strisce di vegetazione lungo i corsi d'acqua che proteggono le acque superficiali e sotterranee dall'inquinamento da agricoltura o dilavamento urbano. Oltre al ruolo ecologico, i *buffer ripariali* sono strumenti fondamentali per la conservazione del paesaggio fluviale e dovrebbero essere integrati nelle politiche di gestione sostenibile del territorio (Graziano, Deguire, & Surasinghe, 2022).
- ♣ **Tetti verdi e suoli permeabili:** Soluzioni urbane che riducono il *runoff* superficiale favoriscono l'infiltrazione dell'acqua nel terreno e mitigano l'effetto isola di calore. Questi sistemi, quando progettati in configurazioni multilayer "blue-green", agiscono come dispositivi multifunzionali in grado di gestire efficacemente sia l'acqua piovana che la coibentazione termica, migliorando il microclima urbano e contribuendo alla resilienza delle infrastrutture (Cristiano et al., 2022).
- ♣ **Laghi artificiali e bacini di ritenzione multifunzionali:** Strutture progettate per l'accumulo dell'acqua, la decantazione dei sedimenti e la gestione delle piene, spesso con valenza paesaggistica e ricreativa. Evidenze recenti dimostrano come i laghi artificiali collocati in contesti forestali possano rafforzare le funzioni ecologiche e la resilienza idrica dei paesaggi, contribuendo alla conservazione della fauna acquatica e al miglioramento del microclima locale (Starzak et al., 2025).

Le NBS generano una serie di benefici ambientali e sociali rilevanti. Contribuiscono alla mitigazione delle ondate di calore, favoriscono il sequestro del carbonio e promuovono la biodiversità urbana. Offrono inoltre un miglioramento dell'estetica degli spazi pubblici e della qualità della vita, stimolando al contempo l'educazione ambientale e la partecipazione attiva delle comunità locali.

4.2.3 Integrazione e scalabilità

Studi recenti (Delgado et al., 2024; Mbavarira & Grimm, 2021) dimostrano che l'integrazione tra soluzioni decentralizzate e *nature-based* permette di:

- ♣ **Chiudere i cicli idrici locali**, minimizzando gli sprechi.
- ♣ **Aumentare l'autonomia** e la sicurezza idrica dei territori.
- ♣ **Ridurre i costi complessivi** di infrastrutturazione rispetto a soluzioni centralizzate.
- ♣ **Adattarsi meglio alle variazioni climatiche e demografiche**, grazie alla loro flessibilità.

Un approccio efficace prevede il "mosaico funzionale": una combinazione dinamica di micro-infrastrutture tecniche (come moduli di trattamento compatti, sensori, sistemi mobili) e ambientali (NBS) che vengono adattate al contesto idrogeologico, sociale ed economico specifico. Questa visione integrata, promossa anche dalla letteratura recente, valorizza l'interconnessione tra resilienza urbana, innovazione tecnologica e sostenibilità ambientale (Castellar et al., 2022).

CASI STUDIO

Esperienze internazionali confermano l'efficacia delle soluzioni decentralizzate e *nature-based*:

- ♣ In Messico, l'adozione di sistemi per la raccolta dell'acqua piovana in insediamenti informali ha portato a una riduzione del 40% nella domanda idrica municipale, migliorando l'accesso all'acqua per le comunità.
- ♣ A Granollers (Spagna) un sistema ibrido per il riuso delle acque reflue urbane ha garantito una qualità dell'acqua conforme agli standard per usi non potabili (irrigazione, pulizia strade) e un'elevata rimozione di contaminanti emergenti. È risultato economicamente sostenibile (costo 0,71–0,75 €/m³) considerando anche benefici ambientali e sociali, inoltre, la componente naturale ha migliorato l'accettabilità pubblica e la resilienza del sistema (Gonzalez-Flo et al., 2023).
- ♣ In Olanda e Belgio, distretti industriali hanno integrato con successo impianti di fitodepurazione e moduli MBR decentralizzati, dimostrando la scalabilità tecnica di queste soluzioni anche in contesti complessi (Mbavarira & Grimm, 2021).
- ♣ A livello globale, il programma WICER della Banca Mondiale ha fornito un quadro operativo per progettare e implementare interventi resilienti basati su NBS e sistemi distribuiti, adattabili a diversi contesti urbani (Delgado et al., 2024).

4.3 INTEGRAZIONE CON ALTRI SETTORI: ENERGIA, AGRICOLTURA, MANIFATTURA

L'approccio integrato alla gestione delle risorse idriche si fonda su una consapevolezza sistemica: l'acqua non è un'entità isolata, ma è intimamente interconnessa con i sistemi energetici, agroalimentari e produttivi. Il paradigma del nexus acqua–energia–cibo–industria sta evolvendo verso una convergenza tecnologica e regolatoria che privilegia l'efficienza complessiva, la resilienza climatica e la decarbonizzazione (Yasin et al., 2021; World Economic Forum, 2011; Zarei et al., 2021).

ACQUA-ENERGIA: SINERGIE PER LA DECARBONIZZAZIONE

Il settore energetico è un consumatore intensivo d'acqua, ma al tempo stesso un fornitore cruciale di infrastrutture e servizi per il ciclo idrico. Le sinergie più promettenti includono:

- ♣ **Recupero energetico da fanghi e reflui**: tecnologie come la digestione anaerobica e la pirolisi permettono la produzione di biogas e syngas, utili per la cogenerazione e l'iniezione in rete (Taron et al., 2023).

- ♣ **Integrazione di turbine idrauliche e CHP negli impianti di trattamento:** consente il recupero di energia idromeccanica e termica, migliorando l'efficienza complessiva degli impianti (Delgado et al., 2024).
- ♣ **Digitalizzazione per il risparmio energetico:** sensori IoT, inverter e sistemi SCADA possono ridurre il consumo energetico degli impianti idrici fino al 40%, contribuendo alla decarbonizzazione (IEA, 2022; Zarei et al., 2021).
- ♣ **Produzione di idrogeno verde:** l'integrazione di elettrolizzatori alimentati da fonti rinnovabili nei cicli idrici consente la generazione di H₂ utilizzando acque reflue trattate (Delgado et al., 2024).

Queste innovazioni supportano lo sviluppo di “positive energy-water districts”, dove reti idriche ed energetiche collaborano in modo sinergico per l'autosufficienza e la neutralità climatica (Ali & Acquaye, 2024).

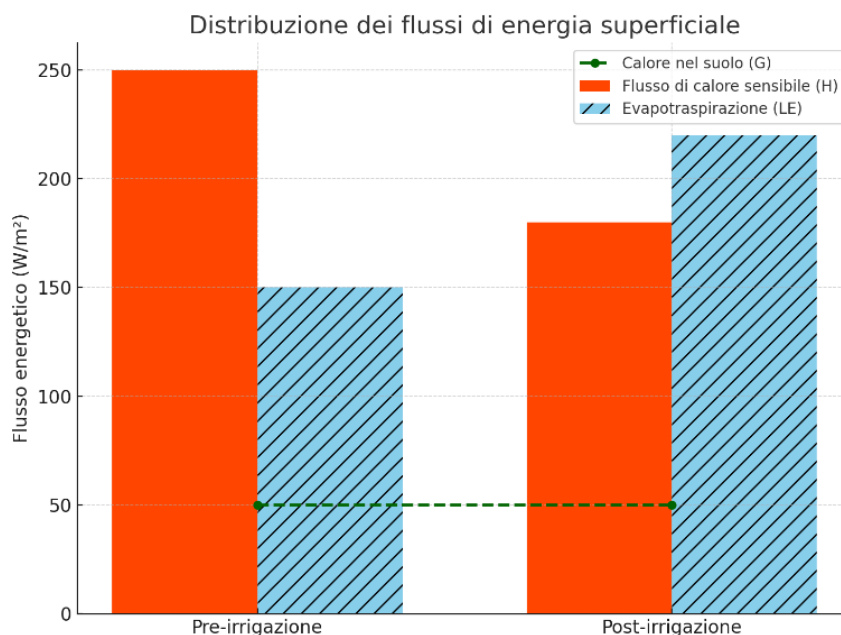
ACQUA & AGRICOLTURA: RIUSO, NUTRIENTI E RESILIENZA CLIMATICA

L'agricoltura rappresenta oltre il 70% dei prelievi di acqua dolce a livello globale (Zhang et al., 2022; Biswas et al., 2025) e risente in modo diretto della crescente scarsità idrica (Kahn et al., 2025). Le strategie di integrazione più efficaci includono:

- ♣ **Riuso agricolo delle acque reflue:** l'utilizzo di acque trattate per l'irrigazione di colture non alimentari può ridurre i prelievi da fonti convenzionali, con impatti positivi sulla sicurezza idrica (Lalawmpui & Rai, 2023).
- ♣ **Recupero dei nutrienti:** il riutilizzo di fosforo e azoto sotto forma di fertilizzanti organo-minerali contribuisce alla chiusura del ciclo dei nutrienti e riduce la dipendenza da input chimici (Barman et al., 2025).
- ♣ **Irrigazione intelligente basata su IoT:** sistemi di irrigazione automatizzata, basati su sensori e modelli predittivi, migliorano l'efficienza idrica e aumentano la resa (Udo et al., 2024).
- ♣ **Agroecologia circolare:** l'integrazione di reflui trattati, acque meteoriche e compost riduce l'impronta ambientale delle attività agricole (Barman et al., 2025; Ali & Acquaye, 2024).

L'irrigazione non ha solo effetti produttivi, ma può anche contribuire alla mitigazione degli impatti del cambiamento climatico a livello locale. Come dimostrato da Zhang et al. (2022), l'evapotraspirazione indotta artificialmente nei campi irrigati modifica il bilancio energetico superficiale, **riducendo il flusso di calore sensibile (H)** e favorendo un **raffreddamento dell'aria**.

Figura 5 Distribuzione dei flussi di energia prodotti (Rielaborazione da Zhang et al. 2022).



La Figura 5 illustra questa redistribuzione dei flussi energetici superficiali prima e dopo l'irrigazione, con un marcato incremento del flusso latente associato all'evapotraspirazione. Questo effetto è stato documentato in vaste aree irrigate di India, Cina e Stati Uniti, con **riduzioni termiche fino a 1 °C** nei mesi estivi. Tuttavia, tale beneficio è bilanciato da un uso spesso inefficiente della risorsa idrica, soprattutto in contesti con scarse infrastrutture di distribuzione o elevata evaporazione non utile. È quindi cruciale promuovere una transizione verso **sistemi irrigui a maggiore efficienza** (es. goccia, subirrigazione, sensoristica predittiva), che massimizzino l'evapotraspirazione utile e riducano le perdite non produttive, integrando così mitigazione e adattamento climatico in un'ottica sinergica. Queste soluzioni riducono la dipendenza da fonti convenzionali, migliorano la resilienza ai cambiamenti climatici e aumentano la produttività dei sistemi agricoli marginali.

ACQUA-MANIFATTURA: SIMBIOSI INDUSTRIALE E PROCESSI A CICLO CHIUSO

Nel settore manifatturiero, l'acqua è impiegata in quasi tutte le fasi produttive: dal raffreddamento ai lavaggi, dalle reazioni chimiche al trasporto di materiali. L'integrazione con altri settori consente:

- ♣ **Simbiosi industriale:** Lo scambio di flussi idrici e materiali tra aziende confinanti (es. calore residuo, acque trattate, fanghi valorizzati) crea un ecosistema industriale più efficiente e circolare (Ali & Acquaye, 2024).
- ♣ **Sistemi a ciclo chiuso (closed-loop):** Il ricircolo interno delle acque di processo trattate (es. acciaierie, industria cartaria, tessile) riduce drasticamente il prelievo di acqua fresca e gli scarichi (Lalawmpui & Rai, 2023).

- ♣ **Decarbonizzazione dei processi produttivi:** Attraverso il riuso idrico, il recupero energetico e la riduzione dei carichi inquinanti, le industrie possono ridurre significativamente la propria impronta ambientale.
- ♣ **Certificazioni e rendicontazione integrata (ESG):** La gestione efficiente dell'acqua è un parametro chiave per la valutazione della sostenibilità industriale, sempre più richiesta da investitori e *stakeholder*.

Esempi di successo sono presenti nei distretti industriali italiani (es. tessile pratese, agroalimentare modenese), dove impianti consortili permettono la gestione condivisa delle acque reflue e il riuso circolare, dimostrando la fattibilità di questi modelli.

L'integrazione dell'acqua con energia, agricoltura e manifattura è una condizione abilitante per la transizione ecologica e per il raggiungimento degli SDG 6 (acqua pulita e servizi igienico-sanitari), 7 (energia pulita e accessibile), 12 (consumo e produzione responsabili) e 13 (azione per il clima).

Favorire politiche intersettoriali, strumenti di *governance* condivisi e investimenti in infrastrutture congiunte consente di massimizzare i benefici ambientali, economici e sociali, trasformando i flussi idrici in risorse strategiche per la resilienza territoriale.

Inoltre, questo è essenziale per il raggiungimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile, in particolare SDG 6, 7, 12 e 13 (Gu et al., 2024; Jones et al., 2024).

4.4 CASI STUDIO A SUPPORTO DELLA TRANSIZIONE

L'adozione di tecnologie e modelli di gestione innovativi per la chiusura del ciclo idrico trova un supporto concreto in un numero crescente di esperienze reali, che ne dimostrano la fattibilità tecnica, la sostenibilità economica e il valore ambientale. Numerosi casi studio offrono esempi replicabili di come l'economia circolare dell'acqua possa essere implementata con successo in contesti urbani, industriali e agricoli.

ITALIA: DISTRETTI INDUSTRIALI E RIUSO CONSORTILE

Nel distretto tessile di Prato, uno dei principali poli europei della moda, la gestione dei reflui è affidata al consorzio GIDA, che tratta annualmente circa 12 milioni di metri cubi di acque reflue urbane e industriali. L'integrazione di tecnologie avanzate come i bioreattori a membrana (MBR) e l'ozonizzazione consente il riutilizzo di oltre il 60% dell'acqua trattata nei cicli produttivi locali. Questo modello ha permesso di ridurre significativamente i prelievi da falda e i carichi inquinanti, contribuendo a rafforzare la competitività del distretto (Mbavarira & Grimm, 2021).

Un'altra esperienza rilevante è quella del distretto agroalimentare di Modena, dove un sistema consortile di trattamento consente il riutilizzo delle acque reflue per l'irrigazione e per usi industriali secondari, come il lavaggio degli impianti. Le frazioni solide vengono inoltre valorizzate come fertilizzanti, chiudendo efficacemente il ciclo nutrienti-acqua.

SINGAPORE: NEWATER E IL RIUSO POTABILE INDIRECTO

Singapore ha adottato un approccio sistemico alla gestione delle risorse idriche attraverso la strategia dei "Four National Taps": risorse locali, importazioni dalla Malesia, dissalazione e riuso potabile indiretto (NEWater). Il programma NEWater copre oltre il 40% del fabbisogno nazionale e si basa su una combinazione di MBR, osmosi inversa e disinfezione UV. L'acqua trattata viene reiniettata negli invasi prima della potabilizzazione finale, garantendo alti standard qualitativi e accettabilità sociale. Le campagne pubbliche, una tariffazione progressiva e l'uso estensivo di tecnologie digitali ne fanno uno dei modelli più avanzati al mondo (Delgado et al., 2024).

TURCHIA – ANTALYA: RACCOLTA DELL’ACQUA PIOVANA PER L’AGRICOLTURA PROTETTA

Nel contesto della crescente scarsità idrica in regioni mediterranee, la provincia di Antalya ha sviluppato un programma di raccolta e riuso dell’acqua piovana orientato al settore delle serre, che rappresenta un comparto agricolo strategico per l’economia locale. Attraverso il recupero delle precipitazioni dai tetti delle serre – che coprono oltre il 50% della superficie serricola nazionale – è stato stimato un potenziale di raccolta superiore a 224 milioni di m³/anno, con picchi mensili rilevanti in inverno.

Simulazioni idrologiche hanno dimostrato la possibilità di coprire una quota significativa del fabbisogno irriguo per colture come il pomodoro, riducendo al contempo i costi operativi e la pressione sulle risorse convenzionali. Il modello integra infrastrutture modulari di stoccaggio, sistemi di filtrazione e utilizzo diretto nei cicli produttivi, risultando replicabile in altri contesti agricoli intensivi. L’iniziativa rappresenta un esempio virtuoso di approccio nature-based e low-cost per la resilienza idrica in agricoltura (Ertop et al., 2023).

ISRAELE: MASSIMIZZAZIONE DEL RIUSO E AGRICOLTURA CIRCOLARE

Israele rappresenta il contesto con la più alta percentuale mondiale di riutilizzo delle acque reflue trattate, superiore all’85%, grazie a impianti altamente tecnologici come Shafdan. La maggior parte dell’effluente trattato viene utilizzato per l’irrigazione agricola, in sinergia con sistemi di irrigazione a goccia, fertirrigazione e agricoltura di precisione. La strategia nazionale integra pricing pienamente riflettente, innovazione tecnologica e pianificazione centralizzata. L’efficienza idrica israeliana è sostenuta da una forte governance intersettoriale e da investimenti costanti in R&S.

PAESI BASSI: INTEGRAZIONE ACQUA–ENERGIA–RISORSE

L’impianto Waternet di Amsterdam rappresenta una delle applicazioni più avanzate dell’integrazione tra cicli idrico, energetico e dei nutrienti. Il calore residuo delle acque reflue viene recuperato per alimentare una rete di teleriscaldamento urbana che serve oltre 100.000 abitazioni. In parallelo, i fanghi vengono convertiti in biogas e in struvite, un fertilizzante a base di fosforo. L’intero impianto è controllato tramite un sistema di *digital twin*, che consente la simulazione e il monitoraggio in tempo reale dei flussi (Delgado et al., 2024).

CITTÀ DEL MESSICO: DECENTRALIZZAZIONE PER LA RESILIENZA URBANA

In risposta a una rete idrica urbana con perdite superiori al 40%, Città del Messico ha promosso un modello decentralizzato di raccolta e trattamento. Sono stati implementati moduli containerizzati per il trattamento locale delle acque grigie in scuole, mercati e quartieri periferici. Parallelamente, il municipio ha incentivato sistemi di raccolta dell’acqua piovana e il riuso domestico e edilizio delle acque meteoriche, migliorando la resilienza del sistema idrico urbano (Mbavarira & Grimm, 2021).

CILE – IRRIGAZIONE AGRICOLA OTTIMIZZATA TRAMITE IOT A BASSO COSTO

Nel contesto rurale della regione di Biobío, nel sud del Cile, un team di ricerca ha sviluppato un prototipo IoT per l’irrigazione intelligente, mirato alle esigenze dei piccoli e medi agricoltori. Il sistema, implementato presso la proprietà agricola “Hijuela El Proceso”, combina sensori di umidità del suolo, una scheda Arduino e una piattaforma cloud per la gestione remota dell’irrigazione, ottimizzando il consumo idrico e riducendo la dipendenza da interventi manuali. Progettato per appezzamenti tra 0,5 e 40 ettari, il sistema consente di attivare l’irrigazione solo quando l’umidità scende sotto una soglia prestabilita e solo nelle fasce orarie più fresche, migliorando l’efficienza energetica e produttiva. Il prototipo ha dimostrato una riduzione del 33,8% dei costi stagionali su 2 ettari coltivati a mirtilli, con un tempo di ritorno dell’investimento

inferiore a tre settimane. Oltre al risparmio idrico, il sistema favorisce l'autonomia tecnologica degli agricoltori locali e la transizione verso un'agricoltura digitale più resiliente (Saez Rojas et al., 2024).

SUDAFRICA – DURBAN: RIUSO POTABILE INDIRETTO IN AMBIENTE URBANO FRAGILE

La città di Durban ha avviato una delle prime esperienze di riuso potabile indiretto nel continente africano, rispondendo alla crescente pressione sulle fonti idriche convenzionali e alla vulnerabilità infrastrutturale delle aree urbane periferiche. Il sistema si basa su un trattamento avanzato composto da filtrazione a membrana e disinfezione UV, con successiva reintegrazione dell'effluente trattato nel sistema di approvvigionamento potabile.

L'intervento è stato accompagnato da un'intensa campagna di comunicazione pubblica e da un rafforzamento della governance locale. I risultati mostrano un miglioramento significativo nella sicurezza idrica, una riduzione del rischio di interruzioni del servizio e una crescente accettazione sociale del riuso, anche in contesti abitualmente restii a questo tipo di soluzioni (Water Research Commission South Africa, 2021).

Parallelamente, Cape Town ha affrontato una grave crisi idrica tra il 2017 e il 2018, nota come "Day Zero". Il governo municipale ha adottato una strategia emergenziale di riduzione drastica della domanda (fino a 50 litri per persona al giorno), nuova tariffazione, limitazioni normative e diversificazione delle fonti. Il caso dimostra l'efficacia della comunicazione di rischio e della governance adattiva nel prevenire il collasso del sistema idrico (Millington & Scheba, 2020).

INDIA – TAMIL NADU: FITODEPURAZIONE DECENTRALIZZATA A SCALA RURALE

Nel Tamil Nadu, una regione densamente popolata dell'India meridionale, la scarsità idrica e l'inquinamento delle falde hanno spinto numerose comunità rurali a sperimentare soluzioni decentralizzate per il trattamento delle acque grigie. Con il supporto di ONG locali e programmi internazionali, sono stati realizzati oltre 150 impianti di fitodepurazione a flusso sub-superficiale, gestiti direttamente dai villaggi.

Le acque trattate vengono riutilizzate per irrigare orti domestici, contribuendo alla sicurezza alimentare e alla riduzione della domanda sulle fonti sotterranee. L'approccio si distingue per il basso costo di realizzazione, la semplicità gestionale e l'elevata accettabilità sociale (UNEP, 2021).

BURKINA FASO – FITODEPURAZIONE DECENTRALIZZATA PER IL RIUSO AGRICOLO IN AREE ARIDE

Nel villaggio rurale di Nougou, nel Sahel centrale del Burkina Faso, è stato realizzato un sistema di fitodepurazione a flusso orizzontale per il trattamento delle acque grigie domestiche (docce, lavaggi, stoviglie), con l'obiettivo di riutilizzarle per l'irrigazione di orti familiari. Il sistema, costruito interamente con materiali locali e senza l'uso di energia meccanica, è costituito da una vasca di raccolta, un pre-trattamento con ghiaia e un filtro vegetato con *Chrysopogon zizanioides*. I risultati ottenuti mostrano un'efficienza di rimozione superiore al 90% per la materia organica (COD, BOD₅), una riduzione del 73% per il fosforo (PO₄³⁻) e del 60% per l'ammonio (NH₄⁺), nonché un abbattimento dei batteri fecali tra 3,4 e 4,2 log₁₀ unità, in linea con le linee guida dell'OMS per l'irrigazione controllata. Il sistema ha dimostrato non solo la fattibilità tecnica e l'accettabilità sociale della soluzione, ma anche un potenziale significativo per contribuire alla sicurezza alimentare e alla resilienza climatica in contesti a scarse risorse idriche (Maiga et al., 2024).

PERÙ – LIMA: INFRASTRUTTURE VERDI PER LA RESILIENZA CLIMATICA URBANA

Lima, capitale del Perù, affronta una delle situazioni più critiche al mondo in termini di disponibilità idrica, con una dipendenza quasi totale dalle risorse provenienti dalla catena

andina. In risposta a questa condizione, la città ha sviluppato un sistema di infrastrutture verdi integrato in un più ampio piano di adattamento climatico.

Il programma prevede la realizzazione di parchi filtranti, giardini pluviali, bacini di ritenzione e lagune artificiali multifunzionali, destinati a raccogliere e infiltrare le acque meteoriche. Oltre al beneficio idrologico, queste soluzioni hanno contribuito alla riqualificazione di aree degradate, alla creazione di lavoro locale e alla promozione di una cultura urbana più consapevole del valore dell'acqua (World Bank, 2022).

4.4.1 Risultati chiave

I casi illustrati permettono di evidenziare alcuni risultati fondamentali.

Sul piano tecnologico, emerge con chiarezza la versatilità delle soluzioni modulari e scalabili. Tecnologie come i bioreattori a membrana (MBR), l'osmosi inversa, i trattamenti ossidativi avanzati (es. ozono, UV) e le fitodepurazioni decentralizzate si sono dimostrate efficaci in contesti sia urbani che rurali, adattandosi a diverse condizioni operative e infrastrutturali.

Dal punto di vista economico, i modelli consortili, le utility circolari e i partenariati pubblico-privati (PPP) rappresentano strumenti cruciali per rendere bancabili e sostenibili i progetti, soprattutto nei casi in cui l'iniziativa privata è integrata da supporto istituzionale o comunitario. La flessibilità finanziaria è un elemento abilitante essenziale, anche per soluzioni a basso costo in ambito rurale.

Socialmente, la trasparenza, la partecipazione attiva delle comunità e la comunicazione pubblica sul valore del riuso si rivelano determinanti per il successo degli interventi. I casi di Durban e Tamil Nadu lo dimostrano: il coinvolgimento locale non solo favorisce l'accettazione del riuso, ma ne garantisce anche la gestione e la manutenzione nel lungo termine.

A livello istituzionale, la presenza di una governance multilivello, capace di coordinare attori pubblici, privati e locali, accelera l'adozione di pratiche circolari. È particolarmente efficace quando accompagnata da strumenti normativi chiari e da linee guida tecniche accessibili.

Sul piano ambientale, infine, tutti i casi confermano che l'approccio circolare permette di ridurre in modo significativo le emissioni di gas serra, contenere l'uso del suolo, limitare i carichi inquinanti e recuperare risorse critiche (acqua, nutrienti, energia), generando benefici sistemici e co-benefici ecosistemici.

I casi studio esaminati dimostrano che le soluzioni circolari in ambito idrico sono replicabili e adattabili, a condizione che siano supportate da governance multilivello efficace e da un contesto normativo abilitante.

4.5 TABELLE E COMPARAZIONI

4.5.1 Riuso classificato in base alla fonte e alla destinazione d'uso

Tipo di refluo	Fonte	Usi finali compatibili	Esigenze di trattamento
Acque grigie	Lavabi, docce, lavanderie	Irrigazione verde urbano, scarichi WC, lavaggi stradali	Trattamenti leggeri (filtrazione, UV)
Acque nere	WC e reflui fognari integrati	Agricoltura, uso industriale non alimentare	Trattamento biologico avanzato
Reflui industriali	Processi produttivi (es. tessile, chimico)	Raffreddamento impianti, lavaggi, ricircolo tecnico	Trattamento su misura, disinfezione

4.5.2 Riepilogo complessivo delle tecnologie per la chiusura del ciclo idrico

Categoria	Tecnologia/Strumento	Funzione chiave	Vantaggi strategici	Criticità principali
Digitalizzazione	Sensori IoT	Monitoraggio di portata, pressione, qualità	Dati in tempo reale, riduzione perdite	Costi iniziali, manutenzione, cybersecurity
	<i>Smart metering</i>	Misurazione automatizzata per utenza/processo	Ottimizzazione consumi, tracciabilità	Interoperabilità tra sistemi
	SCADA & Digital twin	Supervisione e simulazione dei sistemi	Controllo remoto, gestione predittiva	Complessità operativa
Trattamenti a membrana	UF, NF, RO, MBR	Filtrazione avanzata e produzione acqua rigenerata	Alta efficienza, modularità, compattezza	Fouling, consumo energetico, costi
Processi ossidativi	UV, O ₃ , AOP (es. UV/H ₂ O ₂ , O ₃ /H ₂ O ₂)	Degradazione microinquinanti e disinfezione	Rimozione completa di sostanze refrattarie	Costi energetici e sicurezza nell'uso di reagenti
Recupero risorse	Digestione anaerobica	Produzione biogas da fanghi	Autosufficienza energetica, riduzione volumi	Stabilità biologica del processo
	Precipitazione (es. struvite)	Recupero fosforo da liquami/fanghi	Fertilizzanti green, economia circolare	Complessità chimico-operativa
	Scambio ionico, adsorbimento selettivo	Recupero azoto e metalli	Riduzione carichi inquinanti, valorizzazione sottoprodotti	Rigenerazione materiali, gestione residui

Per un confronto dettagliato tra le principali tecnologie disponibili, si rimanda all'Appendice D – *Guida alla scelta delle tecnologie per il trattamento e il riuso idrico*, dove viene presentato un confronto multicriterio sintetico delle principali soluzioni applicabili.

4.5.3 Casi studio internazionali per la chiusura del ciclo idrico

Regione	Tipo di contesto	Strategia principale	Tecnologie chiave	Approccio sociale e governance	Risultati principali
Italia – Prato	Distretto industriale	Riuso consortile delle acque reflue	Bioreattori a membrana (MBR), ozonizzazione	Gestione centralizzata da parte del consorzio GIDA; modello consortile di filiera; tariffazione incentivante e condivisione costi	Trattati ~12 M m ³ /anno; riduzione dei prelievi da falda e dei carichi inquinanti; rafforzamento della competitività del distretto tessile
Italia – Modena	Distretto agroalimentare	Riuso per irrigazione e usi industriali secondari; valorizzazione fanghi	Sistema consortile di trattamento, digestione/fertilizzazione fanghi	Modello consortile; condivisione degli impianti e dei costi; integrazione ciclo nutriente-acqua	Uso delle acque reflue per irrigazione e lavaggio impianti; fanghi come fertilizzanti; chiusura del ciclo nutriente-acqua
Singapore (NEWater)	Sistema idrico nazionale	Riuso potabile indiretto	MBR, osmosi inversa, disinfezione UV	Quattro fonti integrate (“Four National Taps”); forte comunicazione e pubblica; tariffazione progressiva; governance centralizzata; digitalizzazione e dei monitoraggi	Copertura di >40% del fabbisogno nazionale; elevata qualità e accettabilità sociale; modello di riferimento internazionale per il riuso potabile indiretto
Turchia – Antalya	Agricoltura protetta	Raccolta e riuso dell’acqua piovana dalle serre	Sistemi modulari di stoccaggio, filtrazione, reti di raccolta	Cooperazione fra agricoltori e autorità locali; trasferimento tecnologico; approccio nature-based e low-cost	Copertura significativa del fabbisogno irriguo invernale; riduzione costi operativi e pressione sulle risorse; modello replicabile in altre serre

Israele – Shafdan	Irrigazione agricola	Massimizzazione del riuso delle acque reflue	Impianti a membrana avanzati; irrigazione a goccia; fertirrigazione	Governance intersettoriale; pricing riflettente il costo reale; investimenti costanti in R&S; pianificazione centralizzata	Efficienza senza eguali; irrigazione agricola di precisione su vasta scala; massimizzazione dell'efficienza idrica
Paesi Bassi – Amsterdam	Ciclo acqua-energia-risorse	Integrazione acqua-energia-nutrienti	Twin digitale; recupero di calore da acque reflue; biogas; produzione di struvite	Modello pubblico-privato con partenariati tecnologici; monitoraggio in tempo reale; approccio circolare di filiera	Teleriscaldamento per 100 000 abitazioni; produzione di fertilizzante (struvite) e biogas dai fanghi; flussi ottimizzati grazie al digital twin
Città del Messico	Contesto urbano fragile	Decentralizzazione trattamento acque grigie e raccolta acque piovane	Moduli containerizzati; microfiltrazione	Incentivi municipali per sistemi domestici; campagne di sensibilizzazione; partenariati pubblico-privati	Riduzione perdite rete >40%; resilienza incrementata in scuole, mercati e periferie; maggiore autonomia idrica
Cile – Biobío	Azienda agricola rurale	Irrigazione intelligente IoT a basso costo	Sensori di umidità; Arduino; piattaforma cloud	Coinvolgimento di piccoli agricoltori; formazione e supporto tecnico; modello open-source	Risparmio idrico stagionale 33,8% su 2 ha di mirtilli; ROI <3 settimane; incremento dell'autonomia tecnologica degli agricoltori
Sudafrica – Durban	Contesto urbano fragile	Riuso potabile indiretto con reintegrazione nella rete potabile	Filtrazione a membrana; disinfezione UV	Rafforzamento governance locale; intenso dialogo pubblico; coinvolgimento comunità periferiche	Miglioramento sicurezza idrica; riduzione rischio interruzioni; crescente accettazione sociale del riuso in aree

					precedentemente reticenti
India – Tamil Nadu	Aree rurali	Fitodepurazione decentralizzata a flusso sub-superficiale	Impianti di fitodepurazione (piante epuratrici)	Gestione comunitaria diretta; partnership ONG-villaggi; programmi internazionali di capacity building	Riuso acque grigie per orti domestici; basso costo e semplicità gestionale; accettabilità sociale elevata; contributo a sicurezza alimentare e riduzione prelievi falda
Burkina Faso – Nougou	Aree rurali aride	Fitodepurazione a flusso orizzontale con specie locali	Filtro vegetato con Chrysopogon zizanioides; ghiaia	Coinvolgimento comunità; materiali locali; nessun uso di energia meccanica	Rimozione >90% di COD/BOD ₅ ; riduzione 73% PO ₄ ³⁻ , 60% NH ₄ ⁺ ; abbattimento batteri fecali 3,4–4,2 log ₁₀ ; potenziale per resilienza climatica e sicurezza alimentare in contesti a scarse risorse
Perù – Lima	Contesto urbano	Infrastrutture verdi per la gestione delle acque meteoriche	Parchi filtranti; giardini pluviali; bacini di ritenzione; lagune	Piano adattamento climatico comunale; finanziamenti multilaterali (Banca Mondiale); partecipazione urbana; creazione di occupazione locale	Miglioramento infiltrazione acque piovane; riqualificazione aree degradate; rafforzamento cultura urbana sul valore dell'acqua

4.6 PUNTI PRINCIPALI

La chiusura del ciclo idrico è tecnicamente possibile

Tecnologie mature e scalabili — come membrane avanzate, processi ossidativi e sistemi di recupero risorse — permettono oggi di trattare e riutilizzare l'acqua con livelli di efficienza >95%, aprendo la strada a un ciclo idrico interno chiuso.

La digitalizzazione è la leva abilitante della gestione predittiva

Strumenti come sensori IoT, *smart metering*, SCADA e *digital twin* consentono di monitorare in tempo reale flussi, pressioni e qualità, riducendo perdite fino al 30-50% e ottimizzando i costi. La transizione verso "reti idriche intelligenti" (con un potenziale miglioramento operativo del 20-40% - IEA, 2022) è cruciale per la resilienza complessiva del sistema.

I trattamenti avanzati ampliano le possibilità di riuso

Tecnologie all'avanguardia come l'osmosi inversa, i MBR, i processi ossidativi avanzati (AOP) e la separazione selettiva permettono di ottenere effluenti di alta qualità, idonei a usi industriali, agricoli e persino potabili indiretti, trasformando gli impianti in vere e proprie bioraffinerie.

Le soluzioni decentralizzate e nature-based aumentano la flessibilità

Impianti modulari e locali (MBR containerizzati, raccolta pluviale, fitodepurazione) offrono risposte efficaci in contesti periurbani, industriali o rurali. Le *Nature-Based Solutions* (NBS) come tetti verdi e zone umide generano importanti co-benefici ambientali (es. sequestro di carbonio, biodiversità) e sociali.

L'efficienza idrica è interconnessa con energia, agricoltura e industria

Il "nexus" acqua-energia-cibo-industria evidenzia la necessità di un approccio integrato. L'adozione di queste tecnologie non solo riduce i consumi idrici, ma contribuisce alla decarbonizzazione dei processi, al recupero di nutrienti e alla creazione di simbiosi industriali, massimizzando i benefici sistemici.

Tecnologie e modelli di business devono evolvere insieme

L'adozione diffusa richiede modelli economici sostenibili (PPP, utility circolari, simbiosi industriale), strumenti di policy (incentivi, standard tecnici, tariffe di riuso) e una governance multilivello. La tecnologia è pronta e i numerosi casi studio globali (es. Prato, Singapore, Amsterdam) ne dimostrano la fattibilità, ma serve un contesto abilitante per scalare a livello globale.

5 INVESTIRE NELLA RESILIENZA IDRICA: VALORE ECONOMICO, STRUMENTI E OPPORTUNITÀ SISTEMICHE

5.1 OLTRE L'EFFICIENZA: IL VALORE TRASFORMATIVO DELLA RESILIENZA IDRICA

Negli ultimi anni, il concetto di efficienza idrica è diventato centrale nelle strategie industriali, agricole e urbane. Tuttavia, si è capito che un approccio puramente tecnico-operativo, focalizzato solo sulla riduzione dei consumi e l'ottimizzazione dei processi, non basta più per affrontare la crescente complessità delle sfide ambientali e socioeconomiche.

Oggi, la resilienza idrica emerge come una leva strategica e multidimensionale. Non solo migliora la capacità di adattamento a *shock* climatici e pressioni antropiche, ma genera anche valore economico sistemico. Come sottolineato dal WR4ER Framework (Matthews et al., 2024), è necessario superare il paradigma conservativo del *de-risking* per abbracciare una resilienza trasformativa. Questa si basa sulla capacità di assorbire *shock*, adattarsi, trasformarsi e abilitare l'innovazione.

Questo cambiamento di paradigma è pienamente in linea con le direttrici del Green Deal europeo, della Strategia di Adattamento dell'UE e dell'Obiettivo di Sviluppo Sostenibile 6 (SDG 6) delle Nazioni Unite, che richiede "disponibilità e gestione sostenibile dell'acqua per tutti," in particolare nei contesti più vulnerabili (UN-Water, 2023). La resilienza, quindi, va intesa come un'infrastruttura invisibile che è alla base della competitività industriale, della coesione territoriale e della transizione climatica.

L'acqua non può più essere trattata come mero input produttivo: è un capitale naturale critico, il cui valore reale si manifesta soprattutto quando la sua disponibilità viene minacciata. Secondo la Banca Mondiale (Rodriguez et al., 2024), eventi idrici estremi come siccità o inondazioni possono erodere fino al 6% del PIL in molti paesi a medio reddito. In ambito urbano, interruzioni del servizio idrico anche brevi generano perdite economiche tra lo 0,5% e il 2,5% del PIL regionale, con impatti particolarmente gravi su agricoltura, sanità, manifattura e logistica (Pagsuyoin & Santos, 2021).

In Europa, circa il 38% della popolazione vive in aree sottoposte a stress idrico strutturale, con previsioni che indicano il superamento stabile della soglia di sostenibilità dell'indice WEI+ (20%) in diverse regioni entro il 2030 (EEA, 2023). Questo rende l'acqua un fattore produttivo limitante, amplificando tensioni intersettoriali e fragilità economiche.

Dal punto di vista del valore creato, uno studio di Water Europe (2024) ha stimato che investimenti integrati in resilienza idrica possono generare benefici netti per oltre 100–120 miliardi di euro/anno entro il 2030. Questi includono:

- ♣ risparmi ambientali (eutrofizzazione, GHG, degrado dei suoli),
- ♣ benefici sanitari,
- ♣ maggiore attrattività per settori idro-dipendenti (semiconduttori, batterie, agroindustria, data center).

Almeno 30 miliardi/anno sono riconducibili alla sola gestione efficiente della domanda e alla riduzione delle perdite sistemiche. Ulteriori benefici derivano dalla riduzione della volatilità economica, con minori costi di emergenza, interruzioni produttive e danni infrastrutturali (Matthews et al., 2024; Pot, 2023).

Questa evidenza richiede di rivedere gli strumenti economici tradizionali (NPV, CBA) per includere incertezza climatica, benefici indiretti e valore degli impatti evitati. Strumenti come la pianificazione robusta e gli adaptive pathways sono già operativi in diversi paesi europei, supportando investimenti resilienti anche in scenari incerti (OECD, 2022; Haasnoot et al., 2013).

5.2 INTEGRAZIONE ECONOMICA DEL RIUSO IDRICO

In un quadro globale e regionale di crescente scarsità idrica, l'integrazione del riuso nel sistema idrico può rappresentare non solo un'opportunità ambientale, ma soprattutto un driver economico strategico, capace di generare rilevanti benefici finanziari e ridurre significativamente i rischi associati alla gestione delle risorse idriche (World Bank, 2023).

5.2.1 Riduzione dei costi per l'approvvigionamento idrico

Il riuso delle acque reflue riduce la pressione sui corpi idrici naturali, diminuendo la dipendenza da fonti convenzionali e mitigando i costi crescenti di approvvigionamento. Secondo recenti valutazioni della FAO (2021), nelle regioni con elevato stress idrico come quelle mediterranee e medio-orientali, l'impiego integrato di acque reflue trattate può coprire fino al 25% della domanda agricola, riducendo notevolmente i costi legati al pompaggio e al trasporto dell'acqua da fonti più lontane o profonde.

Un'analisi basata su dati FADN in Italia ha stimato un valore economico medio dell'acqua irrigua pari a 0,29 €/m³ per la produzione di mais da granella, con variazioni da 0,11 a 0,52 €/m³ in funzione di fattori geografici e gestionali (Buttinelli et al., 2024). Tali valori, intesi come "prezzi ombra", evidenziano la sottovalutazione corrente della risorsa nei sistemi agricoli.

In Israele, paese leader nel riuso idrico agricolo, oltre il 90% delle acque reflue urbane è attualmente riutilizzato, contribuendo a una significativa riduzione dei costi diretti di approvvigionamento e fornendo stabilità economica al settore agricolo, anche in condizioni di grave siccità (Adams et al., 2023). Analogamente, nel Sud della Spagna, studi economici specifici condotti in Andalusia hanno quantificato un risparmio annuo medio compreso tra il 20% e il 30% dei costi totali dell'irrigazione, grazie al riutilizzo delle acque trattate (Lorenzo López & Expósito, 2025).

Un altro studio in Portogallo ha ulteriormente confermato la convenienza economica del riuso agricolo. I costi di approvvigionamento tramite acque reflue trattate si collocano in un intervallo compreso tra 0,02 e 0,57 €/m³, risultando significativamente inferiori rispetto alla desalinizzazione, che richiede in media 1,66 €/m³. Inoltre, la distanza tra gli impianti di trattamento (WWTP) e le superfici irrigue è emersa come un fattore critico per la sostenibilità tecnico-economica del riuso, evidenziando la necessità di una pianificazione territoriale integrata (Areosa et al., 2024).

5.2.2 Recupero di nutrienti e riduzione dell'utilizzo di fertilizzanti

Uno dei benefici economici più rilevanti derivanti dal riuso idrico è il recupero di nutrienti, principalmente azoto (N), fosforo (P) e potassio (K), presenti naturalmente nelle acque reflue urbane e agricole. Secondo uno studio dell'International Water Management Institute (IWMI, 2022), l'utilizzo integrato di acque reflue trattate consente in media una riduzione tra il 30% e il 50% nell'impiego di fertilizzanti chimici convenzionali, abbattendo significativamente i costi per gli agricoltori e diminuendo contemporaneamente l'impatto ambientale derivante da un uso eccessivo di concimi.

Un'analisi economica approfondita svolta in Spagna da Lorenzo López ed Expósito (2025) ha dimostrato come, attraverso il riuso, il settore agricolo possa ottenere una riduzione fino al 40% del fabbisogno di fertilizzanti, generando risparmi economici diretti e benefici ambientali

associati, tra cui minori emissioni di gas serra (N_2O e CO_2 equivalenti) e una riduzione significativa dell'eutrofizzazione dei corpi idrici naturali.

Esempio: L'esperienza del progetto REUSE in Egitto conferma che i reflui trattati, ricchi di nutrienti organici, possono ridurre del 20% l'impiego di fertilizzanti chimici. Il sistema basato su fitodepurazione ha generato un risparmio complessivo di 6.550 €/ha/anno e ridotto il consumo energetico legato all'estrazione di acqua di falda, offrendo un'alternativa resiliente in contesti aridi (Wahid et al., 2024).

5.2.3 Valorizzazione energetica da fanghi e acque reflue

Le acque reflue e i fanghi risultanti dal trattamento rappresentano anche un'importante risorsa energetica. Tecnologie avanzate, quali digestione anaerobica, bioreattori a membrana (MBR), pirolisi e cogenerazione, consentono oggi di recuperare una quota significativa dell'energia contenuta nei reflui urbani e industriali, riducendo drasticamente la bolletta energetica degli impianti e generando risorse economiche aggiuntive.

Secondo recenti studi, in impianti avanzati di trattamento presenti in Olanda e Germania, fino all'80% della domanda energetica operativa è soddisfatta tramite il biogas prodotto dalla digestione anaerobica dei fanghi, con benefici economici significativi e una netta riduzione delle emissioni climalteranti rispetto ai metodi tradizionali (Water Europe, 2024; OECD, 2022).

La valorizzazione dei fanghi e dei reflui non dovrebbe limitarsi alla generazione di biogas o fertilizzanti convenzionali. Recenti analisi mostrano come tecnologie di digestione anaerobica avanzata applicate a reflui municipali e agricoli possano generare ritorni energetici superiori a 0,07 €/kWh, con un *payback* inferiore a 2 anni, e contribuire alla sostituzione del 60% del gas naturale e del 38% del carbone per usi energetici (Peng et al., 2023). Inoltre, si stima che in Europa la valorizzazione integrata dei fanghi agricoli potrebbe ridurre l'uso di fertilizzanti di sintesi su oltre 1,8 milioni di ettari agricoli.

5.2.4 Valutazione costi-benefici ambientale (CBA estesa)

Per misurare in modo completo i benefici economici del riuso idrico, è essenziale l'utilizzo di una valutazione costi-benefici ambientale estesa (*extended environmental CBA*), che integri nei calcoli monetari non solo i risparmi diretti, ma anche le esternalità ambientali positive generate. Tra queste si evidenziano:

- ♣ **Riduzione delle emissioni di gas serra (*GHG avoided*):** grazie al minor uso di energia fossile nella produzione di fertilizzanti sintetici e nella gestione idrica tradizionale, il riuso idrico può abbattere significativamente l'impronta di carbonio del ciclo idrico (World Resources Institute, 2022).
- ♣ **Diminuzione dell'eutrofizzazione:** l'impiego di acque reflue trattate limita il rilascio incontrollato di nutrienti negli ambienti acquatici, generando benefici economici misurabili in termini di qualità dell'acqua e servizi ecosistemici, stimati dall'European Environment Agency (EEA, 2023) in diverse decine di milioni di euro all'anno per regioni come il Mar Baltico e il Mar Mediterraneo.
- ♣ **Monetizzazione dei servizi ecosistemici:** tra cui la stabilizzazione dei suoli agricoli, la protezione delle falde acquifere, e l'incremento della biodiversità legata a una migliore qualità delle acque e del suolo.

5.3 STRUMENTI ECONOMICI PER LA RESILIENZA

La resilienza idrica si fonda su strumenti economici capaci di incentivare comportamenti sostenibili, attrarre investimenti e guidare la transizione verso una gestione circolare ed equa della risorsa; in un contesto di competizione crescente, la leva finanziaria – inclusi tariffazione progressiva, crediti fiscali e *blended finance* – è cruciale per rendere scalabili soluzioni resilienti (OECD, 2022; IMF, 2023; European Commission, 2021; BEI, 2023; Water Europe, 2024).

5.3.1 Tariffazione progressiva dell’acqua e revisione dei sussidi perversi

Una delle misure più efficaci per promuovere un uso razionale e resiliente delle risorse idriche è rappresentata dalla tariffazione progressiva dell’acqua. Secondo un rapporto OCSE (2022), una struttura tariffaria progressiva, in cui il prezzo unitario cresce all’aumentare dei consumi, è in grado di incentivare efficacemente la conservazione idrica, riducendo in media i consumi del 15-20% rispetto a schemi tariffari lineari o flat. Esperienze significative si sono avute in Spagna, Israele, e Australia, dove l’introduzione di tariffe progressive ha prodotto riduzioni immediate nei consumi, consentendo ai gestori di evitare costosi investimenti aggiuntivi in nuove infrastrutture di approvvigionamento (Distefano et al., 2025; Tal, 2022).

Parallelamente, è essenziale una revisione dei cosiddetti “sussidi perversi”, che spesso mantengono artificialmente bassi i costi di approvvigionamento, incentivando un uso eccessivo e insostenibile della risorsa idrica. Secondo l’International Monetary Fund (IMF, 2023), a livello globale i sussidi impliciti all’acqua superano attualmente i 400 miliardi di dollari annui, costituendo un ostacolo diretto agli investimenti in efficienza e resilienza. La rimozione o la ristrutturazione di questi sussidi consentirebbe di riallocare risorse pubbliche significative verso iniziative più sostenibili e resilienti.

L’introduzione di sistemi di tariffazione basati su misurazioni volumetriche rappresenta un driver chiave per una gestione efficiente dell’acqua in agricoltura. In Italia, l’adozione di strumenti coerenti con il principio “chi inquina paga” rimane disomogenea: solo alcune Regioni hanno implementato il full cost recovery come richiesto dalla WFD (Buttinelli et al., 2024). La generalizzazione del sistema di misura può generare segnali di prezzo coerenti e incentivare pratiche a minor intensità idrica.

Il recupero dei costi nel settore idrico non si limita alla tariffazione diretta, ma può essere supportato da strumenti economici indiretti come incentivi fiscali, crediti per l’efficienza e sovvenzioni mirate. L’esperienza delle Isole Canarie mostra che, sebbene i costi finanziari siano generalmente coperti, quelli ambientali e legati alla risorsa non lo sono, evidenziando la necessità di strategie di pricing più integrate e complete (Santamarta et al., 2024).

5.3.2 Crediti fiscali e incentivi per investimenti resilienti

Strumenti economici come crediti fiscali, incentivi ambientali, fondi europei (*PNRR*, *Green Deal Fund*, *REPowerEU*) e meccanismi di finanza mista (*blended finance*) rappresentano leve essenziali per attrarre capitali privati nella resilienza idrica, stimolando investimenti in tecnologie digitali, riuso, e infrastrutture adattive.

Secondo la EIB (2023), ogni euro investito in resilienza idrica genera ritorni tra 2–3 €, mentre il WEF (2023) stima che il 30% degli investimenti globali potrà essere coperto da *blended finance* entro il 2030. Il PNRR italiano alloca 4,4 miliardi € alla gestione idrica sostenibile, focalizzandosi su riduzione delle perdite e riuso (European Commission, 2022).

I partenariati pubblico-privati (PPP), come nel progetto Thames Tideway nel Regno Unito o nelle infrastrutture verdi urbane di Parigi, mostrano come la cooperazione multi-attore possa abilitare soluzioni resilienti e bancabili. Il modello australiano di “water banking” nel bacino del Murray-Darling, basato su tariffe dinamiche e scambio di diritti, ha dimostrato efficacia nel gestire scarsità e variabilità climatica (Matthews et al., 2024).

A livello normativo, la Tassonomia UE e il Regolamento SFDR incentivano la rendicontazione idrica e l'accesso a strumenti finanziari verdi, allineando resilienza, trasparenza e allocazione efficiente dei capitali (OECD, 2022; UNEP FI, 2022).

5.3.3 Caso studio: Gestione innovativa delle risorse idriche nel Murray-Darling Basin (Australia)

Il Murray-Darling Basin (MDB) è uno dei bacini fluviali più estesi e strategici dell'Australia, coprendo oltre un milione di km² e contribuendo a circa il 40% della produzione agricola nazionale. Tuttavia, a partire dagli anni '90, il bacino ha subito una drastica riduzione delle precipitazioni nella stagione fredda, con impatti significativi sulle altezze fluviali e sulla disponibilità d'acqua (Speer et al., 2021). Tali dinamiche, accentuate dal cambiamento climatico, hanno spinto le istituzioni australiane a sviluppare un sistema di governance idrica particolarmente avanzato, fondato su strumenti di mercato, allocazione flessibile e strategie di adattamento resiliente (Alexandra & Rickards, 2021).

MERCATI DELL'ACQUA E TARIFFE DINAMICHE

Uno degli strumenti chiave implementati è il mercato dell'acqua, regolato attraverso diritti trasferibili di uso idrico ("entitlements"), che possono essere scambiati in modo permanente o temporaneo. Questo approccio, associato a meccanismi di prezzo flessibile, ha migliorato l'efficienza allocativa e incentivato comportamenti di conservazione (Wheeler, 2022). L'evidenza empirica mostra che il mercato ha permesso una riduzione media del 30% dei costi economici associati alla siccità rispetto ai metodi amministrativi precedenti (Wheeler et al., 2020).

SISTEMA DI "WATER BANKING" E RESILIENZA CLIMATICA

Parallelamente, il MDB ha adottato un sistema innovativo di "water banking", che consente agli utenti di stoccare crediti idrici non utilizzati per utilizzi futuri, migliorando la resilienza rispetto alla variabilità idroclimatica. Recenti studi confermano che questa strategia ha sostenuto la produttività agricola anche in presenza di shock climatici estremi, riducendo la volatilità dei prezzi dell'acqua e aumentando la sicurezza idrica (Grafton & Wheeler, 2018; Sawassi et al., 2024).

BENEFICI ECONOMICI, AMBIENTALI E ISTITUZIONALI

L'integrazione di strumenti di mercato, tariffe dinamiche e sistemi di water banking nel Murray-Darling Basin ha generato un impatto sistemico che trascende la mera allocazione efficiente dell'acqua, producendo benefici tangibili su più livelli: economico, ambientale, istituzionale e sociale.

EFFICIENZA ALLOCATIVA

Uno dei risultati più evidenti è il miglioramento dell'efficienza allocativa, ossia la capacità di spostare risorse idriche verso gli usi a maggiore valore economico. I diritti idrici, scambiabili nei mercati, consentono agli agricoltori di reagire alle condizioni di mercato e climatiche, spostando l'acqua verso colture più redditizie o vendendola in anni di bassa domanda. Wheeler (2022) ha mostrato come l'efficienza tecnica dell'uso irriguo aumenti significativamente in un sistema con prezzi flessibili, e che l'introduzione del commercio idrico temporaneo ha incentivato investimenti in tecnologie di irrigazione a basso consumo. Grafton et al (2018) confermano che la liberalizzazione del mercato ha contribuito a un aumento del prodotto interno lordo agricolo, mitigando al contempo le perdite durante periodi di siccità prolungata.

RESILIENZA OPERATIVA

Il sistema ha migliorato la resilienza delle imprese agricole, soprattutto quelle di piccola scala, offrendo flessibilità nell'accesso all'acqua e strumenti per far fronte a shock idrici. Come

evidenziato da Matthews et al. (2024), durante la Millennium Drought (1997–2009), le aziende che hanno avuto accesso a meccanismi di trading e water banking hanno mostrato una maggiore capacità di adattamento rispetto a quelle vincolate da assegnazioni rigide. Inoltre, Alexandra e Rickards (2021) sottolineano come la coesistenza di più "discorsi" politici (economico, ambientale, ingegneristico) abbia permesso una pluralità di strategie adattive, migliorando la capacità istituzionale di risposta a eventi estremi.

TUTELA AMBIENTALE

L'introduzione delle cosiddette "allocazioni ambientali" nel mercato idrico ha rappresentato una svolta innovativa. Questi volumi d'acqua, acquistati o riservati da enti pubblici per scopi ecologici, sono stati rilasciati in fasi critiche per sostenere gli ecosistemi fluviali, contribuendo al recupero di zone umide, habitat ittici e processi ecologici fondamentali. Grafton et al. (2018) sottolineano come, sebbene il volume totale recuperato per l'ambiente sia stato inferiore alle aspettative iniziali, il meccanismo di mercato ha fornito uno strumento trasparente ed efficiente per sostenere la biodiversità. Pot (2023) rafforza questo punto, sostenendo che l'investimento in infrastrutture idriche resilienti, se associato a governance flessibili, può aumentare le capacità adattive sia sociali che naturali di un sistema idrico.

GOVERNO MULTILIVELLO E CAPITALE ISTITUZIONALE

La gestione del MDB si fonda su una struttura di governance policentrica, che integra livelli federali, statali e comunitari. Questo approccio ha favorito la cooperazione interistituzionale, la trasparenza decisionale e la costruzione di fiducia tra gli stakeholder (Alexandra & Rickards, 2021). L'approccio collaborativo ha anche facilitato l'adattamento delle politiche in risposta a crisi ricorrenti, rafforzando la resilienza complessiva del sistema.

IMPLICAZIONI PER ALTRE REGIONI

L'esperienza del Murray-Darling Basin rappresenta un modello replicabile per la gestione sostenibile delle risorse idriche in altre regioni del mondo, in particolare nel bacino del Mediterraneo. In questi territori, caratterizzati da elevata vulnerabilità idrica, pressione agricola e cambiamento climatico, strumenti come il trading idrico, il riuso delle acque reflue e le tariffe flessibili possono migliorare l'efficienza idrica e garantire una maggiore resilienza (Ciampittiello et al., 2024).

In particolare, l'uso dell'acqua rigenerata per l'irrigazione, come avviene in alcune aree della Spagna meridionale, offre un duplice vantaggio: integrare l'economia circolare e ridurre l'impatto ambientale, diminuendo l'uso di fertilizzanti chimici e l'eutrofizzazione (Mannina et al., 2022; Lorenzo López & Expósito, 2025). Tuttavia, per favorire l'adozione di modelli ispirati al MDB in Europa, sono necessari strumenti normativi coerenti, un governo multilivello efficace e il coinvolgimento attivo degli utenti.

5.4 INNOVAZIONE ISTITUZIONALE E GOVERNANCE ECONOMICA

Una governance idrica resiliente richiede il superamento di approcci settoriali frammentati a favore di modelli integrati che uniscano economia, ambiente e coesione sociale in una visione sistemica; strumenti come la contabilità ambientale SEEA (UN 2021), indicatori strategici di circolarità (Peydayesh & Mezzenga, 2024), e pianificazione adattiva (Haasnoot et al., 2013) sono oggi essenziali per affrontare scarsità, crisi climatica e rischio economico, come dimostrano esperienze avanzate in Olanda, Spagna e Australia (Vardon et al., 2025; OECD, 2022; Pot, 2023).

5.4.1 Contabilità ambientale e idrica (SEEA)

Un elemento fondamentale per l'innovazione istituzionale nella gestione delle risorse idriche è rappresentato dal *System of Environmental-Economic Accounting* (SEEA), un framework

contabile promosso dalle Nazioni Unite che integra dati economici e ambientali nella contabilità nazionale e regionale. Questo strumento consente ai decisori pubblici di contabilizzare il valore reale delle risorse idriche, includendo non solo il valore di mercato, ma anche il valore delle externalità ambientali e dei servizi ecosistemici associati (United Nations, 2021).

Secondo recenti valutazioni, l'adozione della contabilità idrica SEEA ha permesso a diversi Paesi europei – tra cui Olanda, Spagna e Germania – di migliorare significativamente l'efficienza della gestione idrica, indirizzando meglio gli investimenti pubblici e privati, riducendo i costi ambientali e migliorando la trasparenza delle decisioni (Vardon et al., 2025; Water Europe, 2024). Nel caso dell'Olanda, l'adozione del SEEA ha favorito l'identificazione e l'implementazione di progetti infrastrutturali resilienti e integrati, come sistemi di stoccaggio delle acque piovane e impianti di recupero e riuso delle acque reflue.

5.4.2 Indicatori strategici per la resilienza e la circolarità idrica

Per guidare in maniera efficace la governance economica dell'acqua è fondamentale l'introduzione di indicatori strategici integrati che consentano una valutazione sistematica della performance e della resilienza idrica. Tra questi spiccano:

- ♣ **Water Circular Economy Index (WCEI):** sviluppato recentemente, questo indicatore permette di misurare e comparare la performance dei sistemi idrici nazionali e regionali sulla base di variabili chiave quali la percentuale di acqua riutilizzata, l'efficienza di uso della risorsa, il grado di stress idrico e la qualità complessiva della risorsa (Peydayesh e Mezzenga, 2024).
- ♣ **Net Water Value (NWW):** questo indice misura il valore economico netto generato per unità di acqua utilizzata, considerando non solo la produttività economica diretta ma anche i costi ambientali e i rischi operativi associati (Matthews et al., 2024).
- ♣ **Resilience Key Performance Indicators (Resilience KPIs):** permettono di monitorare costantemente la capacità dei sistemi idrici di assorbire shock, adattarsi rapidamente e trasformarsi in risposta alle crisi idriche, attraverso indicatori di affidabilità del servizio, capacità di recupero da eventi estremi e stabilità economica nel tempo (Pot, 2023).

5.4.3 Strumenti di pianificazione adattiva e scenariale

Considerando la crescente incertezza legata al cambiamento climatico e ai rischi idrici, diventa essenziale l'adozione di metodologie avanzate di pianificazione adattiva e scenariale.

L'adozione di strumenti digitali come Digital Twin di bacino consente simulazioni multi-scenario, integrazione in tempo reale di dati da sensori e miglioramento delle capacità predittive nella pianificazione idrica. La metodologia dei Strategic Investment Pathways (OECD, 2022) permette inoltre di selezionare e sequenziare investimenti resilienti rispetto a scenari idrologici futuri, considerando interdipendenze economico-ambientali e ritorni adattivi nel lungo termine (Brown C et al., 2022).

In particolare, l'approccio di Robust Decision-Making (RDM) e Adaptive Pathways Planning (APP) consente ai decisori pubblici e privati di valutare investimenti e politiche idriche considerando una vasta gamma di scenari futuri possibili, incorporando esplicitamente l'incertezza climatica ed economica (Haasnoot et al., 2013).

In Olanda, ad esempio, l'adozione della metodologia APP nel Delta Program ha permesso di sviluppare una strategia di adattamento idrico altamente flessibile e resiliente, che prevede interventi modulari e gradualmente in risposta a scenari climatici variabili. Questo approccio ha generato significativi risparmi economici e ambientali, permettendo investimenti mirati e tempestivi in infrastrutture resilienti (Haasnoot et al., 2013).

Analogamente, nel Regno Unito e in Australia, l'applicazione del RDM ha consentito ai governi locali di selezionare strategie resilienti in grado di garantire prestazioni ottimali anche in condizioni di estrema variabilità climatica, limitando significativamente i costi di emergenza e di interventi straordinari (Matthews et al., 2024).

L'esperienza del progetto GAP nella regione dell'Anatolia sud-orientale rappresenta un caso emblematico di regionalismo infrastrutturale idrico, dove le opere di gestione delle acque (dighe, canali, impianti) hanno modellato le dinamiche economiche e sociali regionali. Il concetto di "regionalismo idrico" sottolinea come le infrastrutture non siano solo oggetti tecnici ma veri e propri agenti politici e territoriali. Un'integrazione efficace tra governance idrica e pianificazione regionale può aumentare la resilienza adattiva e promuovere la coesione territoriale, anche in contesti complessi come quelli mediterranei (Sayan, Bilgen, & Kibaroglu, 2025).

5.4.4 Implicazioni per la governance idrica europea e globale

La combinazione tra contabilità integrata (SEEA), indicatori avanzati di performance idrica e strumenti decisionali robusti rappresenta un modello di riferimento per una governance idrica efficace e resiliente. A livello europeo, questi strumenti trovano piena coerenza con le strategie di adattamento climatico dell'UE, il Green Deal e la Tassonomia UE, fornendo una base solida per la realizzazione degli obiettivi climatici e di resilienza economica (European Commission, 2021).

A livello globale, la diffusione di queste pratiche avanzate di governance rappresenta un'opportunità strategica per garantire maggiore sostenibilità economica e ambientale alle regioni più vulnerabili ai rischi idrici, con benefici rilevanti in termini di stabilità economica, sociale e ambientale a lungo termine (United Nations, 2021; OECD, 2022).

5.4.5 Equità, giustizia ambientale e diritto all'acqua

La transizione verso una gestione circolare ed efficiente dell'acqua non può prescindere dalla dimensione sociale, che rappresenta uno dei pilastri fondamentali dello sviluppo sostenibile. In linea con i target 6.1 e 6.2 dell'Agenda 2030 delle Nazioni Unite – che mirano rispettivamente ad assicurare l'accesso universale all'acqua potabile sicura e ai servizi igienico-sanitari – è necessario integrare nei modelli di governance idrica un approccio esplicitamente orientato all'equità, alla giustizia ambientale e alla protezione dei gruppi vulnerabili.

L'accesso ineguale alle risorse idriche è una manifestazione concreta delle disuguaglianze socio-territoriali: secondo il rapporto SDG6 Update 2021, circa 2 miliardi di persone nel mondo non dispongono di acqua potabile sicura nei momenti in cui ne hanno bisogno, e oltre 673 milioni praticano ancora la defecazione all'aperto (Arora & Mishra, 2022). Inoltre, donne e ragazze rappresentano l'80% della forza lavoro per la raccolta dell'acqua nelle aree rurali, subendo un impatto sproporzionato in termini di tempo, salute e opportunità di istruzione.

Per affrontare questi squilibri, le strategie di governance devono:

- ♣ Integrare indicatori di giustizia distributiva e intergenerazionale nelle valutazioni ex ante delle politiche idriche;
- ♣ Promuovere l'accesso equo ai servizi idrici attraverso tariffe progressive, sussidi mirati e fondi di solidarietà;
- ♣ Rafforzare la partecipazione comunitaria ai processi decisionali in linea con il target 6.B, attraverso strumenti di governance inclusiva e trasparente;
- ♣ Prevedere meccanismi di compensazione per le popolazioni più colpite da stress idrico, contaminazione o progetti infrastrutturali ad alto impatto.

In questo contesto, il riconoscimento formale del diritto umano all'acqua – sancito dalle Nazioni Unite nel 2010 – deve tradursi in azioni concrete da parte di regolatori e operatori, garantendo che l'efficienza non comprometta l'equità, e che la sostenibilità economica dei sistemi idrici non sia perseguita a scapito della sostenibilità sociale.

Come evidenziato da Arora e Mishra (2022), un miglioramento della qualità della governance passa anche per l'inclusione di criteri sociali nei quadri di rendicontazione e pianificazione, in particolare in contesti urbani densamente popolati, in rapida espansione o a rischio di esclusione idrica.

5.4.6 Mappa degli stakeholder e flussi decisionali nella governance circolare dell'acqua

Una governance idrica realmente efficace non può limitarsi all'adozione di strumenti tecnici, contabili o regolatori avanzati: richiede, al contrario, una mappatura sistematica e consapevole degli attori coinvolti, dei loro ruoli funzionali e delle relazioni decisionali che ne regolano l'interazione.

La transizione verso un'economia circolare dell'acqua si configura infatti come un processo complesso, multilivello e multisetoriale, che intreccia competenze pubbliche, interessi privati, saperi scientifici e istanze civiche.

Categoria Funzionale	Stakeholder Chiave (Esempi – UE / Internazionale)	Ruolo Primario nel Ciclo Decisionale
1. Regolatori e Policy-Maker	- Commissione Europea (DG ENV, DG AGRI) - Ministeri dell'Ambiente nazionali - Autorità di regolazione indipendenti (es. acqua/energia) - Autorità di Bacino Idrografico - Governi regionali e locali	Definizione delle Regole e Supervisione Strategica: Stabiliscono quadri normativi, obiettivi strategici (es. target di riuso, standard di qualità), piani tariffari e di investimento. Agiscono da garanti dell'interesse pubblico e coordinatori multilivello.
2. Operatori e Implementatori	- Utility idriche (es. gestori del servizio integrato) - Industrie ad alto consumo idrico (chimica, alimentare, tessile, energia) - Consorzi di irrigazione e bonifica	Esecuzione ed Erogazione del Servizio: Progettano, realizzano e gestiscono infrastrutture (reti, impianti di trattamento, bacini). Responsabili della fornitura dei servizi idrici e dell'attuazione pratica delle soluzioni di circolarità.
3. Utenti e Beneficiari	- Cittadini (uso domestico) - Agricoltori (uso irriguo) - Industrie (uso di processo) - Natura ed ecosistemi (visti come "utenti idrici")	Attori della Domanda e Legittimatori: Esprimono la domanda d'acqua e legittimano il sistema attraverso i loro comportamenti (consumo, pagamento, accettazione sociale). Sono destinatari e co-protagonisti della sostenibilità della governance idrica.
4. Abilitatori e Influencer	- Istituzioni finanziarie (es. BEI, banche di sviluppo, fondi blu/verdi) - Università e centri di ricerca - Fornitori di tecnologia e consulenti - Società civile e ONG (es. WWF, Water Europe, comitati locali)	Fornitori di Risorse e Intelligenza: Offrono capitale (es. blended finance, PPP), innovazione (es. digital twin), dati e legittimità sociale ("licenza di operare"). Abilitano la transizione sistemica verso la circolarità combinando leva tecnica, finanziaria e sociale.

La mappa rappresenta una sintesi dei principali stakeholder del ciclo idrico:



La governance circolare dell'acqua si articola in cinque fasi interconnesse:

1. **Pianificazione strategica**: definizione di obiettivi, norme e indirizzi da parte delle istituzioni regolatrici.
2. **Progettazione e investimento**: traduzione degli obiettivi in progetti concreti, con il contributo di attori finanziari, tecnologici e scientifici.
3. **Implementazione e gestione**: realizzazione e conduzione operativa delle infrastrutture e dei servizi idrici.
4. **Monitoraggio e valutazione**: misurazione delle performance, conformità e impatti.
5. **Feedback e adattamento**: aggiornamento continuo delle strategie sulla base dei dati raccolti.

Ogni fase coinvolge categorie di stakeholder diverse, in un sistema circolare che consente apprendimento, adattamento e co-progettazione. Questo approccio dinamico garantisce resilienza, inclusività e coerenza tra obiettivi ambientali, economici e sociali.

La governance dell'acqua è quindi il risultato dell'interazione fra diversi paradigmi valoriali – tecnocratico, mercatista, ecologico – che coesistono e si rafforzano (Schulz et al., 2024). Il "valore dell'acqua" non è solo monetario, ma include dimensioni sociali, culturali ed ecologiche. Questa prospettiva suggerisce una valutazione multilivello nella definizione di strumenti di pricing, concessione e pianificazione.

5.5 PRIORITÀ SETTORIALI E VALUTAZIONI ECONOMICHE INTEGRATE

La resilienza idrica, per essere effettiva e misurabile, deve tradursi in strategie settoriali differenziate, capaci di valorizzare i benefici economici, ambientali e sociali associati a un uso sostenibile della risorsa. Una corretta valutazione economica integrata consente di identificare i comparti prioritari, le opportunità di intervento e i ritorni attesi, sia in termini di mitigazione del rischio sia di competitività.

5.5.1 Matrice settoriale rischio–opportunità per la resilienza idrica

La transizione verso sistemi idrici resilienti e circolari richiede strumenti analitici capaci di integrare efficacemente criteri ambientali, economici, gestionali e climatici. In tale prospettiva, la presente matrice settoriale rischio–opportunità costituisce un framework valutativo sintetico per orientare le priorità di investimento, pianificazione e regolazione nel ciclo idrico, con particolare attenzione ai principi della sostenibilità sistemica, della neutralità climatica e dell'efficienza multisettoriale (OECD, 2022; Water Europe, 2024).

Le tecnologie e i settori considerati sono stati valutati secondo cinque dimensioni chiave, su scala qualitativa 1–3 (1 = basso, 3 = alto), integrando evidenze da casi studio reali, letteratura scientifica e policy papers multilaterali:

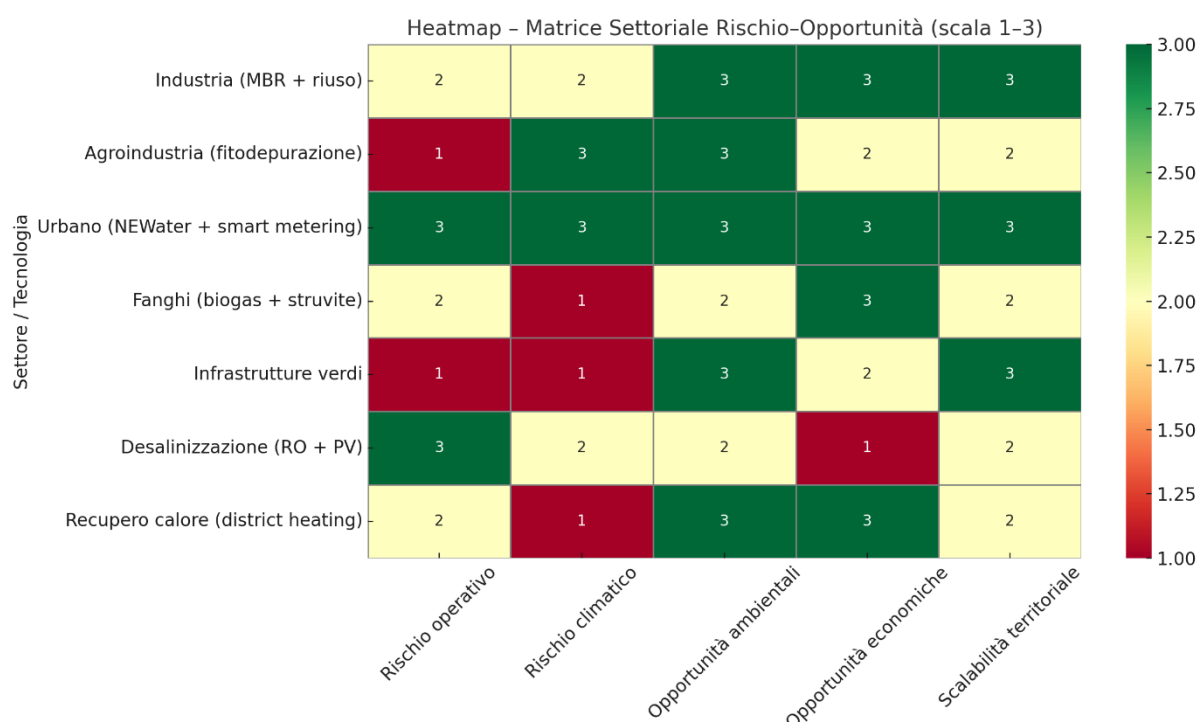
- ♣ **Rischio operativo:** misura la complessità tecnica, la probabilità di guasti, la dipendenza da infrastrutture critiche o tecnologie emergenti (UNEP, 2021);
- ♣ **Rischio climatico:** riflette la vulnerabilità a eventi estremi (siccità, piogge intense) e la resilienza a scenari idroclimatici incerti (Liu et al., 2022; Haasnoot et al., 2013);
- ♣ **Opportunità ambientali:** valuta il potenziale di mitigazione degli impatti ecologici, recupero di risorse (nutrienti, energia), e riduzione dell'impronta idrica (ISO 14046; Peydayesh & Mezzenga, 2024);
- ♣ **Opportunità economiche:** analizza il ritorno economico netto, i costi evitati, e la bancabilità di ciascuna soluzione (Matthews et al., 2024; Pot, 2023);
- ♣ **Scalabilità territoriale:** stima la replicabilità in contesti normativi, climatici e socioeconomici differenti (Arora & Mishra, 2022; Water Europe, 2024).

Settore / Tecnologia	Rischio operativo	Rischio climatico	Opportunità ambientali	Opportunità economiche	Scalabilità territoriale
Industria manifatturiera (MBR + riuso interno)	Medio	Medio	Alta	Alta	Alta
Agroindustria (fitodepurazione + riuso irriguo)	Basso	Alto	Alta	Media	Media
Settore urbano (NEWater + smart metering)	Alto	Alto	Alta	Alta	Alta
Trattamento fanghi (biogas + struvite)	Medio	Basso	Media	Alta	Media
Infrastrutture verdi (fitofiltri + bacini di infiltrazione)	Basso	Basso	Alta	Media	Alta

Desalinizzazione (osmosi inversa + energia fotovoltaica)	Alto	Medio	Media	Bassa	Media
Recupero calore da reflui (district heating)	Medio	Basso	Alta	Alta	Media

La Figura 6 rappresenta graficamente la matrice sopra esposta tramite una *heatmap* su scala 1–3, in cui i colori evidenziano visivamente le performance relative di ciascuna opzione. Le tonalità verdi indicano condizioni favorevoli (es. alta opportunità o basso rischio), mentre le sfumature rosse evidenziano aree critiche. Questa heatmap utilizza valori descrittivi grezzi, non ponderati, e non produce un punteggio finale sintetico. Serve a esplorare visivamente le relazioni tra profili tecnologici e contesti di applicazione. (OECD, 2022; WR4ER Framework; Pot, 2023).

Figura 6 Heatmap su scala 1–3



La metodologia completa di costruzione, attribuzione dei punteggi e calcolo ponderato è dettagliata nell'Appendice A.

5.5.2 Agricoltura

L'agricoltura rappresenta il principale utilizzatore di risorse idriche a livello globale, con circa il 70% dei prelievi totali destinati all'irrigazione (FAO, 2021). In contesti caratterizzati da crescente scarsità idrica e variabilità climatica, il riuso delle acque reflue trattate (RW) rappresenta una strategia di adattamento efficace, in grado di garantire continuità produttiva e generare rilevanti benefici economici ed ecologici.

Oltre alla funzione irrigua, le RW offrono un valore fertilizzante intrinseco grazie alla presenza di macro e micronutrienti – in particolare azoto (N), fosforo (P) e potassio (K) – che possono sostituire parzialmente o totalmente i fertilizzanti sintetici, riducendone il fabbisogno e i costi associati (Lorenzo López & Expósito, 2025).

VALORE ECONOMICO DIRETTO: FERTILIZZANTI EVITATI

Secondo uno studio condotto in Andalusia (Spagna), l'impiego di RW in fertirrigazione ha permesso una riduzione media del 40% nei costi per la concimazione, pari a circa 150–250 €/ha per stagione, a seconda della coltura, del contenuto di nutrienti nel refluo e della struttura dei prezzi locali dei fertilizzanti (Lorenzo López & Expósito, 2025).

Uno studio IWMI (2022) stima che l'adozione sistemica del RW in orticoltura mediterranea possa generare risparmi annuali superiori a 500 €/ha tra riduzione di input chimici, minor lavorazione del suolo e minori perdite da stress idrico.

SERVIZI ECOSISTEMICI ASSOCIATI ALL'IRRIGAZIONE RESILIENTE

L'utilizzo di RW, se gestito in modo sicuro, consente anche il ripristino di servizi ecosistemici idrici e climatici:

- ♣ Ricarica delle falde: in suoli agricoli ben drenati, l'acqua infiltrata contribuisce alla rigenerazione degli acquiferi, riducendo la pressione sugli attingimenti da falda. In alcune aree della Murgia e dell'Almeria, i progetti pilota di Managed Aquifer Recharge (MAR) hanno evidenziato un contributo netto alla ricarica compreso tra 1.000 e 3.000 m³/ha/anno (WWAP, 2023).
- ♣ Stoccaggio del carbonio (carbon farming): l'uso di RW arricchito di sostanza organica può aumentare il contenuto di carbonio del suolo, migliorandone fertilità e capacità di trattenere acqua. Secondo la European Soil Partnership (2022), un incremento di 0,4% annuo di carbonio organico nel suolo può sequestrare circa 1,2–1,5 tCO₂eq/ha/anno.

MITIGAZIONE CLIMATICA: EMISSIONI EVITATE

L'utilizzo integrato di RW comporta una riduzione sostanziale delle emissioni climalteranti:

- ♣ Minore uso di fertilizzanti azotati → minori emissioni di N₂O (gas serra 298 volte più potente della CO₂).
- ♣ Minore produzione industriale di fertilizzanti → riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di CO₂ fossile.

Uno studio aggregato FAO (2021) stima che, in media, ogni tonnellata di fertilizzante azotato evitata comporti un risparmio di 3–5 tCO₂eq. Rapportando tale dato al risparmio fertilizzante in RW, si ottiene una stima prudente di 0,5–1,2 tCO₂eq evitati per ettaro per stagione irrigua, a seconda della composizione del refluo.

VALUTAZIONE ECONOMICA ESTESA: VANTAGGI SISTEMICI

Integrando risparmi diretti, emissioni evitate e servizi ecosistemici, il valore economico totale del riuso in agricoltura può superare 600–800 €/ha/anno, considerando:

- ♣ 150–250 €: fertilizzanti evitati
- ♣ 100–150 €: valore energetico associato a minori input chimici
- ♣ 200–300 €: stima monetaria di GHG evitati e ricarica acquifera (prezzi ETS e shadow price del carbonio)

Questi dati giustificano politiche di incentivazione economica al riuso agricolo (es. tariffe agevolate, crediti per servizi ecosistemici, pagamenti per carbon farming), già in fase di

implementazione in alcune regioni europee come la Puglia, la Catalogna e la Provenza (Water Europe, 2024).

5.5.3 Industria

Il settore industriale è sempre più esposto a rischi legati alla scarsità e all'instabilità dell'approvvigionamento idrico, che impattano direttamente su operatività, costi, reputazione e valore finanziario. In questo contesto, la gestione efficiente e resiliente dell'acqua non è più solo una questione ambientale, ma un driver chiave di competitività ESG (Environmental, Social, Governance) e di accesso al capitale.

Secondo CDP Water (2023), oltre il 60% delle aziende analizzate a livello globale ha identificato rischi fisici legati all'acqua con potenziali impatti finanziari "significativi" o "gravi". Al tempo stesso, le imprese che hanno implementato sistemi avanzati di monitoraggio, riuso, simbiosi industriale e riduzione dei prelievi idrici hanno riportato un accesso facilitato a capitali a condizioni più vantaggiose (tassi, premi assicurativi, rating).

ESG E GESTIONE IDRICA: UNA CORRELAZIONE CRESCENTE

La dimensione "E" della finanza sostenibile ha visto un'espansione significativa del peso delle metriche idriche nelle valutazioni ESG:

- Le agenzie di rating ESG (es. Sustainalytics, MSCI, S&P Global) includono oggi indicatori di water stress, consumo idrico per unità di valore aggiunto, presenza di target idrici, e strategia di adattamento climatico basata su risorsa acqua.
- Le aziende che pubblicano in modo trasparente il loro Water Footprint e integrano piani di gestione dei rischi idrici nei bilanci annuali tendono ad avere rating più elevati e maggiore fiducia da parte degli investitori istituzionali (UNEP FI, 2022; CDP, 2023).

Esempio: Nestlé, Danone, Unilever e altre aziende ad alta intensità idrica hanno legato le loro performance di riduzione dei consumi e miglioramento della qualità dei reflui a obiettivi finanziari vincolanti, ottenendo un miglioramento del costo medio del capitale (WACC) e della valutazione di rischio idrico nei mercati emergenti.

TECNOLOGIE CRITICHE: SEMICONDUTTORI E IDROGENO VERDE

Particolare attenzione merita la crescente pressione idrica esercitata da settori tecnologici avanzati come la produzione di semiconduttori e l'idrogeno verde. Pur con volumi d'uso assoluti inferiori a quelli della manifattura tradizionale, questi comparti presentano una sensibilità elevatissima al rischio idrico e una valenza strategica sistemica.

La produzione di semiconduttori richiede tra 2.000 e 7.000 litri di acqua ultrapura (UPW) per chip, con impianti come quelli di TSMC e Intel che consumano oltre 150.000 m³/giorno, equivalenti al fabbisogno idrico di una città di medie dimensioni (ESIA, 2023; Uptime Institute, 2022). La minima contaminazione idrica può compromettere intere linee produttive. Per questo, i produttori leader stanno adottando cicli chiusi con MBR e osmosi inversa, riducendo il fabbisogno netto fino al 75% e integrando sistemi di digital twin per la gestione predittiva (Intel, 2022; Water Europe, 2024).

Nel settore dell'idrogeno verde, la produzione tramite elettrolisi comporta un consumo di 9-12 litri di acqua deionizzata per kg di H₂. Secondo IEA (2022), gli obiettivi europei al 2050 comporterebbero un fabbisogno annuale di oltre 21 miliardi di m³, pari al 25% del consumo urbano complessivo dell'UE. Le strategie più avanzate prevedono l'utilizzo di reflui trattati o acqua marina desalinizzata, ma pongono sfide rilevanti in termini di qualità e costi energetici (Hydrogen Europe, 2023).

Entrambi i settori si collocano tra quelli con il più alto valore marginale per m³ d'acqua, e una vulnerabilità estrema alle interruzioni, il che ne fa priorità assolute per le politiche industriali idrosensibili e per la pianificazione di infrastrutture resilienti.

Il rischio idrico in questi settori non è solo ambientale, ma direttamente finanziario e geopolitico. Brevi interruzioni idriche hanno già provocato:

- sospensioni di produzione (TSMC, 2021, Taiwan);
- rialzi dei prezzi globali di chip;
- interruzioni nelle catene del valore di automotive, medicale, ICT.

Per questo, una resilienza idrica preventiva è considerata da analisti ESG e istituzioni finanziarie un requisito abilitante per la sovranità tecnologica e industriale europea.

Sono necessarie:

- ♣ **politiche industriali idrosensibili** (pianificazione preventiva degli approvvigionamenti);
- ♣ **finanziamenti verdi condizionati alla gestione idrica sostenibile** (es. Green Bonds, SLL);
- ♣ **certificazioni e disclosure obbligatorie** su footprint idrico e piani di resilienza (es. Water Footprint, ISO 46001, CDP Water Disclosure).

STRUMENTI FINANZIARI CONNESSI ALLA GESTIONE IDRICA

Negli ultimi anni, si è assistito a una rapida crescita di strumenti finanziari legati alla performance idrica, spesso sviluppati nell'ambito della finanza sostenibile e climatica:

- ♣ **Green Bonds:** titoli di debito finalizzati al finanziamento di progetti ambientali, tra cui infrastrutture per il trattamento acque, riuso, efficienza e resilienza idrica. Nel 2022, oltre 40 miliardi USD di green bond sono stati emessi per progetti idrici, con una domanda superiore all'offerta del 25% (Climate Bonds Initiative, 2023).
- ♣ **Sustainability-linked loans (SLL) e water-linked loans:** strumenti finanziari i cui tassi di interesse sono indicizzati al raggiungimento di obiettivi idrici misurabili (es. riduzione dei m³ consumati, percentuale di riuso, certificazione ISO 46001). Le imprese con elevati standard idrici ottengono tassi agevolati o condizioni di rimborso più flessibili (UNEP FI, 2022).
- ♣ **Water Footprint Certification e Blue Rating:** schemi volontari che attestano le buone pratiche idriche di un'impresa o di una filiera, migliorandone la bancabilità e l'accesso ai fondi europei o multilaterali (Water Footprint Network, 2023).

Caso studio: Il gruppo L'Oréal ha ottenuto nel 2021 un sustainability-linked loan da €3 miliardi, con un tasso legato, tra gli altri, a target idrici di riduzione dei prelievi per unità di produzione. Il mancato raggiungimento dei target comporta un sovrapprezzo dell'1% annuo sul tasso d'interesse (Bloomberg, 2022).

5.5.4 Città

Nel contesto urbano contemporaneo, la resilienza idrica non riguarda solo la continuità tecnica dei servizi, ma è determinante strutturale della salute pubblica, dell'equità sociale e della

coesione territoriale. Le città sono infatti altamente vulnerabili agli shock idrici, ma anche straordinariamente capaci di innovare in materia di gestione sostenibile e integrata dell'acqua.

ACCESSIBILITÀ E GIUSTIZIA IDRICA

La giustizia idrica (water justice) è il principio secondo cui l'accesso equo, sicuro e sostenibile all'acqua costituisce un diritto umano fondamentale e una condizione essenziale per la partecipazione piena alla vita urbana. Tuttavia, nelle città europee e globali persistono disegualianze nell'accesso all'acqua potabile e ai servizi igienico-sanitari, spesso concentrate nei quartieri periferici o a basso reddito (UN-Habitat, 2022).

Secondo dati della European Environment Agency (2023), le famiglie a basso reddito nei contesti urbani spendono in media fino al 6% del proprio reddito disponibile per servizi idrici, contro il 2–3% delle fasce di reddito superiori. Inoltre, le interruzioni idriche, anche brevi, colpiscono in modo sproporzionato le comunità più vulnerabili, con impatti sanitari ed economici amplificati.

Esempio: A Marsiglia, uno studio dell'OCDE (2021) ha dimostrato che l'integrazione di tariffe sociali e investimenti in reti secondarie in aree marginali ha migliorato l'accessibilità e ridotto del 30% i casi di morosità idrica, rafforzando la coesione sociale urbana.

SALUTE PUBBLICA E COSTI EVITATI

Una gestione urbana integrata delle acque reflue, del drenaggio urbano e delle acque meteoriche consente di prevenire molteplici patologie idro-trasmesse, migliorare le condizioni igienico-sanitarie e ridurre i costi sanitari pubblici.

Secondo l'OMS (2022), ogni euro investito in infrastrutture idriche resilienti e sanitarie in ambito urbano genera in media benefici sanitari compresi tra 3 e 7 euro, attraverso la riduzione di malattie gastrointestinali, infezioni della pelle, assenteismo scolastico e costi ospedalieri. Le aree urbane con sistemi di trattamento decentralizzato e fognature sicure presentano un'incidenza inferiore del 40–60% di malattie idriche rispetto ai quartieri serviti da reti degradate o intermittenti.

Caso studio: A Lima, in Perù, l'introduzione di sistemi di trattamento fitodepurativo e riuso per l'irrigazione urbana ha permesso di risparmiare circa 2 milioni USD/anno in costi sanitari evitati, migliorando al contempo la qualità dell'ambiente urbano e la sicurezza alimentare locale (World Bank, 2023).

RESILIENZA URBANA INTEGRATA E MULTISETTORIALE

Le città sono ambienti complessi dove la resilienza idrica interagisce con molteplici sistemi infrastrutturali: energia, mobilità, sicurezza alimentare, protezione civile. L'acqua agisce come "fattore di coesione sistemica", abilitando una pianificazione urbana realmente integrata e sostenibile.

Strumenti come il City Water Resilience Framework (CWRF), sviluppato da Arup e Rockefeller Foundation (2019), permettono di valutare la resilienza idrica urbana in modo trasversale, includendo:

- ♣ la capacità delle infrastrutture di resistere agli shock climatici,
- ♣ la disponibilità di sistemi decentralizzati di emergenza,
- ♣ la governance multilivello dell'acqua,
- ♣ il coinvolgimento delle comunità vulnerabili nella pianificazione urbana.

Città come Singapore, Città del Capo e Copenaghen hanno dimostrato come investimenti in nature-based solutions, riuso urbano e digitalizzazione idrica migliorino non solo l'efficienza tecnica, ma anche la capacità di adattamento collettivo, rafforzando la resilienza economica e sociale (Pot, 2023; OECD, 2022).

5.5.5 Focus UE: settori strategici emergenti

Il report 2024 di Water Europe identifica una serie di settori industriali strategici che, per prosperare, richiedono accesso costante e sicuro all'acqua. Tra questi:

- ♣ Produzione di semiconduttori, dove il consumo idrico può superare i 7.000 litri per chip.
- ♣ Data center e cloud computing, con fabbisogni crescenti per raffreddamento sostenibile.
- ♣ Idrogeno verde, la cui produzione tramite elettrolisi richiede acqua ultrapura.

Questi settori ad alta intensità tecnologica sono anche quelli che attraggono maggiori investimenti pubblici e privati nel quadro del Green Deal europeo, della strategia REPowerEU e del Net-Zero Industry Act. Garantire la resilienza idrica in tali ambiti diventa quindi condizione abilitante per la sovranità industriale europea (Water Europe, 2024).

5.6 RITORNI SETTORIALI E PRIORITÀ ECONOMICHE INTEGRATE

Per massimizzare l'efficacia e l'equità degli investimenti in resilienza idrica, è essenziale adottare un approccio differenziato per comparto, che consideri i costi marginali di efficienza, i ritorni economici per metro cubo e i danni evitati. La resilienza, infatti, non ha un valore uniforme: produce effetti altamente variabili a seconda della vulnerabilità settoriale e del valore aggiunto associato alla risorsa idrica.

La tabella seguente sintetizza i principali parametri economici comparabili, offrendo una guida orientativa alle priorità di intervento e agli strumenti finanziari più efficaci:

Tabella 6 Fonte dati: Water Europe (2024), OECD (2022), EIB (2023), World Bank (2023), Pot (2023), Matthews et al. (2024).

Settore	Valore Aggiunto Lordo per m ³ (€)	Costo Marginale Efficienza (€ per m ³ risparmiato)	Rischio di Interruzione	Danni Economici Evitati (€ per m ³ non fornito)
Agricoltura	1–3	0,20–0,50	Alto (clima)	2–5
Industria Manifatturiera	20–40	0,50–1,20	Medio (supply chain)	30–80
Città / Servizi Urbani	30–70	1,00–2,00	Medio-Alto (sanità, igiene)	50–150
Tecnologie Avanzate (es. semiconduttori)	100–500+	2,50–5,00	Molto Alto (produzione ad alta purezza)	500–2000

Questi dati evidenziano che, pur con costi di efficienza crescenti, i settori tecnologici ad alta intensità idrica (es. semiconduttori, data center, idrogeno verde) generano i maggiori ritorni economici e rischiano perdite critiche in caso di interruzione, giustificando politiche dedicate e



strumenti finanziari su misura. All'opposto, comparti come l'agricoltura, pur economicamente meno redditizi per m³, presentano una rilevanza strategica in termini di sicurezza alimentare, co-benefici ambientali e rigenerazione ecosistemica.

La valutazione economica integrata della resilienza idrica – basata su valore aggiunto, rischio sistemico e danni evitati – costituisce pertanto un criterio guida per le future strategie di investimento, pianificazione e regolazione.

Essa consente di allineare efficacemente priorità settoriali, obiettivi ambientali e strumenti economici, trasformando la resilienza in un asset collettivo ad alto rendimento sistemico.

5.7 TABELLE E COMPARAZIONI

5.7.1 Tabella: ritorni Economici Integrati per Settore

Settore	Valore Aggiunto per m ³ (€)	Costo Marginale di Efficienza (€)	Danni Evitati (€ per m ³)	Benefici Aggiuntivi
Agricoltura	1–3	0,20–0,50	2–5	Fertirrigazione, sequestro carbonio, ricarica falde
Industria	20–40	0,50–1,20	30–80	ESG, accesso a finanza sostenibile
Città	30–70	1,00–2,00	50–150	Salute pubblica, giustizia idrica, coesione urbana
Settori Tech	100–500+	2,50–5,00	500–2000	Sovranità industriale, continuità produttiva

Fonti: Water Europe, BEI, FAO, IWMI, OECD, World Bank.

5.7.2 Tabella: Strumenti Economici e Finanziari per la Resilienza Idrica

Strumento	Funzione Principale	Ambito di Applicazione	Esempi / Fonti
Tariffazione progressiva	Ridurre sprechi, incentivare efficienza	Domestico, Agricolo, Industriale	OECD (2022), García-Valiñas et al.
Crediti fiscali / incentivi	Stimolare investimenti privati in resilienza	Aziende idriche, PMI, utility locali	EIB (2023), EU Taxonomy (2021)
Fondi UE (PNRR, Green Deal)	Cofinanziare infrastrutture strategiche	Pubblico e PPP	European Commission (2022)
Blended Finance	Mobilizzare capitali privati con garanzie pubbliche	LMIC, grandi progetti	WEF (2023), World Bank (2023)
Sustainability-linked Loans	Premiare performance ESG e idrica	Imprese, multinazionali	UNEP FI (2022), CDP (2023)

5.7.3 Tabella: Strumenti di Governance e Misurazione della Resilienza

Strumento / Indicatore	Descrizione	Applicazione	Fonti / Paesi pilota
SEEA – Contabilità ambientale	Integra valore dell'acqua nei conti pubblici	Pianificazione economica pubblica	UN 2021, Paesi Bassi, Germania
Net Water Value (NWW)	Valore netto generato per m ³ , al netto dei costi ambientali	Valutazione progetti	Matthews et al. (2024)
Water Circular Economy Index	Misura circolarità del sistema idrico (riuso, perdite, qualità)	Monitoraggio settoriale	Peydayesh & Mezzenga (2024)

Resilience KPIs	Indici su shock assorbibili, flessibilità, adattamento	Governance e pianificazione	Pot (2023), Haasnoot et al. (2021)
Adaptive Pathways & RDM	Pianificazione scenariale flessibile a lungo termine	Adattamento climatico	Delta Program NL, UK Water Strategy

5.7.4 Tabella: Indicatori di equità e inclusione sociale nella governance idrica

Categoria	Indicatore	Descrizione	Fonte/Standard di riferimento
Accesso universale	Percentuale di popolazione con accesso a servizi idrici sicuri	Misura la quota di popolazione servita da acqua potabile conforme agli standard di sicurezza	SDG 6.1; WHO/UNICEF JMP
Qualità del servizio	Continuità media del servizio (ore/giorno)	Misura la continuità nella fornitura d'acqua, discriminando interruzioni regolari o sistemiche	ISO 24510; SDG 6.1
Accessibilità economica	Incidenza della tariffa idrica sul reddito delle famiglie vulnerabili	Percentuale del reddito speso per servizi idrici da famiglie nei primi due decili di reddito	OECD affordability metrics; GLAAS
Equità territoriale	Disparità nell'accesso tra aree urbane e rurali	Rapporto tra tasso di copertura urbana e rurale (o altre disaggregazioni geografiche)	SDG 6.1 disaggregato
Inclusione di genere	Percentuale di donne in ruoli decisionali nella governance idrica	Rappresentanza femminile nei consigli di gestione, autorità di bacino, comitati locali	SDG 5; 6.B; Gender Water Alliance
Partecipazione comunitaria	Esistenza di meccanismi di consultazione pubblica	Presenza e frequenza di processi di consultazione/formalizzazione del consenso	SDG 6.B; Aarhus Convention
Protezione dei gruppi vulnerabili	Accesso per popolazioni informali, migranti, comunità rurali isolate	Disponibilità di servizi idrici accessibili in insediamenti marginalizzati o senza titolo formale	UN-Habitat; GLAAS
Giustizia ambientale	Esposizione a fonti contaminate o rischio idrico	Incidenza di inquinamento idrico nei pressi di comunità a basso reddito o minoranze etniche	WHO; EPA EJScreen (USA)
Diritto all'acqua	Riconoscimento giuridico e operativo del diritto umano all'acqua	Presenza di norme e meccanismi legali che garantiscano minimi vitali gratuiti o accessibili	Risoluzione ONU 64/292 (2010); CESCR General Comment No. 15

5.8 PUNTI PRINCIPALI

Oltre l'efficienza, la resilienza

La sola efficienza idrica non è più sufficiente; la resilienza idrica trasformativa rappresenta oggi un asset strategico per adattarsi ai cambiamenti climatici, proteggere la stabilità economica e garantire la sicurezza sistemica (Matthews et al., 2024).

Il valore economico della resilienza

Investimenti in resilienza idrica possono generare ritorni netti stimati in 100–120 miliardi €/anno in Europa entro il 2030, riducendo perdite sistemiche, vulnerabilità macroeconomiche e costi di emergenza (Water Europe, 2024; World Bank, 2023).

Riuso idrico e benefici integrati

Il riuso delle acque reflue trattate riduce i costi di approvvigionamento, consente il recupero di nutrienti, valorizza i fanghi a fini energetici e genera co-benefici ambientali monetizzabili (FAO, 2021; IWMI, 2022; EEA, 2023).

Strumenti economici abilitanti

Tariffe progressive, incentivi fiscali, fondi UE e blended finance sono leve fondamentali per rendere scalabili soluzioni resilienti; i modelli PPP e il caso australiano di "water banking" offrono esempi replicabili (OECD, 2022; Matthews et al., 2024).

Governance e contabilità strategica

La resilienza richiede innovazione istituzionale, tramite contabilità SEEA, indicatori avanzati (NWV, WCEI, KPIs) e approcci decisionali robusti basati su scenari incerti (Vardon et al., 2025; Pot, 2023; Haasnoot et al., 2021).

Priorità settoriali e ritorni differenziati

I settori ad alta intensità idrica come tech e industria offrono i più alti ritorni economici per m³, ma comparti come agricoltura e città garantiscono co-benefici ambientali, sociali e climatici fondamentali per la coesione (CDP, 2023; UNEP FI, 2022; WHO, 2022).

6 CONCLUSIONI

6.1 SINTESI DELLE EVIDENZE PER CIASCUN SETTORE ANALIZZATO

L'analisi condotta nei capitoli precedenti ha evidenziato come la scarsità idrica stia emergendo come un fattore critico di vulnerabilità e trasformazione trasversale ai principali comparti produttivi e territoriali. Ogni settore esaminato – agricoltura, industria manifatturiera, trattamento delle acque reflue – mostra peculiarità specifiche in termini di consumi, rischi e opportunità, ma anche elementi comuni, quali la necessità di efficienza, innovazione e integrazione sistemica.

SETTORE AGROALIMENTARE

L'agricoltura rappresenta il principale consumatore di risorse idriche a livello globale, con prelievi pari a circa il 70% del totale disponibile. Questa dipendenza rende il comparto estremamente vulnerabile alla riduzione della disponibilità idrica e alla crescente variabilità climatica (FAO, 2021; Liu et al., 2022). Le soluzioni emergenti includono tecnologie irrigue ad alta efficienza (goccia, sprinkler), sistemi di monitoraggio e controllo digitale per l'irrigazione di precisione, e pratiche di riuso delle acque reflue integrate al recupero di nutrienti. In contesti favorevoli, queste pratiche possono ridurre i fabbisogni idrici fino al 50%, contribuendo alla resilienza agroecologica e alla sicurezza alimentare (Rastogi et al., 2024).

INDUSTRIE MANIFATTURIERE E CHIMICHE

I processi industriali richiedono ingenti quantità d'acqua per operazioni di raffreddamento, lavaggio, produzione e trasporto, generando al contempo scarichi complessi e di difficile trattamento. La scarsità idrica è oggi considerata un rischio operativo concreto, con impatti sulla continuità produttiva e sull'accesso a risorse vitali (Karki & Rao, 2023). Tra le risposte più efficaci figurano l'implementazione di sistemi di riciclo interno (*closed-loop water systems*), l'adozione di tecnologie digitali per il monitoraggio in tempo reale (IoT, SCADA), e la rendicontazione ambientale attraverso standard volontari (ISO 14046, ESG reporting). Studi recenti mostrano che l'adozione sistemica di tali pratiche potrebbe portare a riduzioni dei prelievi idrici fino al 60% in comparti industriali ad alta intensità (Karki & Rao, 2023).

TRATTAMENTO DELLE ACQUE REFLUE E DEI FANGHI

Gli impianti di trattamento tradizionali sono spesso progettati secondo un paradigma lineare, incentrato sulla sola depurazione e sullo scarico a fine ciclo. Questo approccio comporta un elevato consumo energetico e una scarsa valorizzazione delle risorse contenute nei reflui. I modelli emergenti puntano alla multifunzionalità: recupero di acqua trattata, produzione di biogas dai fanghi, estrazione di nutrienti come la struvite o l'ammoniaca. Tecnologie avanzate come i processi ossidativi avanzati (AOP), le membrane a osmosi inversa, e la separazione selettiva permettono una maggiore efficienza nel recupero e una migliore qualità dell'effluente. Gli impianti concepiti secondo logiche circolari possono oggi coprire tra il 50% e l'80% del loro fabbisogno energetico, generando sottoprodotti a valore aggiunto (Taron et al., 2023).

SISTEMI URBANI E INFRASTRUTTURE IDRICHE

Le reti idriche urbane, spesso obsolete e frammentate, presentano elevati tassi di perdita – fino al 40% in alcuni contesti – e sono sottoposte a una crescente pressione dovuta a urbanizzazione, cambiamenti climatici e competizione tra usi. La digitalizzazione delle reti tramite tecnologie *smart metering* e *digital twin* consente una gestione predittiva ed efficiente. Parallelamente, si diffondono soluzioni decentralizzate (es. moduli containerizzati, fitodepurazione urbana) e *nature-based* (giardini pluviali, bacini multifunzionali) capaci di aumentare la resilienza e ridurre

il carico sui sistemi centralizzati. Le città che investono in modelli intelligenti possono ridurre del 30–50% le perdite idriche, migliorando l'adattamento climatico e la sicurezza idrica (Delgado et al., 2024).

La gestione idrica efficiente e resiliente è un driver strategico per la sostenibilità multisettoriale. Le soluzioni tecniche esistono e sono collaudate; la sfida principale resta la loro adozione su larga scala attraverso politiche abilitanti, strumenti economici adeguati e una cultura condivisa del valore dell'acqua.

6.1.1 Modelli di governance e strumenti economici per l'efficienza idrica

Il successo delle strategie per l'efficienza idrica dipende in larga parte dalla presenza di quadri di governance che combinino regolazione intelligente, strumenti economici e meccanismi di adattamento.

A livello internazionale, si evidenziano tre approcci esemplari:

- ♣ In Australia, il Murray-Darling Basin rappresenta uno dei più avanzati sistemi di allocazione regolata e di mercato, con un sistema di *cap-and-trade* che ha incentivato l'adozione di tecnologie irrigue efficienti mantenendo la redditività agricola anche in contesti di scarsità (Grafton et al., 2011).
- ♣ In Europa, la Direttiva Quadro Acque (WFD) ha promosso un approccio integrato basato su pianificazione di bacino, cost-recovery e strumenti economici (tariffe, canoni). Tuttavia, l'applicazione resta disomogenea tra Stati membri, richiedendo maggiore trasparenza e accountability (European Commission, 2021).
- ♣ In contesti emergenti, stanno emergendo modelli ibridi che uniscono regolazione adattiva, tecnologie digitali e gestione comunitaria. Casi in Cile, India e Sudafrica mostrano come i mercati locali di diritti idrici e le piattaforme di contabilità pubblica possano rafforzare l'efficienza anche in ambienti istituzionali fragili (Leijnse et al., 2024; Wada et al., 2010).

L'adozione di strumenti di mercato ben disegnati (es. scambi di diritti d'uso, incentivi fiscali, tariffe progressivi) e il rafforzamento delle istituzioni multilivello si confermano fattori cruciali per guidare la transizione verso sistemi idrici sostenibili, trasparenti e resilienti.

6.2 RACCOMANDAZIONI OPERATIVE PER IMPRESE, ENTI REGOLATORI E POLICYMAKER

La transizione verso un uso efficiente, circolare e resiliente dell'acqua richiede azioni concrete da parte di tutti gli attori coinvolti nella filiera idrica. Le seguenti raccomandazioni sono strutturate per target e si fondano sulle evidenze emerse dai casi studio, dall'analisi settoriale e dai quadri normativi internazionali. Esse mirano a tradurre in pratica il paradigma della sostenibilità idrica, con azioni coordinate su scala aziendale, territoriale e istituzionale.

PER LE IMPRESE E I GESTORI INDUSTRIALI

1. **Misurare e gestire l'efficienza idrica come KPI strategico.** Integrare indicatori idrici (es. m³/unità, % riutilizzo, footprint idrico) nei sistemi di controllo di gestione e nei bilanci ESG, con obiettivi annuali misurabili.
2. **Adottare tecnologie di trattamento e recupero avanzato.** Investire in impianti MBR, osmosi inversa, AOP e separazione selettiva per aumentare la percentuale di riciclo interno e recuperare energia e nutrienti da reflui.

3. **Digitalizzare i sistemi idrici.** Implementare *smart metering*, sensoristica IoT e piattaforme SCADA per ottimizzare l'uso delle risorse, prevenire perdite e ridurre i costi operativi.
4. **Promuovere la simbiosi industriale e la gestione consortile.** Attivare partenariati per condividere infrastrutture, scarichi e risorse recuperate in distretti industriali, aumentando l'efficienza complessiva e l'economia di scala.
5. **Investire in formazione e cultura interna sull'acqua.** Sensibilizzare il personale operativo e strategico sull'importanza dell'efficienza idrica, anche attraverso programmi di sostenibilità, training tecnici e incentivi interni.

PER ENTI REGOLATORI E AUTORITÀ IDRICHE

1. **Stabilire standard tecnici e limiti normativi chiari per il riuso.** Introdurre norme di qualità differenziate per usi agricoli, industriali, civili e ambientali, come previsto dal Regolamento UE 2020/741.
2. **Semplificare le procedure autorizzative per il trattamento decentralizzato.** Facilitare l'adozione di impianti locali e modulari (es. containerizzati, NBS) tramite linee guida, sportelli tecnici e incentivi alla progettazione.
3. **Integrare strumenti economici per promuovere l'efficienza.** Adottare meccanismi di tariffazione progressiva, sgravi fiscali per tecnologie idriche efficienti, crediti d'imposta e schemi *pay-for-performance*.
4. **Rafforzare il monitoraggio e la trasparenza nei consumi idrici.** Richiedere report idrici annuali agli impianti industriali e municipali, pubblicare dati territoriali su stress idrico, qualità degli scarichi e riusi attivati.
5. **Coordinare a livello di bacino e distretto idrico.** Allineare piani idrici, ambientali, industriali e agricoli, con strumenti come la contabilità idrica, il *water stewardship* e le piattaforme multistakeholder.

PER POLICYMAKER E ISTITUZIONI CENTRALI

1. **Includere l'acqua come asset prioritario nella transizione ecologica.** Integrare la gestione idrica nelle politiche industriali, agricole e urbane in coerenza con il Green Deal europeo, l'Agenda 2030 e i fondi del PNRR.
2. **Finanziare la diffusione delle infrastrutture circolari.** Supportare economicamente progetti pilota, distretti idrici intelligenti, *digital twin* urbani e modelli a ciclo chiuso, tramite fondi strutturali e partenariati.
3. **Promuovere la ricerca e l'innovazione applicata.** Investire in centri di eccellenza per il trattamento avanzato, la sensoristica, la gestione idrica predittiva e il recupero di risorse da reflui.
4. **Lavorare sulla cultura del riuso e sulla giustizia idrica.** Attivare campagne pubbliche per promuovere l'accettazione del riuso, rafforzare la consapevolezza del valore dell'acqua e sostenere l'equità nell'accesso.

5. **Sostenere la standardizzazione e la convergenza normativa internazionale.**
Collaborare a livello europeo e globale per armonizzare definizioni, indicatori e certificazioni (es. ISO, GRI, CDP Water, AWS), facilitando la comparabilità e l'accesso ai mercati sostenibili.

6.2.1 Finanza sostenibile e metriche ESG come leve per l'efficienza idrica

Nel contesto attuale, caratterizzato dalla crescente pressione degli investitori sui criteri ESG, l'ottimizzazione dell'uso dell'acqua sta assumendo un ruolo centrale nella valutazione della sostenibilità aziendale.

L'inclusione di metriche idriche nei framework ESG – come l'indicatore GRI 303, la certificazione ISO 14046 o la disclosure CDP Water – non rappresenta solo un obbligo reputazionale, ma una leva di accesso alla finanza sostenibile (GRI, 2018; ISO, 2014; CDP, 2023). Strumenti come i *green bond*, i *sustainability-linked bond* e i *SDG-linked loans* collegano esplicitamente la concessione di capitali alla performance ambientale misurabile, inclusa l'efficienza idrica. Ad esempio, un'azienda che dimostri la riduzione del prelievo idrico per unità di prodotto, o l'aumento della percentuale di riuso, può ottenere condizioni di finanziamento più favorevoli (OECD, 2020; *European Commission*, 2023). Analogamente, i crediti d'imposta per investimenti in tecnologie idriche efficienti – come sistemi a membrana, SCADA e trattamenti per il riuso – costituiscono un potente incentivo alla transizione green, soprattutto per le PMI (UNEP FI, 2021).

WATER FINANCE E STRUMENTI INNOVATIVI DI INVESTIMENTO

Negli ultimi anni, il ruolo della finanza sostenibile si è ulteriormente consolidato grazie all'introduzione della Taxonomy europea, che stabilisce criteri tecnici per identificare le attività economiche compatibili con gli obiettivi ambientali dell'Unione Europea, tra cui la gestione sostenibile delle risorse idriche (European Commission, 2020).

In questo quadro regolatorio, le metriche idriche – come il *reuse ratio*, il *leakage rate*, o il volume di acqua risparmiata per unità di output – stanno diventando elementi chiave nella definizione della bancabilità dei progetti e nell'attribuzione del merito creditizio.

I *sustainability-linked bonds* e i *green loans* vincolano esplicitamente il costo del capitale al raggiungimento di obiettivi misurabili, come la riduzione dei prelievi idrici o il miglioramento dell'efficienza nei processi. Ciò consente alle imprese virtuose di accedere a finanziamenti a condizioni premianti, e rappresenta un incentivo concreto alla trasformazione dei modelli industriali. Anche le istituzioni pubbliche contribuiscono, attraverso incentivi fiscali e linee di credito agevolate, a stimolare investimenti in infrastrutture idriche resilienti e tecnologie a basso impatto.

Per massimizzare l'impatto di questi strumenti, è cruciale che le imprese adottino sistemi digitali di monitoraggio e reporting in tempo reale, e che le autorità regolatorie includano l'acqua tra i criteri centrali della *Taxonomy* e dei benchmark ESG. In tal modo, l'efficienza idrica non è più solo una variabile tecnica o ambientale, ma si configura come un vero e proprio asset strategico per l'accesso al capitale, con impatti diretti sulla resilienza finanziaria e sulla competitività industriale (World Bank, 2022).

Oltre agli indicatori ambientali e di performance tecnica, un framework ESG completo e orientato alla resilienza idrica deve includere anche metriche sociali, in grado di misurare l'equità, la giustizia distributiva e il diritto all'acqua.

L'inclusione di tali dimensioni è fondamentale per garantire che le strategie di efficientamento e circolarità non producano effetti regressivi, ma al contrario, contribuiscano a ridurre le disuguaglianze nell'accesso all'acqua e ai servizi igienico-sanitari.

Tra le metriche sociali di rilievo si segnalano:

- ♣ **Accessibilità economica:** incidenza della tariffa sul reddito delle famiglie vulnerabili;
- ♣ **Copertura dei servizi:** percentuale di popolazione servita in aree rurali, informali o marginali;
- ♣ **Meccanismi partecipativi:** presenza di consultazioni pubbliche o processi deliberativi comunitari;
- ♣ **Inclusione di genere:** rappresentanza femminile nella governance dei servizi idrici;
- ♣ **Tutela delle categorie a rischio:** attenzione a bambini, disabili, popolazioni migranti o indigene.

Questi indicatori sono coerenti con i target SDG 6.1 (accesso equo e sicuro all'acqua potabile) e 6.2 (servizi igienico-sanitari adeguati e dignitosi per tutti), oltre a contribuire al monitoraggio del principio "leave no one behind" dell'Agenda 2030 (United Nations, 2015).

L'integrazione sistematica di questi aspetti nei bilanci ESG aziendali e nei criteri di allocazione degli investimenti sostenibili (green bond, impact finance, blended finance) permette non solo una migliore accountability sociale, ma anche un rafforzamento del consenso e della legittimità nelle strategie di trasformazione dei servizi idrici.

Note operative: Strumenti pratici per integrare l'equità nei framework ESG e di governance idrica

Si suggerisce di integrare gli indicatori sociali menzionati nei quadri di monitoraggio multi-obiettivo delle politiche idriche, in sinergia con strumenti già esistenti come:

- GRI 303 (Disclosure on Water and Effluents),
- ISO 14046 (Water Footprint),
- SEEA-Water (System of Environmental-Economic Accounting for Water).
- Tali indicatori possono essere utilizzati:
 - ex ante, per valutare l'impatto sociale di nuove strutture tariffarie, progetti infrastrutturali o riforme normative;
 - ex post, per misurare gli effetti reali in termini di accessibilità ai servizi, continuità del servizio o riduzione delle disparità territoriali.

L'integrazione nei bilanci ESG aziendali e nei piani strategici degli enti regolatori rafforza il principio di "leave no one behind" (Agenda 2030), rendendo misurabile l'impegno per l'equità e la resilienza sociale nel settore idrico.

6.3 EVIDENZE DAI CASI STUDIO: LEZIONI OPERATIVE PER LA TRANSIZIONE

L'analisi dei casi studio presentati nella sezione 4.4 conferma che la transizione verso un uso efficiente e circolare della risorsa idrica non è solo auspicabile, ma tecnicamente praticabile e già in corso in contesti eterogenei. Queste esperienze offrono indicazioni preziose per orientare

interventi futuri, fornendo evidenze empiriche sui fattori abilitanti, le barriere ricorrenti e i risultati misurabili ottenuti.

EFFICIENZA CONSORTILE E DISTRETTUALE (ITALIA)

I casi dei distretti di Prato e Modena dimostrano la validità di modelli consortili per il riuso industriale e agricolo delle acque reflue. L'integrazione di MBR, ozonizzazione e recupero nutrienti ha permesso di superare limiti normativi e frammentazioni gestionali, aumentando la competitività e riducendo i prelievi da falda. La dimensione collettiva dell'investimento e la gestione condivisa emergono come leve chiave per l'efficienza di scala e la resilienza territoriale.

RIUSO POTABILE INDIRECTO AD ALTA INTENSITÀ TECNOLOGICA (SINGAPORE, DURBAN)

Il programma NEWater a Singapore e il sistema di riuso a Durban mostrano come sia possibile garantire elevati standard di qualità e sicurezza nell'uso potabile indiretto, anche in ambienti infrastrutturalmente fragili.

L'efficacia di questi modelli risiede nella combinazione tra trattamento avanzato (MBR, osmosi inversa, UV), governance multilivello e comunicazione pubblica trasparente, elementi che contribuiscono a superare le barriere di accettazione sociale.

SIMBIOSI INDUSTRIALE E RECUPERO MULTI-RISORSA (PAESI BASSI)

L'esperienza di Waternet ad Amsterdam evidenzia il potenziale di sinergie tra settore idrico, energetico e agricolo: il recupero del calore dai reflui, la produzione di biogas e la valorizzazione dei fanghi in struvite mostrano come l'infrastruttura idrica possa diventare un nodo attivo della bioeconomia urbana. Il controllo digitale tramite sistemi di digital twin rappresenta una frontiera abilitante per l'ottimizzazione dinamica.

APPROCCI DECENTRALIZZATI E ADATTIVI (CITTÀ DEL MESSICO, TAMIL NADU, LIMA)

In contesti a risorse limitate, i modelli decentralizzati mostrano grande potenzialità per aumentare la resilienza locale e ridurre la pressione sulle reti centralizzate. I moduli containerizzati per il trattamento locale, le fitodepurazioni comunitarie e le infrastrutture verdi multifunzionali dimostrano efficacia sia tecnica sia sociale. In particolare, il coinvolgimento attivo delle comunità nella gestione e la modularità degli interventi risultano determinanti per la sostenibilità a lungo termine.

Sud-Est anatolico

Un'ulteriore lezione operativa proviene dall'esperienza turca nel Sud-Est anatolico, dove le grandi infrastrutture idriche del progetto GAP hanno dato origine a un esempio avanzato di *regionalismo idrico funzionale*. In questo contesto, l'acqua non è solo una risorsa fisica, ma un elemento che organizza spazio, economia e governance in chiave sistemica. Le infrastrutture idriche – dighe, canali, impianti di pompaggio – si configurano come dispositivi regionali di integrazione territoriale, con effetti significativi su produttività agricola, occupazione e coesione istituzionale. Questo tipo di approccio suggerisce che, anche in contesti europei o mediterranei, si possano sviluppare *poli regionali dell'acqua* capaci di attivare processi di innovazione istituzionale, pianificazione integrata e resilienza scalare (Sayan et al., 2025).

PROGRAMMI MULTILATERALI E REPLICABILITÀ (WICER, WORLD BANK)

L'approccio sistemico promosso dal programma WICER, che combina tecnologie appropriate, partecipazione locale e strumenti finanziari su misura, evidenzia la necessità di adattare le soluzioni alle specificità ambientali, istituzionali e socioeconomiche dei territori. La replicabilità

richiede non tanto l'universalità della tecnologia, quanto la trasferibilità del modello di governance.

SINTESI OPERATIVA

Dall'analisi comparata emergono cinque leve strategiche comuni a esperienze di successo:

- ◆ Integrazione tecnologica tra trattamento, recupero e digitalizzazione.
- ◆ Gestione consortile o multilivello, capace di superare frammentazioni.
- ◆ Coinvolgimento attivo delle comunità, soprattutto in ambiti decentralizzati.
- ◆ Sostenibilità economica e scalabilità, basata su partenariati e strumenti flessibili.
- ◆ Governance adattiva, in grado di raccordare innovazione e accettazione sociale.

Questi elementi forniscono un riferimento concreto per lo sviluppo di politiche industriali idriche efficaci, ancorate a casi reali e capaci di guidare una transizione sistemica fondata su evidenze.

A tal riguardo, un'analisi comparativa condotta da McLennan et al. (2024) su sei Stati membri dell'Unione Europea evidenzia che, nonostante il potenziale trasformativo del Regolamento (UE) 2020/741 in materia di riuso agricolo, permangono ostacoli significativi alla sua piena implementazione. In particolare, si segnalano difficoltà operative legate ai costi di adeguamento, alla disomogeneità normativa tra livelli nazionali e sovranazionali, nonché alla distanza tra impianti di trattamento e aree agricole servibili. Queste barriere confermano l'importanza di rafforzare il coordinamento istituzionale, investire in infrastrutture intermedie e promuovere una governance territoriale più integrata, affinché le normative europee possano tradursi in pratiche efficaci su scala locale.

6.4 PERCORSI TEMPORALI PER LA RESILIENZA IDRICA INTEGRATA

La transizione verso una gestione resiliente e circolare dell'acqua richiede una visione temporale chiara e articolata. Le trasformazioni necessarie – infrastrutturali, normative, tecnologiche e culturali – non possono essere realizzate simultaneamente, ma devono seguire traiettorie di implementazione progressiva, che distinguano le azioni ad alta priorità da quelle di consolidamento e lungo periodo.

In questa prospettiva, si propone una roadmap strategica in tre orizzonti temporali, ispirata alla logica degli Adaptive Pathways (Haasnoot et al., 2013) e coerente con gli obiettivi fissati da SDG 6, Green Deal europeo, strategia REPowerEU e Net-Zero Industry Act. Tale articolazione temporale permette di collegare in modo dinamico l'analisi dei rischi e delle opportunità (cap. 5) con la programmazione operativa, allocando risorse e strumenti in modo più efficiente e trasparente.

A supporto di questa impostazione graduale, si sta affermando a livello internazionale l'approccio dei *Strategic Investment Pathways (SIPs)*, sviluppato dall'OECD (2022). Questo modello consente di costruire portafogli dinamici di interventi idrici resilienti, pianificati secondo una logica adattiva e stress-testata su più scenari climatici, finanziari e normativi. I SIPs si articolano in fasi successive: identificazione degli obiettivi di resilienza condivisi, selezione di opzioni tecniche e istituzionali, costruzione di traiettorie flessibili di investimento, definizione di trigger decisionali e aggiornamento periodico.

La loro utilità risiede nella capacità di evitare lock-in infrastrutturali, garantendo coerenza tra politiche a breve e lungo termine, e promuovendo una governance proattiva capace di adattarsi all'evoluzione delle condizioni ambientali e socioeconomiche. Tali percorsi risultano particolarmente efficaci per integrare resilienza idrica e transizione energetica, facilitando l'incontro tra progettualità pubblica e criteri della finanza sostenibile.

ROADMAP DELLA RESILIENZA IDRICA – 2025 / 2030 / 2050

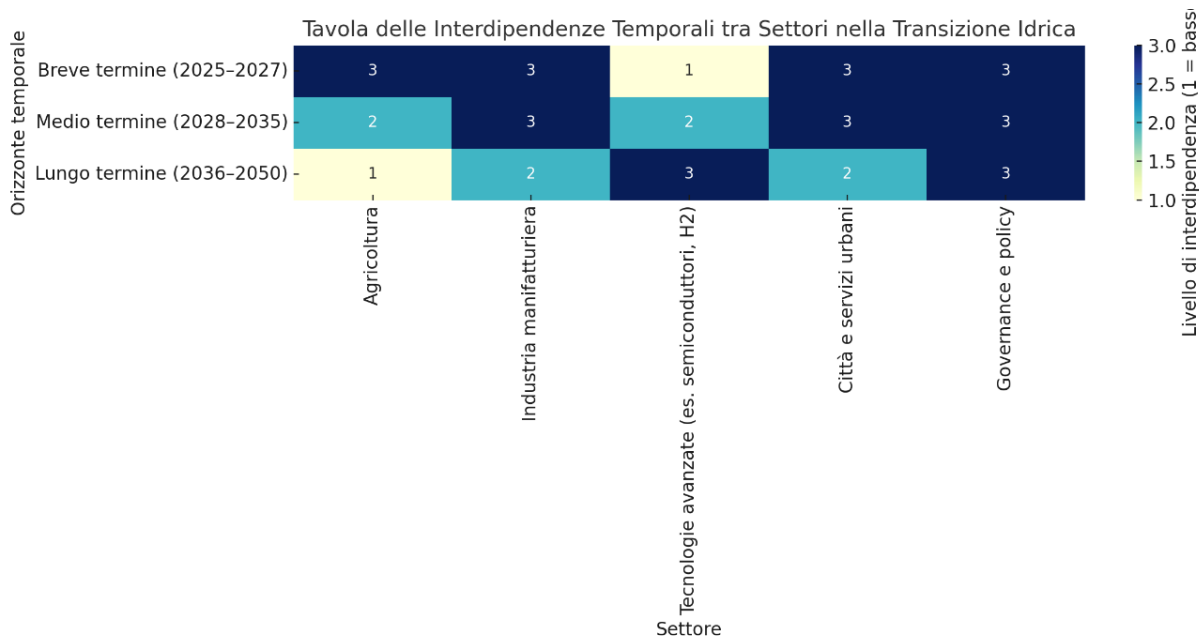
Orizzonte temporale	Obiettivi principali	Azioni prioritarie	Indicatori chiave
2025-2027 (Breve termine)	Mitigazione dei rischi immediati e delle perdite sistemiche	<ul style="list-style-type: none"> - Riduzione perdite idriche urbane - Introduzione tariffazione progressiva - Audit idrici obbligatori nei settori industriali ad alta intensità - Adozione KPI ESG idrici minimi 	<ul style="list-style-type: none"> • % perdite rete • €/m³ risparmiato • n° imprese con reporting ESG idrico
Entro il 2030 (Medio termine)	Costruzione di un'infrastruttura idrica resiliente e abilitante	<ul style="list-style-type: none"> - Riuso sistemico in agricoltura e industria - Piani regionali di resilienza idrica - Digitalizzazione e tracciabilità dei flussi - Revisione degli incentivi e sussidi 	<ul style="list-style-type: none"> • m³/anno riutilizzati • % territorio coperto da piani • % CAPEX idrico allocato a resilienza
Entro il 2050 (Lungo termine)	Integrazione dell'acqua nelle strategie clima-industria-territorio	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemi industriali a ciclo chiuso - Sinergie con produzione idrogeno verde - Piani climatici e industriali idro-compatibili - Monetizzazione dei servizi ecosistemici idrici 	<ul style="list-style-type: none"> • % industria a ciclo chiuso • % H₂ da reflui • NWV (Net Water Value) integrato nei bilanci pubblici

Questa struttura temporale consente di allineare:

- ♣ le **azioni a basso costo marginale** (es. riduzione perdite, riuso agricolo);
- ♣ le **riforme normative sistemiche** (es. revisione tariffe e sussidi);
- ♣ gli **investimenti strategici a lungo termine** (es. idrogeno verde, cicli chiusi industriali).

La matrice (Figura 7) evidenzia in modo sintetico e comparativo il livello di coinvolgimento di ciascun settore nei diversi orizzonti temporali della transizione idrica (2025–2050). L'obiettivo è facilitare la definizione di priorità strategiche e sinergie intersettoriali nel tempo.

Figura 7 Tavola delle Interdipendenze Temporali tra Settori nella Transizione Idrica



Orizzonte temporale	Descrizione operativa
2025-2027	Interventi urgenti e ad alta prontezza
2028-2035	Infrastrutturazione, normative, scale-up
2036-2050	Integrazione sistemica e impatti a lungo termine

Agricoltura e città: svolgono un ruolo immediato e critico già nel breve termine (**2025-2027**), poiché sono i comparti più esposti agli impatti diretti della scarsità idrica e hanno il potenziale più elevato di intervento rapido (es. riuso irriguo, perdite urbane, tariffe sociali). La loro capacità di adattamento operativo è determinante per la stabilizzazione del sistema.

Industria manifatturiera: è coinvolta in modo significativo in tutte le fasi temporali. Nel breve termine si avviano progetti pilota e retrofit efficienti; nel medio termine (**2028-2035**) si assiste a una scalabilità degli interventi grazie a politiche e incentivi; nel lungo termine (**2036-2050**) diventa cruciale la chiusura del ciclo idrico industriale e la simbiosi energetico-idrica.

Tecnologie avanzate (es. **semiconduttori, idrogeno verde, data center**): emergono come settori strategici nel lungo periodo, dove le esigenze di acqua ultrapura, continuità e integrazione con l'energia richiedono investimenti ad alta complessità. La loro interdipendenza con altri settori (industria, energia, governance) crescerà esponenzialmente fino al 2050.

Governance e policy: agiscono come architrave trasversale. La loro funzione abilitante è fondamentale in ogni fase della transizione per garantire coerenza normativa, efficacia degli strumenti economici e integrazione tra livelli decisionali (locale-nazionale-europeo). Una governance anticipatoria è necessaria fin dal breve termine per abilitare l'intera transizione.

Per la metodologia completa si rimanda all'Appendice B – Costruzione della matrice temporale settoriale.

La transizione si scontra con ostacoli diversificati nel tempo, che richiedono soluzioni dinamiche, coordinate e adattive. Una pianificazione realistica deve riconoscere che alcune barriere – normative, tecnologiche, finanziarie o sociali – emergono o si riducono in momenti diversi, influenzando la fattibilità e l’urgenza degli interventi. I principali ostacoli temporali alla transizione idrica sono in tabella:

Tipologia	Breve termine (2025–2027)	Medio termine (2028–2035)	Lungo termine (2036–2050)
Normativi	Incertezza sul riuso, tempi autorizzativi lunghi	Necessità di armonizzazione UE–locale, regolazione ESG	Aggiornamento legislazione ai cambiamenti climatici
Tecnologici	Barriera iniziale ai costi, complessità impiantistica	Manutenzione avanzata, digitalizzazione completa	Obsolescenza e aggiornamento cicli di vita
Finanziari	Accesso al credito per PMI, investimenti anticipati	Ammortamento infrastrutture, stabilità tariffaria	Integrazione nei bilanci pubblici pluriennali
Sociali	Scarsa accettazione del riuso, opposizione locale	Equità nell’accesso, tariffazione progressiva	Inclusione delle generazioni future (giustizia intergenerazionale)

Nel periodo 2025–2027, le azioni prioritarie dovranno concentrarsi sulla rimozione delle barriere normative e procedurali, attraverso una semplificazione dei processi autorizzativi per il riuso idrico, l’adozione di standard tecnici condivisi e la definizione di linee guida operative per i diversi settori. Parallelamente, sarà strategico promuovere progetti dimostrativi e pilota, capaci di testare soluzioni innovative in contesti reali e trasferibili. Un ulteriore pilastro sarà rappresentato dal rafforzamento dei sistemi di monitoraggio e trasparenza, tramite l’introduzione di strumenti digitali e indicatori standardizzati a supporto della rendicontazione e del coinvolgimento degli stakeholder.

Nel medio termine (2028–2035), l’obiettivo principale sarà il consolidamento e la scalabilità dei modelli circolari già sperimentati, attraverso politiche di diffusione, interoperabilità normativa e supporto alla transizione nei territori meno attrezzati. In questa fase, diventa essenziale attivare meccanismi di finanziamento stabile e su scala, come tariffe incentivanti, fondi rotativi, crediti fiscali e finanza mista (*blended finance*). In parallelo, occorrerà sviluppare e implementare un set coerente di indicatori di resilienza, in grado di misurare l’efficacia delle politiche idriche in termini ambientali, economici e sociali.

Infine, nel periodo 2036–2050, la sfida sarà quella di garantire la sostenibilità di lungo periodo della transizione idrica, trasformando i sistemi di gestione in infrastrutture resilienti e adattive, capaci di generare valore sistemico nel tempo. Ciò richiede l’attivazione di cicli virtuosi tra innovazione tecnologica, governance multilivello e co-benefici ambientali e sociali, in un quadro normativo e finanziario integrato con le agende climatiche, industriali e territoriali.

6.5 VERSO UNA STRATEGIA INDUSTRIALE RESILIENTE E CIRCOLARE IN AMBITO IDRICO

L’acqua rappresenta oggi una delle risorse più critiche per la sostenibilità e la competitività dell’economia industriale. In un contesto segnato da stress idrico crescente, crisi climatica e trasformazioni normative e tecnologiche, la costruzione di una strategia industriale resiliente e circolare in ambito idrico non è solo un’opportunità, ma una necessità strutturale.

I modelli di gestione lineare – prelievo, utilizzo, scarico – mostrano limiti evidenti in termini di impatti ambientali, costi operativi e vulnerabilità ai cambiamenti esterni. Al contrario, l’approccio circolare, fondato su riduzione, riuso, recupero e rigenerazione, consente di aumentare la sicurezza idrica, ridurre le dipendenze da risorse primarie, migliorare l’efficienza e generare valore dai reflui.

La resilienza industriale nel contesto idrico richiede un approccio integrato su più livelli. Fondamentale è l'adozione di strumenti innovativi per l'economia idrica circolare, come sistemi a membrane, strumenti digitali per il controllo in tempo reale e soluzioni per il recupero di energia e nutrienti. A ciò si affianca la necessità di una pianificazione intersettoriale, capace di connettere efficacemente i flussi tra acqua, energia, agricoltura e manifattura attraverso modelli di simbiosi industriale e gestione consortile.

A tal proposito, recenti contributi internazionali sottolineano l'importanza di integrare approcci di simbiosi industriale idrica, in cui l'acqua viene trattata come vettore di scambio intersettoriale. Secondo Ali e Acquaye (2024), l'adozione di modelli quantitativi per la simbiosi acqua-materiali consente di ridurre fino al 45% il fabbisogno di acqua dolce in distretti produttivi, attraverso il riutilizzo tra stabilimenti contigui, la condivisione di infrastrutture di trattamento e la creazione di mercati secondari per risorse idriche trattate.

Tali modelli utilizzano reti di flusso ottimizzate, indicatori ambientali (LCA idrico-carbonica) e simulazioni multi-obiettivo per valutare scenari di efficienza e co-benefici. L'integrazione sistemica della simbiosi idrica rafforza la resilienza operativa, la competitività economica e la compatibilità ESG delle imprese, ponendosi come elemento cardine della strategia industriale circolare. Un ulteriore elemento abilitante è rappresentato da strumenti avanzati per la misurazione della circolarità, come il Process Circularity Index (ProCI) proposto da Pilipenets et al. (2025). Questo indicatore, pensato per i sistemi produttivi industriali, integra variabili quali flussi idrici, energetici e materici, nonché le emissioni associate, consentendo una valutazione più completa e comparabile della performance circolare. In prospettiva, metriche come questa possono guidare la transizione da un'efficienza lineare a una resilienza industriale sistemica, fondata su ottimizzazione adattiva, accountability ambientale e innovazione digitale.

È altresì cruciale una governance multilivello, che promuova il coordinamento tra enti pubblici, imprese e comunità locali, facilitando la co-progettazione di soluzioni adattive. Infine, servono strumenti finanziari e normativi che incentivino la circolarità, rendendo le tecnologie scalabili e bancabili, con criteri chiari di rendicontazione e indicatori di performance idrica.

In questo scenario, l'industria può assumere un ruolo propulsivo, non solo come consumatore responsabile ma come produttore rigenerativo: capace di trattare l'acqua come una risorsa condivisa, rigenerabile e strategica.

L'impresa idricamente resiliente è un attore che investe in innovazione, misura e comunica i propri impatti, coopera sul territorio, e si posiziona attivamente nei mercati orientati alla sostenibilità (ESG, *green finance*, *carbon neutrality*).

A livello macro, la strategia industriale idrica deve diventare parte integrante dei piani di transizione ecologica, digitale e produttiva, contribuendo al raggiungimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG 6, 9, 12 e 13), alla decarbonizzazione, e alla costruzione di sistemi produttivi capaci di adattarsi e prosperare in un contesto idrologico mutevole.

Le esperienze documentate in contesti emergenti come Durban, Tamil Nadu e Lima dimostrano che anche territori a risorse limitate possono adottare soluzioni circolari efficaci, attraverso approcci decentralizzati, infrastrutture verdi e coinvolgimento comunitario.

Questi casi evidenziano che la transizione idrica non può essere esclusivamente guidata da alta tecnologia e capitale, ma deve fondarsi su accessibilità, flessibilità e giustizia idrica. Garantire replicabilità e adattabilità delle soluzioni — anche in ambienti fragili o informali — rappresenta una condizione essenziale per costruire una strategia industriale globale veramente resiliente.



Una politica pubblica orientata alla circolarità dell'acqua deve, quindi, integrare criteri di equità territoriale, supportare l'innovazione a bassa soglia tecnologica e promuovere modelli di governance inclusiva capaci di rafforzare la coesione sociale.

A supporto di questa visione sistemica, si impone la necessità di adottare modelli di governance policentrica che superino la dicotomia tra gestione centralizzata e decentralizzata. Esperienze consolidate come il modello RCES (Regional Circular and Ecological Sphere) promosso in Giappone, o l'approccio IWRM (Integrated Water Resources Management), dimostrano come la co-gestione dell'acqua basata su responsabilità condivise, partecipazione attiva e flessibilità istituzionale sia fondamentale per garantire resilienza, equità e adattabilità delle soluzioni circolari. Questi modelli enfatizzano l'integrazione tra livelli di governo, settori produttivi e attori locali, offrendo un quadro coerente per affrontare sfide complesse in ambienti idrici in evoluzione (Savelli et al., 2021).

Costruire una strategia industriale resiliente e circolare in ambito idrico significa rispondere in modo sistemico a una delle grandi sfide del XXI secolo. Significa pensare l'acqua non solo come un input, ma come un'infrastruttura invisibile che connette ambiente, economia e società.

6.6 TABELLE E COMPARAZIONI

6.6.1 Sintesi settoriale efficienza idrica

Settore	Criticità	Soluzioni emergenti	Prospettive
Agroalimentare	70% dei prelievi globali; alta esposizione alla variabilità climatica e riduzione disponibilità	Irrigazione efficiente (goccia, sprinkler); monitoraggio digitale; riuso reflui e nutrienti	Riduzione del 50% dei fabbisogni in contesti selezionati
Industria manifatturiera e chimica	Alti consumi idrici; scarichi complessi; rischio operativo crescente	Riciclo interno; IoT/SCADA; certificazioni ambientali (ESG, ISO 14046)	Fino al 60% di riduzione dei prelievi (es. USA)
Trattamento acque reflue e fanghi	Approccio lineare; scarsa valorizzazione delle risorse nei reflui	Impianti multifunzionali; AOP, membrane, separazione selettiva; simbiosi industriale	Copertura del 50–80% del fabbisogno energetico; sottoprodotti valorizzati

6.6.2 Tabella raccomandazioni suddivise per target

Target	Raccomandazione	Obiettivo
Imprese	Integrare KPI idrici nei sistemi ESG e gestionali	Migliorare efficienza e rendicontazione
Imprese	Investire in tecnologie di riuso e digitalizzazione	Ridurre costi e impatti ambientali
Imprese	Promuovere la simbiosi industriale e la gestione consortile	Aumentare competitività e resilienza
Regolatori	Stabilire standard normativi per il riuso sicuro	Garantire qualità e sicurezza
Regolatori	Introdurre incentivi economici e strumenti di tariffazione	Accelerare l'adozione di soluzioni efficienti
Policymaker	Finanziare infrastrutture circolari e R&S	Sostenere innovazione e scalabilità
Policymaker	Promuovere cultura dell'acqua e giustizia idrica	Rendere l'accesso equo e sostenibile
Policymaker	Favorire la replicabilità delle soluzioni in contesti fragili e decentrati	Ridurre disuguaglianze e garantire accesso equo all'acqua

**6.6.3 Linee guida per una strategia industriale idrica avanzata**

Pilastro strategico	Azione chiave
Tecnologico	Diffusione di impianti avanzati e sensori intelligenti
Economico-finanziario	Incentivi per il riuso e la circolarità idrica
Regolatorio	Quadro normativo armonizzato e favorevole al recupero risorse
Operativo	Benchmark e KPI idrici per settore e distretto
Sociale-culturale	Educazione al valore dell'acqua e accettazione del riuso

6.7 PUNTI PRINCIPALI

La scarsità idrica è una sfida multisetoriale e sistemica

Colpisce trasversalmente agricoltura, industria e città. Non può essere affrontata in modo settoriale, ma richiede risposte integrate tra attori pubblici, privati e comunità locali.

Tecnologie e modelli esistono: il nodo è l'adozione su scala

Le soluzioni per il riuso, la digitalizzazione e il recupero di risorse sono tecnicamente pronte e operative. Ciò che manca è la loro diffusione sistemica, ostacolata da barriere economiche, normative e culturali.

Le imprese devono trattare l'acqua come un asset strategico

Efficienza, resilienza e circolarità devono entrare nei KPI industriali. L'investimento in gestione idrica avanzata non è solo ambientale, ma anche economico e reputazionale (ESG, SDG, *green finance*).

Gli enti regolatori devono creare un contesto abilitante

Servono standard chiari per il riuso, procedure semplificate per il trattamento decentralizzato, e sistemi di incentivazione per l'efficienza idrica, inclusi strumenti tariffari progressivi e premi di performance.

I policymaker devono integrare l'acqua nella transizione ecologica

L'acqua deve entrare nelle agende climatiche, industriali e agricole. Serve una visione strategica nazionale ed europea che includa infrastrutture verdi, economia circolare e accesso equo alla risorsa.

Verso una strategia industriale idrica resiliente e rigenerativa

Costruire una nuova strategia significa:

- ♣ investire in tecnologie abilitanti e digitali,
- ♣ promuovere modelli di simbiosi e governance multilivello,
- ♣ rendere bancabili le soluzioni circolari con strumenti finanziari ad hoc.

7 LIMITI DELLO STUDIO

- ♣ **Assunzioni economiche semplificate** – Le stime di valore aggiunto (1-3 €/m³ in agricoltura; >500 €/m³ in high-tech) si basano su medie macro-settoriali che non contemplano oscillazioni di prezzo, incentivi fiscali o sussidi locali.
- ♣ **Incertezza climatica** – Le proiezioni di stress idrico utilizzano lo scenario IPCC SSP2-4.5 come riferimento unico. L'assenza di un'analisi di sensitività a scenari più severi (SSP3-7.0, SSP5-8.5) può sottostimare i rischi.
- ♣ **Limiti metodologici del Water-Energy-Food Nexus** – Il modello adottato considera i flussi energetici solo in termini di consumo elettrico diretto. Non sono inclusi gli impatti 'embedded' nei materiali (cemento, acciaio) né le emissioni di gas serra di filiera.
- ♣ **Disponibilità di serie temporali sulle tariffe** – I confronti internazionali sulle tariffe idriche si fondano su snapshot annuali; mancano dati mensili/stagionali che permetterebbero analisi di volatilità e price-elasticity.
- ♣ **Rischi di generalizzazione** – Alcune raccomandazioni di policy (es. obbligo di riuso al 25 % entro il 2030) derivano da normative di Paesi pionieri e potrebbero non essere compatibili con contesti istituzionali a bassa capacità normativa.

8 BIBLIOGRAFIA

- ♣ Adams, H., Messner, E., Sinicropi, P., Steinle-Darling, E., & Crespo, E. (2023). Learning from water reuse in Israel. *Journal AWWA*, 115(5), 34–41. <https://doi.org/10.1002/awwa.2092>
- ♣ Adeyinka, M. O., Araoye, O., Akpan, V. E., Omole, D. O., & Elemile, O. O. (2021). Design of a water transmission and storage system for sustainable reuse of wastewater within a university community. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1107, 012146. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1107/1/012146>
- ♣ Al-Asheh, S., Bagheri, M., & Aidan, A. (2021). Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100109. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100109>
- ♣ Alexandra, J., & Rickards, L. (2021). The contested politics of drought, water security and climate adaptation in Australia's Murray-Darling Basin. *Water Alternatives*, 14(3), 773–794.
- ♣ Ali, A., Hussain, T., & Zahid, A. (2025). Smart irrigation technologies and prospects for enhancing water use efficiency for sustainable agriculture. *AgriEngineering*, 7(4), 106. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7040106>
- ♣ Ali, S. M., & Acquaye, A. (2024). *An examination of Water-Energy-Food nexus: From theory to application*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 114669. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114669>
- ♣ Alliance for Water Stewardship. (2019). The AWS International Water Stewardship Standard (AWS Standard) Version 2.0.
- ♣ Angelova, I., Alitchkov, D., & Radovanov, V. (2024). *Technical and economic impact of water reuse as an integrated water resource management measure in rural water supply systems*. *Water Supply*, 24(5), 1974–1988. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.099>
- ♣ Areosa, I., Martins, T. A. E., Lourinho, R., Batista, M., Brito, A. G., & Amaral, L. (2024). Treated wastewater reuse for irrigation: A feasibility study in Portugal. *Science of the Total Environment*, 954, 176698. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176698>
- ♣ Arora, N. K., & Mishra, I. (2022). Sustainable development goal 6: Global water security. *Environmental Sustainability*, 5(1), 271–275. <https://doi.org/10.1007/s42398-022-00246-5>
- ♣ Arup & Rockefeller Foundation. (2019). *City Water Resilience Framework*. London: Arup Group.
- ♣ Bandehali, S., Moghadassi, A., Hosseini, S. M., Parvizian, F., Ghanbari, D., Rahimizadeh, R., & Ebrahimi, A. A. (2024). Smart ion exchange membrane with high impact in heavy metals separation prepared by electrospinning process with ultrasensitive responsiveness for water treatment. *Chemical Engineering Research and Design*, 205, 763–774. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.04.028>
- ♣ Barman, B., Munshi, S. A., Mondal, I., Quader, S. K. W., & Das, A. (2025). Promoting sustainability and climate resilience in agriculture through circular economy: A review. *Agricultural Reviews*, 45(1), 1–11. <https://doi.org/10.18805/ag.R-2865>
- ♣ Benuzzi, M., Şahin, Ö., & Paterlini, S. (2025). From KPIs to ESG: Addressing Redundancy and Distortions in ESG Scores. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5136069>
- ♣ Bhat, S. A., Bashir, O., Ul Haq, S. A., Amin, T., Rafiq, A., Ali, M., Américo-Pinheiro, J. H. P., & Sher, F. (2022). Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere*, 303(Part 1), 134788. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134788>
- ♣ Biswas, A., Sarkar, S., Das, S., et al. (2025). Water scarcity: A global hindrance to sustainable development and agricultural production. *Cambridge Prisms: Water*, 3, e4. <https://doi.org/10.1017/wat.2024.16>

- ♣ Boogaard, J. R., Prabhakara Rao, S., Abayankar Balaji, S. R., & Ranganathan, P. (2024). Digital twin models for cybersecurity use cases in water utilities and SCADA systems: A review. In 2024 Cyber Awareness and Research Symposium (CARS) (pp. [non specificato]). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CARS61786.2024.10778873>
- ♣ Brown, C., Boltz, F., & Dominique, K. (2022). Strategic Investment Pathways for resilient water systems. OECD Environment Working Papers, No. 202. <https://doi.org/10.1787/9afacd7f-en>
- ♣ Buttinelli, R., Cortignani, R., & Caracciolo, F. (2024). *Irrigation water economic value and productivity: An econometric estimation for maize grain production in Italy*. Agricultural Water Management, 295, 108757. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108757>
- ♣ Cabo, A., Gouveia, S., Cameselle, C., & Lee, K.-H. (2025). Phosphorus removal by chemical precipitation in wastewater treatment plants. Journal of Chemistry. <https://doi.org/10.1155/joch/8608812>
- ♣ Capodaglio, A. G., Wezel, A. P. van, & Hreiz, R. (2023). Fit-for-purpose water reuse: Overcoming technical and social barriers through decentralized systems and stakeholder engagement. *Water*, 16(10), 1015. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1763231>
- ♣ Castellar, J. A. C., Torrens, A., Buttiglieri, G., Monclús, H., Arias, C. A., Carvalho, P. N., Galvao, A., & Comas, J. (2022). Nature-based solutions coupled with advanced technologies: An opportunity for decentralized water reuse in cities. Journal of Cleaner Production, 340, 130660. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130660>
- ♣ Cavalieri, S., & Gambadoro, S. (2024). Digital twin of a water supply system using the Asset Administration Shell. *Sensors*, 24(5), 1360. <https://doi.org/10.3390/s24051360>
- ♣ CDP. (2023). *CDP Water Security Questionnaire*. <https://www.cdp.net>
- ♣ Chen, Z., Li, Z., Chen, J., Kallem, P., Banat, F., & Qiu, H. (2022). Recent advances in selective separation technologies of rare earth elements: A review. Journal of Environmental Chemical Engineering, 10(1), 107104. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107104>
- ♣ Ciampittiello, M., Marchetto, A., & Boggero, A. (2024). Water resources management under climate change: A review. *Sustainability*, 16(9), 3590. <https://doi.org/10.3390/su16093590>
- ♣ Cities4Climate. (2021). *Nature-Based Solutions for Urban Water Management in Latin America*. Urban Climate Alliance Report Series, No. 7.
- ♣ Cristiano, E., Annis, A., Apollonio, C., Pumo, D., Urru, S., Viola, F., Deidda, R., Pelorosso, R., Petroselli, A., Tauro, F., ... (2022). Multilayer blue-green roofs as nature-based solutions for water and thermal insulation management. *Hydrology Research*, 53(9), 1129–1149. <https://doi.org/10.2166/nh.2022.201>
- ♣ Dasallas, L. L., Lee, J. Y., Jang, S., & Jang, S. (2024). Development and Application of Technical Key Performance Indicators for Smart Water Cities. *Water*, 16(4), 741. <https://doi.org/10.3390/w16050741>
- ♣ Delgado, A., Rodriguez, D. J., Amadei, C. A., & Makino, M. (2024). Water in circular economy and resilience (WICER) framework. *Utilities Policy*, 87, 101604. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2023.101604>
- ♣ Distefano, T., Saldarriaga Isaza, A., Morlin, G. S., Posada Carmona, V., Villegas Palacio, C. I., & Arango-Aramburo, S. (2025). The roads towards complex water governance: The Colombian case study. *World Development*, 188, 106874. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2024.106874>
- ♣ Dong, C., Fang, W., Yi, Q., & Zhang, J. (2022). A comprehensive review on reactive oxygen species (ROS) in advanced oxidation processes (AOPs). *Chemosphere*, 308, 136205. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136205>
- ♣ EFPIA. (2022). Sustainable Pharma Manufacturing.

- Ertop, H., Kocięcka, J., Atilgan, A., Liberacki, D., Niemiec, M., & Rolbiecki, R. (2023). The importance of rainwater harvesting and its usage possibilities: Antalya example (Turkey). *Water*, 15(12), 2194. <https://doi.org/10.3390/w15122194>
- ESIA. (2023). *Water and Semiconductors in Europe*.
- ESIA. (2023). *Water and Semiconductors*.
- European Commission. (2020). *EU taxonomy for sustainable activities: Technical annex*. Directorate-General for Financial Stability, Financial Services and Capital Markets Union. https://ec.europa.eu/info/files/200309-sustainable-finance-tegnaxtaxonomy_en
- European Commission. (2021). *Assessment of the Water Framework Directive and the Floods Directive – Implementation Report*. Brussels.
- European Commission. (2021). *Forging a climate-resilient Europe – the new EU Strategy on Adaptation to Climate Change*. COM (2021) 82 final.
- European Commission. (2023). *EU Taxonomy for Sustainable Activities*. <https://finance.ec.europa.eu>
- European Environment Agency (EEA). (2023). *Nutrient management and eutrophication in European waters*. Publications Office of the European Union.
- European Environment Agency (EEA). (2023). *Urban Water Vulnerability in Europe*. Publications Office of the European Union.
- European Environment Agency (EEA). (2023). *Water scarcity conditions in Europe – Water Exploitation Index Plus (WEI+)*.
- European Environment Agency (EEA). (2025). *Water exploitation and stress in Europe: EEA briefing, January 2025*. European Environment Agency.
- European Investment Bank. (2023). *EIB water sector orientation: Building climate-resilient water systems*. Luxembourg: EIB.
- Expósito, A., Díaz-Cano, E., & Berbel, J. (2024). The potential use of reclaimed water for irrigation purposes: Is it overestimated? *Water Resources Management*, 38(13), 4541–4554. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03878-w>
- Ferreira, C. S. S., Kašanin-Grubin, M., Kapović Solomun, M., Sushkova, S., Minkina, T., Zhao, W., & Kalantari, Z. (2023). Wetlands as nature-based solutions for water management in different environments. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 33, 100476. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100476>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & UN-Water. (2024). *Progress on the level of water stress: Mid-term status of SDG Indicator 6.4.2 and acceleration needs*. FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Systems at Breaking Point – Synthesis Report*. Rome: FAO.
- Georgouvelas, D., Abdelhamid, H. N., Li, J., Edlund, U., & Mathew, A. P. (2021). All-cellulose functional membranes for water treatment: Adsorption of metal ions and catalytic decolorization of dyes. *Carbohydrate Polymers*, 264, 118044. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118044>
- Giacomini, D., Rocca, L., & Tonoli, D. (2024). Exploring materiality and stakeholder engagement in European water utilities' sustainability strategies, organizational practices, and reporting. *Business Strategy and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/bse.4109>
- Gonzalez-Flo, E., Romero, X., & García, J. (2023). Nature based-solutions for water reuse: 20 years of performance evaluation of a full-scale constructed wetland system. *Ecological Engineering*, 188, 106876. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106876>
- Grafton, R. Q., & Wheeler, S. A. (2018). Economics of water recovery in the Murray–Darling Basin, Australia. *Annual Review of Resource Economics*, 10, 487–510. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100517-023039>



- ♣ Grafton, R. Q., Libecap, G. D., McGlennon, S., Landry, C., & O'Brien, R. (2011). An integrated assessment of water markets: A cross-country comparison. *Review of Environmental Economics and Policy*, 12(2), 212–234.
- ♣ Graziano, M. P., Deguire, A. K., & Surasinghe, T. D. (2022). Riparian buffers as a critical landscape feature: Insights for riverscape conservation and policy renovations. *Diversity*, 14(3), 172. <https://doi.org/10.3390/d14030172>
- ♣ GRI. (2018). *GRI 303: Water and Effluents 2018*. Global Reporting Initiative.
- ♣ Gu, W., Wang, F., Siebert, S., Kummu, M., Wang, X., Hong, C., Zhou, F., Zhu, Q., & Qin, Y. (2024). The asymmetric impacts of international agricultural trade on water use scarcity, inequality and inequity. *Nature Water*, 2, 324–336. <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00224-7>
- ♣ Guan, R., Yuan, X., Wu, Z., Jiang, L., Li, Y., & Zeng, G. (2018). Principle and application of hydrogen peroxide based advanced oxidation processes in activated sludge treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, 339, 519–530. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.153>
- ♣ Gupta, A. D., Pandey, P., Feijóo, A., Yaseen, Z. M., & Bokde, N. D. (2020). Smart water technology for efficient water resource management: A review. *Energies*, 13(23), 6268. <https://doi.org/10.3390/en13236268>
- ♣ Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E., & ter Maat, J. (2013). Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*, 23(2), 485–498. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006>
- ♣ Hoekstra, A., Chapagain, A., Aldaya, M., & Mekonnen, M. (2011). *The water footprint assessment manual*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849775526>
- ♣ Hrozencik, R. A., & Aillery, M. (2021). *Trends in U.S. irrigated agriculture: Increasing resilience under water supply scarcity* (Economic Information Bulletin No. 229). U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service. <https://ssrn.com/abstract=3996325>
- ♣ Huang, Y., Jeffrey, P., & Pidou, M. (2024). Municipal wastewater treatment with anaerobic membrane bioreactors for non-potable reuse: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 54(10), 817–839. <https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2279886>
- ♣ Hydrogen Europe. (2023). *Water in Green Hydrogen*.
- ♣ Hydrogen Europe. (2023). *Water Use in Electrolysis*.
- ♣ ICLEI South Asia. (2020). *Decentralised Wastewater Management Systems: Case Studies from Tamil Nadu*. New Delhi, India.
- ♣ ICMA. (2023). *Sustainability-linked bond principles (2023 edition)*. International Capital Market Association. <https://www.icmagroup.org/sustainable-finance>
- ♣ IEA. (2022). *Digitalisation and Energy*. International Energy Agency.
- ♣ IEA. (2022). *Global Hydrogen Review*.
- ♣ IJSRA. (2024). Barriers to the adoption of precision agriculture in developing regions. *International Journal of Scientific Research and Applications*, 14(1), 29–38.
- ♣ Intel. (2022). *Corporate Water Stewardship Report*.
- ♣ International Monetary Fund. (2023). *World Economic Outlook: Navigating Global Divergences*. Washington, DC: IMF.
- ♣ Iqbal, M. A., Akram, S., Khalid, S., Lal, B., Ul Hassan, S., Ashraf, R., Kezembayeva, G., Mushtaq, M., Chinibayeva, N., & Hosseini-Bandegharaei, A. (2024). Advanced photocatalysis as a viable and sustainable wastewater treatment process: A comprehensive review. *Environmental Research*, 253, 118947. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118947>

- ♣ ISO. (2014). ISO 14046: Environmental management – Water footprint – Principles, requirements and guidelines.
- ♣ ISPRA. (2022). La valutazione economica delle politiche di efficienza idrica.
- ♣ IWA – International Water Association. (2020). *Water Reuse in Africa: Key Trends and Opportunities*. London: IWA Publishing.
- ♣ IWMI – International Water Management Institute. (2022). Global experiences with wastewater reuse in agriculture: Best practices and economic impacts. IWMI Research Report No. 201.
- ♣ Jayaraman, P., Nagarajan, K. K., Partheeban, P., & Krishnamurthy, V. (2024). Critical review on water quality analysis using IoT and machine learning models. *International Journal of Information Management Data Insights*, 4(1), 100210. <https://doi.org/10.1016/j.ijime.2023.100210>
- ♣ Jones, E. R., Bierkens, M. F. P., & van Vliet, M. T. H. (2024). Current and future global water scarcity intensifies when accounting for surface water quality. *Nature Climate Change*, 14, 610–618. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02007-0>
- ♣ Kahn, M., Sangiorgio, M., & Rosa, L. (2025). Potential of wastewater reuse to alleviate water scarcity under future warming scenarios. *Environmental Research Letters*, 20(3), 034012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adb31d>
- ♣ Kamal, A., Kanafin, Y. N., Satayeva, A., Kim, J., Pouloupoulos, S. G., & Arkhangelsky, E. (2024). Removal of carbamazepine, sulfamethoxazole and aspirin at municipal wastewater treatment plant of Astana, Kazakhstan: Paths to increase the efficiency of the treatment process. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 99(11), 2248–2258. <https://doi.org/10.1002/jctb.7713>
- ♣ Karki, U., & Rao, P. (2023). Techno-economic analysis of the water, energy, and greenhouse gas emissions impacts from the adoption of water efficiency practices in the U.S. manufacturing sector. *Resources, Conservation & Recycling*, 196, 107054. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107054>
- ♣ Kim, S., Nam, S.-N., Jang, A., Jang, M., Park, C. M., Son, A., Her, N., Heo, J., & Yoon, Y. (2022). Review of adsorption–membrane hybrid systems for water and wastewater treatment. *Chemosphere*, 286(Part 3), 131916. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131916>
- ♣ Kokkinos, P., Venieri, D., & Mantzavinos, D. (2021). Advanced oxidation processes for water and wastewater viral disinfection: A systematic review. *Food and Environmental Virology*, 13, 283–302. <https://doi.org/10.1007/s12560-021-09481-1>
- ♣ La Rosa, D. (2019). La valutazione integrata delle politiche ambientali. FrancoAngeli.
- ♣ Lakhari, I. A., Yan, H., Zhang, C., Wang, G., He, B., Hao, B., Han, Y., Wang, B., Bao, R., Syed, T. N., Chauhdary, J. N., & Rakibuzzaman, M. (2024). *A review of precision irrigation water-saving technology under changing climate for enhancing water use efficiency, crop yield, and environmental footprints*. *Agriculture*, 14(7), 1141. <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141>
- ♣ Lalawmpuii, & Rai, P. K. (2023). Role of water-energy-food nexus in environmental management and climate action. *Energy Nexus*, 11, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100230>
- ♣ Lehmann, C. (2024). Membrane Bioreactors in municipal used water purification. In J. Lahnsteiner (Ed.), *Handbook of Water and Used Water Purification*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78000-9_121
- ♣ Leijnse, M., Bierkens, M. F. P., Gommans, K. H. M., Lin, D., Tait, A., & Wanders, N. (2024). Key drivers and pressures of global water scarcity hotspots. *Environmental Research Letters*, 19(5), 054035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad3c54>



- Li, X., Fu, L., Chen, F., Zhao, S., Zhu, J., & Yin, C. (2023). Application of heterogeneous catalytic ozonation in wastewater treatment: An overview. *Catalysts*, 13(2), 342. <https://doi.org/10.3390/catal13020342>
- Lindner, A., & Stamm, J. (2025). Integrating climate change adaptation and water resource management: A critical overview. *Standards*, 5(1), 4. <https://doi.org/10.3390/standards5010004>
- Liu, X., Liu, W., Tang, Q., Liu, B., Wada, Y., & Yang, H. (2022). Global agricultural water scarcity assessment incorporating blue and green water availability under future climate change. *Earth's Future*, 10(4), e2021EF002567. <https://doi.org/10.1029/2021EF002567>
- Lorenzo López, A. M., & Expósito, A. (2025). A comprehensive environmental cost–benefit analysis of using reclaimed water for irrigation in Southern Spain. *Environments*, 12(130). <https://doi.org/10.3390/environments12040130>
- Lorenzo López, A. M., & Expósito, A. (2025). A comprehensive environmental cost–benefit analysis of using reclaimed water for irrigation in Southern Spain. *Environments*, 12(4), 130. <https://doi.org/10.3390/environments12040130>
- Maiga, Y., Compaoré, C. O. T., Diallo/Koné, M., Sossou, S. K., YempalaSomé, H., Sawadogo, M., Nagalo, I., Mihelcic, J. R., & Ouattara, A. S. (2024). Development of a constructed wetland for greywater treatment for reuse in arid regions: Case study in rural Burkina Faso. *Water*, 16(1927). <https://doi.org/10.3390/w16131927>
- Makvandi, P., Iftekhar, S., Pizzetti, F., Zarepour, A., Zare, E. N., Ashrafzadeh, M., Agarwal, T., Padil, V. V. T., Mohammadinejad, R., Sillanpaa, M., Maiti, T. K., Perale, G., Zarrabi, A., & Rossi, F. (2021). Functionalization of polymers and nanomaterials for water treatment, food packaging, textile and biomedical applications: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 583–611. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01089-4>
- Maniam, G., Zakaria, N. A., Leo, C. P., Vassilev, V., Blay, K. B., Behzadian, K., & Poh, P. E. (2022). An assessment of technological development and applications of decentralized water reuse: A critical review and conceptual framework. *WIREs Water*, 9(3), e1588. <https://doi.org/10.1002/wat2.1588>
- Mannina, G., Gulhan, H., & Ni, B.-J. (2022). Water reuse from wastewater treatment: The transition towards circular economy in the water sector. *Bioresource Technology*, 363, 127951. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127951>
- Marijuan, R., Díez, B., Peláez-Sánchez, S., Sánchez, C., Iglesias, J., Şirin, B., Baba, A., Gündüz, O., & Sánchez, R. (2024). Evaluating the impact of nature-based solutions on the provision of water-related and water-dependant ecosystem services. *Nature-Based Solutions*, 6, 100194. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100194>
- Matthews, J. H., Maestu, J., Kolkaila, A., Ei Phyo, P. E., Gomez, C. M., Muñoz Castillo, R., Rodriguez, D. J., Duel, H., Panella, T., & Vlaanderen, N. (2024). *Managing water for economic resilience: De-risking is not enough*. Alliance for Global Water Adaptation (AGWA).
- Matthews, J. H., Maestu, J., Kolkaila, A., Ei Phyo, P. E., Gomez, C. M., Muñoz Castillo, R., Rodriguez, D. J., Duel, H., Panella, T., & Vlaanderen, N. (2024). *Managing water for economic resilience: De-risking is not enough*. Alliance for Global Water Adaptation. <https://www.wr4er.org>
- Mbavarira, T. M., & Grimm, C. (2021). A Systemic View on Circular Economy in the Water Industry: Learnings from a Belgian and Dutch Case. *Sustainability*, 13(6), 3313. <https://doi.org/10.3390/su13063313>
- Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2011) National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption, Value of Water Research Report Series No. 50, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.



- ♣ Metcalf & Eddy, Inc. (Revisori: George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. David Stensel, Ryujiro Tsuchihashi, George Burton). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (6a ed.). McGraw-Hill Education.
- ♣ Millington, N., & Scheba, S. (2020). Day Zero and the infrastructures of climate change: Water governance, inequality, and infrastructural politics in Cape Town's water crisis. *International Journal of Urban and Regional Research*, 44(1), 116–132. <https://doi.org/10.1111/1468-2427.12899>
- ♣ Moretti, A., Ivan, H. L., & Skvaril, J. (2024). A review of the state-of-the-art wastewater quality characterization and measurement technologies: Is the shift to real-time monitoring nowadays feasible? *Journal of Water Process Engineering*, 60, 105061. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105061>
- ♣ Nair, G., Soni, B., & Shah, M. (2023). A comprehensive review on electro-oxidation and its types for wastewater treatment. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 100980. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100980>
- ♣ Narayanamoorthy, S., Brainy, J. V., Sulaiman, R., Ferrara, M., Ahmadian, A., & Kang, D. (2022). An integrated decision making approach for selecting a sustainable wastewater treatment technology. *Chemosphere*, 301, 134568. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134568>
- ♣ Nwankwo, C. O., Olu-lawal, K. A., Ani, E. C., Ugwuanyi, E. D., & Ninduwezuor-Ehiobu, N. (2024). *Chemical engineering and the circular water economy: Simulations for sustainable water management in environmental systems*. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21(3), 1–9. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.21.3.0647>
- ♣ OECD. (2020). *Developing Sustainable Finance Definitions and Taxonomies*. <https://www.oecd.org>
- ♣ OECD. (2021). *Social tariffs and equity in water services*. OECD Studies on Water.
- ♣ OECD. (2022). *Financing Water Supply, Sanitation and Flood Protection: Challenges in EU Member States and Policy Options*. Paris: OECD Publishing.
- ♣ OECD. (2022). *Strategic Investment Pathways for Resilient Water Systems* (OECD Environment Working Papers No. 202). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9afacd7f-en>
- ♣ OECD. (2022). *Water governance in cities: Policy insights for urban resilience*. Paris: OECD Publishing.
- ♣ Ortiz, N., Rosso, M., Zambon, E., den Hartog, J., & Cardenas, A. A. (2024). From power to water: Dissecting SCADA networks across different critical infrastructures. In P. Richter, V. Bajpai, & E. Carisimo (Eds.), *Passive and active measurement. PAM 2024* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 14537). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56249-5_1
- ♣ Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577–2641. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829765>
- ♣ Ozcelik, N., Rodríguez, M., Sartal, A., & Lutter, S. (2024). Taking away the economic “water productivity” illusion: An indicator inapt to inform meaningful water policies. *Ecological Indicators*, 165, 112220. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112220>
- ♣ Pagsuyoin, S. A., & Santos, J. R. (2021). Modeling regional impacts and resilience to water service disruptions in urban economies. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 48(5). <https://doi.org/10.1177/2399808321998703>
- ♣ Pandis, P. K., Kalogirou, C., Kanellou, E., Vaitsis, C., Savvidou, M. G., Sourkouni, G., Zorpas, A. A., & Argirusis, C. (2022). Key points of advanced oxidation processes (AOPs) for wastewater, organic pollutants and pharmaceutical waste treatment: A mini review. *ChemEngineering*, 6(1), 8. <https://doi.org/10.3390/chemengineering6010008>



- ◆ Peng, X., Jiang, Y., Chen, Z., Osman, A. I., Farghali, M., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2023). Recycling municipal, agricultural and industrial waste into energy, fertilizers, food and construction materials, and economic feasibility: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21, 765–801. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01551-5>
- ◆ Peng, Y., Ruan, Q., Lam, C. H., Meng, F., Guan, C.-Y., Santoso, S. P., Zou, X., Yu, E. T., Chu, P. K., & Hsu, H.-Y. (2021). Plasma-implanted Ti-doped hematite photoanodes with enhanced photoelectrochemical water oxidation performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 870, 159376. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159376>
- ◆ Penserini, L., Moretti, A., Mainardis, M., Cantoni, B., & Antonelli, M. (2024). Tackling climate change through wastewater reuse in agriculture: A prioritization methodology. *Science of the Total Environment*, 914, 169862. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169862>
- ◆ McLennan, C., Rudi, G., Altchenko, Y., & Ait-Mouheb, N. (2024). Will the European Regulation for water reuse for agricultural irrigation foster this practice in the European Union? *Water Reuse*, 14(2), 115–134. <https://doi.org/10.2166/wrd.2024.012>
- ◆ Peydayesh, M., & Mezzenga, R. (2024). The circular economy of water across the six continents. *Chemical Society Reviews*, 53, 4333–4348. <https://doi.org/10.1039/d3cs00812f>
- ◆ Pilipenets, O., Gunawardena, T., Hui, F. K. P., Mendis, P., & Aye, L. (2025). A novel circular economy framework: Assessing process circularity through resource flow and emissions analysis. *Resources, Conservation & Recycling*, 215, 108083. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108083>
- ◆ Pot, W. (2023). Deciding for resilience: Utilizing water infrastructure investments to prepare for the future. *WIREs Water*, 10(5), e1661. <https://doi.org/10.1002/wat2.1661>
- ◆ Pot, W. (2023). Deciding for resilience: Utilizing water infrastructure investments to prepare for the future. *WIREs Water*, 10(e1661). <https://doi.org/10.1002/wat2.1661>
- ◆ Rajput, J., Kushwaha, N., Sikka, A., Alam, M. F., Mahapatra, S., Sena, D., Singh, D. K., Sahoo, P. K., & Mani, I. (2024). Water accounting of groundwater over-exploited districts in Haryana and Punjab states to analyse impacts of water conservation measures on water availability. *Water Supply*, 24. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.201>
- ◆ Rajski, K., Englart, S., & Sohani, A. (2024). Analysis of greywater recovery systems in European single-family buildings: Economic and environmental impacts. *Sustainability*, 16(12), 4912. <https://doi.org/10.3390/su16124912>
- ◆ Rastogi, M., Kolar, S. M., Burud, A., Sadineni, T., Sekhar, M., Kumar, R., & Rajput, A. (2024). Advancing water conservation techniques in agriculture for sustainable resource management: A review. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 28(3), 41–53. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2024/v28i3755>.
- ◆ Ray, S., & Majumder, S. (2024). Water management in agriculture: Innovations for efficient irrigation. In *Modern Agronomy* (pp. 169–185). International Books & Periodical Supply Service.
- ◆ Saleh, T. A., Mustaqeem, M., & Khaled, M. (2021). Water treatment technologies in removing heavy metal ions from wastewater: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100617. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100617>
- ◆ Santamarta, J. C., Hernández-Alemán, A., Cruz-Pérez, N., Gamallo-Paz, I., Rodríguez-Martín, J., de Martín-Pinillos Castellanos, I., & García-Gil, A. (2024). Optimizing water sustainability: Revealing cost recovery strategies in the Canary Islands (Spain). *Environmental Processes*, 11(13), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40710-024-00692-9>
- ◆ Saravanan, A., Deivayanai, V. C., Senthil Kumar, P., Rangasamy, G., Hemavathy, R. V., Harshana, T., Gayathri, N., & Alagumalai, K. (2022). A detailed review on advanced oxidation process in treatment of wastewater: Mechanism, challenges and future

- outlook. *Chemosphere*, 308(Part 3), 136524. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136524>
- ♣ Sathya, K., et al. (2022). Review on wastewater treatment. *Applied Water Science*, 12. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01594-7>
 - ♣ Sawassi, A., Khadra, R., & Crookston, B. (2024). Water banking as a strategy for the management and conservation of a critical resource: A case study from Tunisia's Medjerda River Basin. *Sustainability*, 16(3875). <https://doi.org/10.3390/su16093875>
 - ♣ Sawassi, A., Khadra, R., & Crookston, B. (2024). Water banking as a strategy for the management and conservation of a critical resource: A case study from Tunisia's Medjerda River Basin (MRB). *Sustainability*, 16(9), 3875. <https://doi.org/10.3390/su16093875>
 - ♣ Sayan, R. C., Bilgen, A., & Kibaroglu, A. (2025). Towards water regionalism? Examining the linkages between water, infrastructures, and regionalism in Turkey. *International Journal of Water Resources Development*, 41(3), 540–562. <https://doi.org/10.1080/07900627.2024.2423743>
 - ♣ Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., Grafton, R. Q., Jobbagy, E., Kebede, S., Kolusu, S. R., Konikow, L. F., Long, D., Mekonnen, M., Müller Schmied, H., Mukherjee, A., MacDonald, A., Reedy, R. C., Shamsudduha, M., Simmons, C. T., Sun, A., Taylor, R. G., Villholth, K. G., Vörösmarty, C. J., & Zheng, C. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(2), 87–101. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00378-6>
 - ♣ Schulz, C., Wolf, L. J., Martin-Ortega, J., Glenk, K., & Gischler, M. (2024). Valuing water: A global survey of the values that underpin water decisions. *Environmental Science & Policy*, 153, 103685. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2024.103685>
 - ♣ Sharma, K., Nagabhooshanam, N., Dasi, S., J. G., Srinivas, B., Kaur, K., & Rajaram, A. (2024). Design and implementation of closed-loop water reuse systems in urban and industrial settings for maximizing resource recovery and minimizing waste. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100850. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100850>
 - ♣ Song, Y., Phipps, J., Zhu, C., & Ma, S. (2022). Porous materials for water purification. *Angewandte Chemie*. <https://doi.org/10.1002/ange.202216724>
 - ♣ Speer, M. S., Leslie, L. M., MacNamara, S., & Hartigan, J. (2021). From the 1990s climate change has decreased cool season catchment precipitation reducing river heights in Australia's southern Murray–Darling Basin. *Scientific Reports*, 11, 16136. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95531-4>
 - ♣ Starzak, R., Cieplik, A., Czerniawski, R. and Spyra, A. (2025), The Role of Artificial Lakes Located in Forests in the Context of Small Retention, Biodiversity and Climatic Changes—Evidence From Southern Poland. *Ecol Evol*, 15: e70775. <https://doi.org/10.1002/ece3.70775>
 - ♣ Suzuki, H., Araki, S., & Yamamoto, H. (2015). Evaluation of advanced oxidation processes (AOP) using O₃, UV, and TiO₂ for the degradation of phenol in water. *Journal of Water Process Engineering*, 7, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.04.011>
 - ♣ Taron, Avinandan; Singh, S.; Drechsel, Pay; Ravishankar, C.; Ulrich, Andreas. 2023. Sewage sludge: a review of business models for resource recovery and reuse. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). 98p. (Resource Recovery and Reuse Series 23) [doi: <https://doi.org/10.5337/2023.211>]
 - ♣ TaSaez Rojas, J. I., Pantoja, J. M., Matamala, M., Briceño, I. C., Vásquez, J. P., & Romero-Conrado, A. R. (2024). An IoT-based prototype for optimizing agricultural irrigation: A case study in the Biobío Region of Chile. *Procedia Computer Science*, 238, 1009–1014. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.127>



- ♣ Teo, C. J., Poinapen, J., Hofman, J. A. M. H., & Wintgens, T. (2025). *Assessing water dependencies and risks in Dutch industries: Distribution, consumption and future challenges*. *Water Resources and Industry*, 33, 100279. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2025.100279>
- ♣ Tocados-Franco, E., Martínez-Dalmau, J., Espinosa-Tasón, J., & Montilla-López, N. M. (2024). Trends in water-energy nexus and carbon emissions balance in Axarquía region, Spain, in the period 1990–2030. *Environmental Processes*, 11(11), 1–25. <https://doi.org/10.1007/s40710-024-00689-4>
- ♣ Toromade, A. S., Soyombo, D. A., Kupa, E., & Ijomah, T. I. (2024). Reviewing the impact of climate change on global food security: Challenges and solutions. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, 6(7), 1403–1416. <https://doi.org/10.51594/ijarss.v6i7.1300>
- ♣ Uddin, M. G., Nash, S., Rahman, A., & Olbert, A. I. (2022). A comprehensive method for improvement of water quality index (WQI) models for coastal water quality assessment. *Water Research*, 219, 118532. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118532>
- ♣ Udo, W. S., Ochuba, N. A., Akinrinola, O., & Ololade, Y. J. (2024). The role of theoretical models in IoT-based irrigation systems. *International Journal of Science and Research Archive*, 11(2), 600–606. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.11.2.0444>
- ♣ Uhlenbrook, S., Yu, W., Schmitter, P., & Smith, D. M. (2022). Optimising the water we eat—rethinking policy to enhance productive and sustainable use of water in agri-food systems across scales. *The Lancet Planetary Health*, 6(1), e59–e65. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00264-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00264-3)
- ♣ UNEP FI. (2021). *Demystifying Finance for Water: Risk and Return for Investors*. United Nations Environment Programme – Finance Initiative.
- ♣ UNEP. (2021). *Nature-Based Solutions for Wastewater Management in Rural India*. Nairobi, Kenya.
- ♣ UNEP. (2021). *Nature-Based Solutions for Wastewater Management*.
- ♣ UNEP. (2021). *Progress Report on Freshwater Ecosystems*.
- ♣ UNESCO & UN-Water. (2020). *The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. Paris: UNESCO.
- ♣ UNESCO & UN-Water. (2020). *WWDR 2020*.
- ♣ UNESCO & UN-Water. (2024). *The UN World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. UNESCO Publishing.
- ♣ UN-Habitat. (2022). *World Cities Report: Envisaging the Future of Cities*. Nairobi: UN-Habitat.
- ♣ United Nations. (2021). *System of Environmental-Economic Accounting: Ecosystem Accounting*. New York: United Nations.
- ♣ United Nations. (2021). *System of Environmental-Economic Accounting: Ecosystem Accounting*. New York: United Nations.
- ♣ UNSD. (2019). *Global Indicator Framework for SDG*. <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/database/>
- ♣ UN-Water. (2020). *Progress on SDG 6: indicator 6.4.2 - Level of water stress*. UN-Water.
- ♣ UN-Water. (2023). *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water*. UNESCO.
- ♣ Uptime Institute. (2022). *Data Center Water Usage Report*.
- ♣ Vahdanjoo, M., Sørensen, C. G., & Nørremark, M. (2025). Digital transformation of the agri-food system. *Current Opinion in Food Science*, 63, 101287. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2025.101287>
- ♣ Vanham, D., Alfieri, L., Flörke, M., Grimaldi, S., Lorini, V., de Roo, A., & Feyen, L. (2021). The number of people exposed to water stress in relation to how much water is reserved



- for the environment: A global modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 5(11), e766–e774. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00234-5](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00234-5)
- ♣ Vardon, M. J., Le, T. H. L., Martinez-Lagunes, R., et al. (2025). Accounting for water: A global review and indicators of best practice for improved water governance. *Ecological Economics*, 227, 108396. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108396>
 - ♣ Wada, Y., van Beek, L. P. H., van Kempen, C., Reckman, J. W. T. M., Vasak, S., & Bierkens, M. F. P. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37(20), L20402. 1
 - ♣ Wahid, N., Khairy, W., & Krause, R. (2024). Cost–benefit analysis on the implementation of nature-based treated wastewater reuse: Case of Sekem Farm El-Wahat, Egypt. *Discover Water*, 4(63). <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00121-w>
 - ♣ Wang, A.-J., Li, H., He, Z., Tao, Y., Wang, H., Yang, M., Savic, D., Daigger, G. T., & Ren, N. (2024). Digital twins for wastewater treatment: A technical review. *Engineering*, 36, 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.04.012>
 - ♣ Wartalska, K., Grzegorzec, M., Betcik, M., et al. (2024). The potential of rainwater harvesting systems in Europe – Current state of art and future perspectives. *Water Resources Management*, 38, 4657–4683. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03882-0>
 - ♣ Water Europe. (2024). Socio-economic study on the value of the EU investing in water. Brussels: WSP Group.
 - ♣ Water Europe. (2024). Strategic Water Challenges in Industrial Transformation.
 - ♣ Water Europe. (2024). Water Resilience in Strategic Industry.
 - ♣ Water Research Commission. (2021). Potable Reuse Implementation in eThekweni Municipality: Lessons and Policy Recommendations. Pretoria, South Africa.
 - ♣ Wheeler, S. A. (2022). Debunking Murray–Darling Basin water trade myths. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 66(4), 797–821. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12490>
 - ♣ Wheeler, S. A., Loch, A., Zuo, A., & Grafton, R. Q. (2020). Lessons to be learned from the Australian water market. In R. Q. Grafton (Ed.), *Handbook on Water Economics and Policy* (pp. 233–252). World Scientific.
 - ♣ WHO – World Health Organization. (2022). Water, sanitation and hygiene: Quantifying health impacts and cost-benefit. Geneva: WHO.
 - ♣ WHO. (2020). *Guidelines for Drinking-water Quality*. World Health Organization.
 - ♣ World Bank. (2022). Enhancing Urban Resilience in Lima through Nature-based Infrastructure: A Climate Adaptation Case Study. Washington, DC: World Bank Group.
 - ♣ World Bank. (2022). Financing Climate Action: How to Mobilize the Private Sector for Water. Washington, DC.
 - ♣ World Bank. (2023). Public-Private Partnerships for Water Resilience: Financing Strategies for Climate-Resilient Infrastructure. Washington DC.
 - ♣ World Bank. (2023). Resilient Cities and Water Security: Policy pathways and economic returns. Washington DC: World Bank Group.
 - ♣ World Bank. (2023). Wastewater management in a water-scarce world: Economic benefits and policy recommendations. World Bank Group.
 - ♣ World Economic Forum. (2011). Water security: The Water-Food-Energy-Climate Nexus. Island Press.
 - ♣ World Economic Forum. (2023). *Global Risks Report 2023*. Geneva: WEF.
 - ♣ World Resources Institute. (2022). Water reuse and climate mitigation: Reducing emissions through wastewater recycling. WRI Research Paper.
 - ♣ World Resources Institute. (2023, August 16). *1 in 4 People Face Extreme Water Stress. Here's What We Can Do*. World Resources Institute.
 - ♣ Wutich, A., Thomson, P., Jepson, W., Stoler, J., Cooperman, A. D., Doss-Gollin, J., Jantrania, A., Mayer, A., Nelson-Nuñez, J., Walker, W. S., & Westerhoff, P. (2023). MAD



water: Integrating modular, adaptive, and decentralized approaches for water security in the climate change era. *WIREs Water*, e1680. <https://doi.org/10.1002/wat2.1680>

- ♣ Yasin, Hajar Maseeh, Subhi R. M. Zeebaree, Mohammed A. M. Sadeeq, Siddeeq Y. Ameen, Ibrahim Mahmood Ibrahim, Rizgar R. Zebari, Rowaida Khalil Ibrahim, and Amira B. Sallow. 2021. “IoT and ICT Based Smart Water Management, Monitoring and Controlling System: A Review”. *Asian Journal of Research in Computer Science* 8 (2):42-56. <https://doi.org/10.9734/AJRCOS/2021/v8i230198>
- ♣ Zarei, S., Bozorg-Haddad, O., Kheirinejad, S., & Loáiciga, H. A. (2021). Environmental sustainability: A review of the water–energy–food nexus. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 70(2), 138–154. <https://doi.org/10.2166/aqua.2020.058>
- ♣ Zhang, K., Li, X., Zheng, D., et al. (2022). Estimation of global irrigation water use by the integration of multiple satellite observations. *Water Resources Research*, 58(3), e2021WR030031. <https://doi.org/10.1029/2021WR030031>
- ♣ Zubair, M. M., Saleem, H., & Zaidi, S. J. (2023). Recent progress in reverse osmosis modeling: An overview. *Desalination*, 564, 116705. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.116705>
- ♣ Zulkifli, C. Z., Garfan, S., Talal, M., Alamoodi, A. H., Alamleh, A., Ahmaro, I. Y. Y., Sulaiman, S., Ibrahim, A. B., Zaidan, B. B., Ismail, A. R., Albahri, O. S., Albahri, A. S., Soon, C. F., Harun, N. H., & Chiang, H. H. (2022). IoT-based water monitoring systems: A systematic review. *Water*, 14(22), 3621. <https://doi.org/10.3390/w14223621>

APPENDICE A: METODOLOGIA PER LA VALUTAZIONE COMPARATIVA SETTORIALE E TECNOLOGICA

A.1 Finalità

Questa appendice descrive il framework utilizzato per la classificazione comparativa delle principali soluzioni tecnologiche e settoriali nell'ambito della transizione verso sistemi idrici resilienti e circolari. L'approccio integra criteri ambientali, climatici, economici, operativi e territoriali, offrendo una base solida per analisi di:

- selezione strategica di investimenti (es. PNRR, PAC, REPowerEU);
- valutazioni ex ante in *project finance* pubblico-privato;
- *benchmarking* di tecnologie e modelli operativi;
- pianificazione integrata in scenari di stress idrico o transizione energetica.

La metodologia è coerente con il WR4ER Framework (Matthews et al., 2024), le raccomandazioni dell'OCSE (2022), e gli obiettivi ambientali della Tassonomia UE e del Green Deal europeo.

A.2 Struttura valutativa: criteri e classificazione

Ogni soluzione è valutata secondo cinque criteri qualitativi, su scala normalizzata 1–3. I criteri sono stati selezionati in base alla loro rilevanza per la resilienza sistemica e la transizione circolare.

Criterio	Descrizione	Fonti principali
Rischio operativo	Complessità gestionale, probabilità di guasti, maturità tecnologica	OECD, WR4ER, UNEP (2021)
Rischio climatico	Vulnerabilità a eventi estremi, dipendenza da fonti instabili	Liu et al., 2022; Haasnoot et al., 2013
Opportunità ambientali	Potenziale di riduzione di emissioni, prelievi, carichi inquinanti	ISO 14046; Water Europe (2024); Peydayesh & Mezzenga (2024)
Opportunità economiche	Ritorno economico netto, risparmi di costo, creazione di valore	Matthews et al., 2024; Pot (2023); OECD, 2022
Scalabilità territoriale	Adattabilità a diversi contesti socio-istituzionali e geoclimatici	UNEP, Arora & Mishra, 2022

Ogni valore è stato assegnato in base a evidenze qualitative, review comparative e casi studio esemplari (Singapore, Prato, Lima, Durban, ecc.).

Valori:

- 1 = condizione sfavorevole / critica;
- 2 = moderata / accettabile;
- 3 = favorevole / elevata resilienza o opportunità.

Per i **criteri di rischio**, è stato adottato un sistema di **trasformazione inversa** per renderli comparabili con gli altri (maggiore punteggio = condizione più favorevole):

$$v_i = 4 - r_i$$

dove r_i è il punteggio originario (1 = basso rischio → 3 = alto rischio) e v_i il valore convertito.

A.3 Due rappresentazioni, un'unica base dati

Il framework può essere rappresentato con due strumenti distinti, ma basati sugli **stessi valori di partenza**:

HEATMAP DESCRITTIVA

Una rappresentazione grafica a colori che consente:

- ♣ visibilità immediata delle differenze tra opzioni;
- ♣ comparabilità visuale non aggregata;
- ♣ utilità comunicativa per presentazioni e sintesi non tecniche.

Non applica pesi o formule. Ogni criterio ha uguale peso visivo.

MODELLO MULTICRITERIALE PONDERATO

Uno strumento decisionale analitico che:

- ♣ calcola un **punteggio sintetico totale** per ciascuna opzione;
- ♣ integra **pesi differenziati** per ogni criterio, in funzione della loro rilevanza strategica;
- ♣ produce un **ranking comparativo** utile per selezione progetti, policy design, e mix tecnologici.

A.4 Formule del modello ponderato

Il modello adotta una formula a **somma pesata lineare** (*Weighted Linear Combination – WLC*):

$$Punteggio\ Totale = \sum_{i=1}^n v_i \cdot w_i$$

dove:

- ♣ w_i è il **peso** del criterio “i” espresso in decimali (es. 0,15 per 15%). (vedi tabella in basso),
- ♣ v_i è il **valore normalizzato** della soluzione su quel criterio (scala 1–3 o trasformata) è attribuito a una tecnologia o soluzione per il criterio “i”,
- ♣ i : è un indice che varia da 1 a n (cioè, da 1 al numero totale di criteri considerati).
- ♣ $n=5$ il numero di criteri.

Pesi adottati nel modello

I pesi possono essere modificati per scenari specifici o derivati da processi partecipativi (AHP, Delphi, ecc.).

Critério	Peso (%)	Razionale
Rischio operativo	15%	Determina affidabilità gestionale e costi inattesi
Rischio climatico	15%	Rilevante in scenari ad alta incertezza climatica
Opportunità ambientali	30%	Coerenza con tassonomia UE e neutralità climatica
Opportunità economiche	25%	Generazione di valore e ROI sociale e privato
Scalabilità territoriale	15%	Fattore chiave per politiche replicabili e distribuzione equa dei benefici

Fonti per i pesi: OECD (2022), WR4ER Framework (Matthews et al., 2024), Pot (2023), EU Green Deal (2021).

A.5 Limiti e potenziali evoluzioni

Punti di forza:

- Trasparenza e tracciabilità logica;
- Adattabilità a diversi contesti settoriali o geografici;
- Coerenza con strumenti europei di valutazione ambientale e finanziaria (es. SFDR, SEEA-Water).

Limiti:

- Soggettività nell'attribuzione iniziale dei punteggi (necessita validazione esperta);
- Pesi fissi (non derivati da AHP o metodi partecipativi);
- Mancanza di criteri sociali espliciti (che possono essere integrati in modelli futuri).

Possibili sviluppi:

- Inclusione di criteri aggiuntivi (es. accettabilità pubblica, costo marginale);
- Derivazione dei pesi tramite processi Delphi o Analytic Hierarchy Process (Saaty, 1980);
- Digitalizzazione in dashboard interattiva per uso da parte di policy makers o multi-stakeholder panel.

APPENDICE B: METODOLOGIA PER LA DEFINIZIONE DELLA TIMELINE E DELLE INTERDIPENDENZE TEMPORALI SETTORIALI

B.1 Finalità e struttura analitica

La costruzione della roadmap temporale e della matrice settoriale delle interdipendenze si basa su un modello multicriteriale qualitativo–quantitativo, finalizzato a:

- identificare **azioni prioritarie e strategiche** nel tempo (2025–2027, 2028–2035, 2036–2050);
- valutare il **grado di coinvolgimento temporale dei principali settori** (agricoltura, industria, tecnologie, città, governance);
- garantire **consistenza logica** con i principali quadri di riferimento: SDG 6, Green Deal UE, Water Europe Vision 2050, strategie REPowerEU e WR4ER (Matthews et al., 2024).

B.2 Orizzonti temporali

Orizzonte temporale	Definizione operativa	Obiettivo strategico
Breve termine	2025–2027	Attuazione iniziale e consolidamento delle misure già avviate o pronte all'implementazione
Medio termine	2028–2035	Stabilizzazione infrastrutturale, riforma degli strumenti economici e governance territoriale
Lungo termine	2036–2050	Integrazione sistemica dell'acqua nei modelli climatici, industriali e territoriali

Questa struttura riflette il ciclo triennale e decennale di molte strategie UE e nazionali (PNIEC, Water4All, Horizon Europe).

B.3 Costruzione della roadmap settoriale

Le azioni previste per ciascun orizzonte sono state selezionate sulla base di:

- **maturità tecnologica** (Technology Readiness Level ≥ 7);
- **analisi costo-efficacia ex ante** (Water Europe, OECD, EIB);
- **fattibilità normativa e sociale**;
- **esperienze reali già in fase pilota o applicativa** (Singapore, Spagna, Australia, Paesi Bassi).

Per ogni azione è stato assegnato un set di **indicatori temporali** misurabili, normalizzati su base annuale.

B.4 Costruzione della tavola delle interdipendenze temporali

La **heatmap delle interdipendenze** tra settori è stata elaborata attribuendo a ciascun comparto un punteggio da **1 (debole)** a **3 (forte)** per ogni orizzonte temporale, secondo i seguenti criteri:

Punteggio	Significato operativo
1	Contributo marginale o posticipato
2	Ruolo progressivo e intermedio
3	Coinvolgimento immediato o sistemico



B.5 Limiti del modello e raccomandazioni

Il modello ha finalità strategiche e orientative, **non sostitutive** di analisi settoriali quantitative o modellistiche. Esso supporta:

- **programmazione multi-attore;**
- **comunicazione delle priorità di investimento;**
- **coordinamento temporale e territoriale.**

APPENDICE C: TOOLKIT OPERATIVO PER LA PROGETTAZIONE DI INTERVENTI RESILIENTI NEL CICLO IDRICO

Obiettivo

Fornire uno strumento sintetico ma strutturato per supportare la progettazione, il monitoraggio e il finanziamento di soluzioni idriche resilienti e circolari, coerenti con gli obiettivi dell'Agenda 2030, del Green Deal Europeo e delle strategie nazionali (PNIEC, PNRR, REPowerEU).

C.1 – Flowchart decisionale per l'identificazione di soluzioni prioritarie

Domanda guida	Indicazione operativa
Il territorio è soggetto a stress idrico cronico?	→ privilegiare soluzioni di riuso e gestione della domanda
Sono presenti fonti alternative (acque reflue, meteoriche)?	→ attivare circuiti di riutilizzo o stoccaggio
L'area è agricola, industriale o urbana?	→ vedere sezione C.2 per tipologie tecnologiche
Esistono barriere normative o economiche?	→ consultare sezione C.3 (strumenti di supporto)
È disponibile un partenariato tra enti locali e imprese?	→ attivare approccio Living Lab o PPP

C.2 – Mappa delle soluzioni circolari per settore

Settore	Soluzioni tecniche prioritarie	Benefici principali
Agricoltura	Riuso irriguo, fertirrigazione, MAR	Riduzione prelievi, risparmio fertilizzanti
Industria	MBR, cicli chiusi, simbiosi idrica	Efficienza, ESG, riduzione costi
Urbano	Raccolta acque piovane, fitodepurazione, smart metering	Riduzione perdite, resilienza sanitaria
Tecnologie avanzate	Raffreddamento a ciclo chiuso, uso di acque grigie	Continuità operativa, rating ambientale

C.3 – Check-list di progettazione integrata (multi-criterio)

Criteri ambientali

- Riduzione del prelievo da fonti convenzionali >30%
- Emissioni GHG evitate documentate (es. ETS, N₂O)
- Ricarica acquifera o riduzione dell'eutrofizzazione

Criteri economici



- LCC (Life Cycle Cost) positivo in <10 anni
- ROI atteso >7% con scenari di rischio inclusi
- Accesso a fondi (BEI, Horizon, Green Bond)

Criteri sociali e governance

- Coinvolgimento stakeholder marginali (6.B)
- Tariffazione equa e trasparente
- Meccanismi compensativi in caso di conflitti d'uso

C.4 – KPI e target orientativi (benchmark)

KPI	Soglia consigliata	Fonte
% di acqua riutilizzata sul totale trattato	>60%	Water Europe (2024)
Costo marginale evitato (€ per m³)	<1,5 €/m ³	OECD (2022)
GHG evitati per ettaro (riuso agricolo)	>1 tCO ₂ eq/ha	IWMI (2022)
Water Productivity (€ per m³)	>15 €/m ³ in industria	CDP (2023)

Documenti e standard di riferimento

- ISO 14046 – Water Footprint
- GRI 303 – Water and Effluents
- SEEA-Water – United Nations
- EU Regulation 2020/741 – Water reuse
- Water Resilience Framework – WR4ER (Matthews et al., 2024)

APPENDICE D: GUIDA ALLA SCELTA DELLE TECNOLOGIE PER IL TRATTAMENTO E IL RIUSO IDRICO

Questa guida supporta la selezione delle tecnologie più appropriate per il trattamento e il riuso dell'acqua in contesti industriali, agricoli e urbani, secondo un approccio multicriterio (MCDA) basato su indicatori tecnici, economici, energetici, scalari e normativi. La valutazione si basa su un set di cinque criteri qualitativi e considera le condizioni di contesto, i vincoli regolatori e le esigenze di circolarità.

D.1 Criteri di valutazione

Criterio	Descrizione
Efficienza di rimozione (E)	Capacità di abbattimento per parametri chiave (BOD, COD, nutrienti, microinquinanti)
Costi operativi (C)	Costi medi di esercizio (€/m ³) e manutenzione ordinaria
Consumo energetico (EN)	Energia specifica richiesta (kWh/m ³ trattato)
Scalabilità (S)	Flessibilità e replicabilità in diversi contesti dimensionali e territoriali
Barriere normative (B)	Complessità autorizzativa, vincoli regolatori e standard di riuso applicabili

Scala di valutazione: ★★★ = alto / favorevole ★★ = medio / intermedio ★ = basso / critico

Per i criteri **E** ed **S**, ★★★ indica un **vantaggio**.

Per i criteri **C**, **EN** e **B**, ★★★ indica una **criticità maggiore** (es. costi elevati, barriere complesse).

Tabella D.2 – Confronto multicriterio tra tecnologie

Tecnologia	Efficienza di rimozione (E)	Costi operativi (C)	Consumo energetico (EN)	Scalabilità (S)	Barriere normative (B)
Osmosi Inversa (RO)	★★★	★	★	★★	★★
Filtrazione a Membrana (UF, NF)	★★	★★	★★	★★	★★
Bioreattori a Membrana (MBR)	★★★	★	★	★	★
Ossidazione Avanzata (AOP)	★★★	★★	★★	★	★
Decantazione + Filtrazione a sabbia	★	★★★	★★★	★★★	★★★
Fitodepurazione / NBS	★	★★★	★★★	★	★★

Legenda

- RO = Reverse Osmosis

- UF/NF = Ultra-/Nano-Filtrazione
- MBR = Membrane Bioreactor
- AOP = Advanced Oxidation Processes
- NBS = Nature-Based Solutions

Le tecnologie ad alta efficienza (RO, MBR, AOP) sono adatte a contesti industriali con elevate esigenze di qualità ma richiedono supporto tecnico e normativo.

Le soluzioni tradizionali e nature-based sono più adatte a contesti rurali, agricoli o semi-urbani, dove la semplicità e la resilienza prevalgono.

Raccomandazioni d'uso

Contesto applicativo	Tecnologie consigliate	Note operative
Industria chimica e farmaceutica	RO, MBR	Richiedono pretrattamento e gestione fanghi
Agroindustria	UF/NF, NBS	Buon compromesso tra costi ed efficienza
Aree urbane decentralizzate	AOP, UF	Modulari e compatibili con contesti condominiali
Piccoli comuni e distretti agricoli	Fitodepurazione, sabbia	Gestibili a livello comunitario

D.3 Note metodologiche

- I punteggi derivano da **sintesi bibliografica**, dati tecnici da progetti pilota (es. RichWater, DEMOWARE) e **esperienze europee consolidate** (es. Spagna, Paesi Bassi, Singapore).
- Il sistema a stelle ha scopo **descrittivo e comparativo**, non produce ranking numerico.
- Per analisi approfondite, si raccomanda l'uso di modelli MCDA pesati o dashboard interattive.

D.4 Potenziali sviluppi futuri

- Integrazione di indicatori ambientali espliciti (carbon footprint, nutrient recovery, water circularity index).
- Aggiunta di criteri sociali (accettabilità pubblica, governance locale, co-benefici);
- Digitalizzazione in strumenti GIS o piattaforme decisionali (es. Water Europe Marketplace).

GLOSSARIO

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE E CONTESTO GLOBALE

- ♣ **WEI*** **Water Exploitation Index Plus:** misura il grado di stress idrico (>20% indica criticità).
- ♣ **Stress Idrico:** Situazione in cui la domanda supera la disponibilità locale di acqua dolce.
- ♣ **Water Footprint (WF):** Volume totale di acqua dolce utilizzata in un processo o per un prodotto (inclusa acqua virtuale).
- ♣ **SDG:** Sustainable Development Goals (Obiettivi di Sviluppo Sostenibile dell'ONU).
- ♣ **Acqua virtuale:** Quantità di acqua incorporata nei prodotti attraverso l'intero ciclo di produzione.

CAPITOLO 2 – FOCUS SETTORIALE: AGRICOLTURA, INDUSTRIA, REFLUI

- ♣ **Irrigazione a goccia:** Sistema di irrigazione ad alta efficienza che fornisce l'acqua direttamente alla zona radicale delle piante, riducendo al minimo le perdite per evaporazione e ruscellamento.
- ♣ **Subirrigazione:** Metodo di irrigazione che prevede il rilascio dell'acqua nel sottosuolo attraverso tubazioni porose, con un'erogazione localizzata e continua.
- ♣ **Acque grigie:** Reflui domestici provenienti da lavabi, docce e lavanderie; caratterizzati da un basso livello di contaminazione e dunque più facilmente trattabili e riutilizzabili.
- ♣ **Acque nere:** Reflui ad alta carica inquinante, provenienti da WC o da scarichi misti; richiedono trattamenti più complessi per essere recuperati.
- ♣ **MBR (Membrane Bioreattive):** Sistemi che combinano trattamenti biologici e filtrazione a membrana, permettendo un'efficace depurazione delle acque reflue fino a renderle idonee al riutilizzo.
- ♣ **SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition):** Sistema digitale di supervisione e acquisizione dati per il controllo remoto e automatizzato degli impianti idrici e di trattamento.
- ♣ **Simbiosi industriale:** Approccio che prevede l'integrazione tra industrie per condividere risorse idriche o energetiche, riducendo sprechi e migliorando l'efficienza complessiva dei sistemi produttivi.
- ♣ **Levelized Cost of Water (LCW):** Indicatore economico che rappresenta il costo medio per unità di acqua risparmiata o recuperata nel ciclo di vita di un impianto o tecnologia, utile per confronti tra alternative sostenibili.

CAPITOLO 3 – MISURARE L'EFFICIENZA IDRICA

- ♣ **KPI (Key Performance Indicator):** Indicatore chiave di performance utilizzato per misurare e monitorare l'efficacia di strategie ambientali, gestionali o tecnologiche nella gestione idrica.
- ♣ **Reuse Ratio:** Percentuale del volume totale di acque reflue trattate che viene effettivamente reimpiegato in usi agricoli, industriali o civili, riflettendo l'efficienza del sistema di recupero.
- ♣ **Water Intensity:** Quantitativo d'acqua impiegato per unità di prodotto realizzato (ad es. m³ per tonnellata), utile per analizzare la pressione idrica connessa ai processi produttivi.
- ♣ **Contabilità idrica:** Processo sistemico di registrazione e bilancio dei flussi idrici in ingresso, in uscita, dispersi e riutilizzati all'interno di un impianto, edificio o territorio, per supportare decisioni di ottimizzazione e sostenibilità.

- ❖ **Water Stress Index (WSI):** Indicatore che esprime il rapporto tra i prelievi annuali d'acqua e la disponibilità rinnovabile locale, utilizzato per quantificare il livello di stress idrico di una regione.
- ❖ **SEEA (System of Environmental-Economic Accounting):** Quadro contabile integrato promosso dalle Nazioni Unite che unisce dati economici e ambientali, incluso l'uso e lo stato delle risorse idriche, al fine di supportare politiche basate su evidenze.
- ❖ **AWS Standard (Alliance for Water Stewardship Standard):** Normativa internazionale che definisce principi e criteri per una gestione responsabile e sostenibile dell'acqua a scala di bacino idrografico, coinvolgendo stakeholder pubblici e privati.

CAPITOLO 4 – TECNOLOGIE E INNOVAZIONE

- ❖ **AOP (Advanced Oxidation Processes):** Processi avanzati di ossidazione che impiegano radicali liberi (es. •OH) per la degradazione di microinquinanti organici refrattari presenti nelle acque reflue.
- ❖ **UF / NF / RO:** Tecnologie di filtrazione a membrana – rispettivamente Ultrafiltrazione, Nanofiltrazione e Osmosi Inversa – con selettività crescente per la rimozione di particelle, sostanze disciolte e sali.
- ❖ **Osmosi inversa (RO):** Metodo di separazione spinta da pressione, utilizzato per rimuovere sali, metalli pesanti, contaminanti organici e altri soluti da acque dolci, salmastre o reflue.
- ❖ **Digital Twin:** Replica digitale dinamica e interattiva di una rete idrica o di un impianto, capace di simulare scenari operativi in tempo reale grazie all'integrazione con sensori, dati storici e modelli predittivi.
- ❖ **IoT (Internet of Things):** Infrastruttura tecnologica basata su dispositivi intelligenti e connessi in rete, che consente il monitoraggio, l'automazione e il controllo remoto di sistemi idrici.
- ❖ **Smart Metering:** Tecnologie di misura automatica dei consumi idrici tramite contatori intelligenti, abilitanti la lettura remota, il rilevamento di perdite e l'ottimizzazione della domanda.
- ❖ **Fitodepurazione:** Tecnica di trattamento ecologico delle acque reflue basata sull'azione depurativa di piante acquatiche e microrganismi in ambienti controllati come letti di vegetazione o zone umide artificiali.
- ❖ **Nature-Based Solutions (NBS):** Soluzioni infrastrutturali e gestionali ispirate ai processi naturali per migliorare la qualità dell'acqua, ridurre i rischi idrogeologici e aumentare la resilienza dei bacini idrografici ai cambiamenti climatici.
- ❖ **Modulari-Adattive-Decentralizzate (MAD):** Sistemi di trattamento idrico concepiti per essere facilmente scalabili, adattabili al contesto locale e installabili in modo distribuito, ideali per il trattamento in situ e la circolarità dell'acqua.

CAPITOLO 5 – ECONOMIA, STRUMENTI FINANZIARI E GOVERNANCE

- ❖ **Blended Finance:** Strumento finanziario che prevede la combinazione di capitali pubblici e privati per sostenere progetti di interesse pubblico, inclusi quelli nel settore idrico e ambientale.
- ❖ **PPP (Partenariato Pubblico-Privato):** Modello di cooperazione tra enti pubblici e attori privati finalizzato alla realizzazione, gestione o manutenzione di infrastrutture o servizi idrici.
- ❖ **Tariffazione progressiva:** Schema tariffario in cui il prezzo dell'acqua aumenta proporzionalmente al volume consumato, incentivando l'uso efficiente della risorsa e garantendo l'accesso equo.



- ♣ **Water ESG:** Integrazione della gestione sostenibile dell'acqua nei criteri di valutazione ambientale, sociale e di governance (Environmental, Social and Governance), utilizzati da investitori e imprese.
- ♣ **Adaptive Pathways:** Approccio di pianificazione dinamica e flessibile che consente di aggiornare strategie e investimenti in risposta a nuove condizioni climatiche, ambientali o socioeconomiche.
- ♣ **Water Banking:** Sistema di gestione che consente l'accumulo, la conservazione o il trasferimento virtuale di risorse idriche eccedenti tra utenti o territori, promuovendo flessibilità e resilienza.
- ♣ **Water Circular Economy Index (WCEI):** Indicatore composito che misura il livello di circolarità di un sistema idrico, valutando parametri come riuso, efficienza e riduzione delle perdite.
- ♣ **Net Water Value (NWW):** Valore economico netto associato all'utilizzo di un'unità d'acqua, considerando sia i benefici economici sia i costi ambientali e sociali correlati.

CAPITOLO 6 – RACCOMANDAZIONI, CASI STUDIO, STRATEGIE

- ♣ **Riuso fit-for-purpose:** Strategia di trattamento delle acque che adatta la qualità del refluo al tipo di utilizzo finale previsto (ad esempio agricolo, industriale o civile), evitando costosi e inutili sovratrattamenti.
- ♣ **Riuso potabile indiretto:** Tecnica avanzata che prevede l'immissione di acque reflue trattate in falde acquifere o bacini di accumulo, seguita da un ulteriore trattamento per renderle idonee al consumo umano.
- ♣ **Co-benefici:** Effetti positivi secondari, di natura ambientale, economica o sociale, che derivano da un intervento tecnico o politico concepito con finalità principali diverse (es. mitigazione climatica, rigenerazione urbana).
- ♣ **Positive Water District:** Modello urbano in cui un quartiere è progettato per essere autosufficiente dal punto di vista idrico e climatico, attraverso il riciclo, la raccolta di acque piovane e soluzioni basate sulla natura.
- ♣ **ZSC – Zero Stress Cities:** Città che implementano strategie integrate per eliminare lo stress idrico, aumentare la resilienza urbana e migliorare la sostenibilità attraverso pianificazione circolare, tecnologie intelligenti e gestione partecipativa delle risorse idriche.



INFORMAZIONI SULL'AUTORE E LICENZA

Titolo: Blu Shift – L'acqua nel XXI secolo

Strategie, tecnologie e modelli di governance per la resilienza idrica in un'epoca di cambiamenti sistemici.

Autore: Flavio Petricca Fondatore di *Pherkard Tech*

✉ flavio.petricca@pherkardtech.com

LICENZA D'USO

Questo report è distribuito con licenza:

Creative Commons Attribution–NonCommercial–ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

© 2025 Flavio Petricca / Pherkard Tech

È possibile **copiare, condividere, tradurre o adattare** il contenuto per scopi **non commerciali**, condizione di:

- ♣ fornire **attribuzione** all'autore,
- ♣ **non utilizzarlo a fini commerciali**,
- ♣ e condividere eventuali opere derivate con la **stessa licenza**.

Consulta la licenza completa: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>

Versione del documento: 1.0_Italiano

Data di pubblicazione: Giugno 2025

Redatto con il supporto di strumenti open source e AI generativa per la rifinitura redazionale.

