

IL POTENZIALE DELLE SOLUZIONI NATURALI E DELLA LORO COMBINAZIONE CON TRATTAMENTI CONVENZIONALI NEL TRATTAMENTO DEI REFLUI URBANI

Arianna Azzellino

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Entro il 2050, si prevede che il 68% della popolazione mondiale vivrà in contesti urbani e che la domanda di acqua per tutti gli usi aumenti del 20%-30% a causa della crescita demografica, dei cambiamenti nelle abitudini di consumo e delle maggiori richieste provenienti dai settori industriale e domestico (OCSE, 2015; United Nations, 2019). Queste pressioni sulla disponibilità d'acqua nelle città suscitano preoccupazione, perché nella maggior parte dei casi i modelli attuali di gestione dell'acqua urbana non tengono conto delle possibilità di riutilizzo in loco. In questo contesto, assumono particolare rilievo i sistemi decentralizzati di gestione della risorsa idrica (Decentralised Water System, DWS, Lu et al., 2019). I DWS promuovono infatti un cambiamento di paradigma, passando dal trattamento e dallo smaltimento secondo una logica lineare a un modello circolare che privilegia il trattamento di basse quantità d'acqua, il più vicino possibile alla fonte originale, promuovendo schemi di riutilizzo locale per scopi non potabili, riducendo così la pressione sull'approvvigionamento d'acqua potabile (Novotny and Brown, 2007; Nelson, 2008; Capodaglio et al., 2017). Inoltre, a differenza dei sistemi centralizzati, che comportano lunghi

percorsi per il trasporto delle acque reflue, reti di tubazioni ingenti e molte stazioni di sollevamento (Oliveira et al., 2021), la maggior parte dei DWS richiede costi strutturali inferiori e minori quantità di energia, grazie a reti di raccolta e distribuzione più piccole in grado di sfruttare meglio la gravità (Capodaglio et al., 2017).

La maggior parte delle tecnologie di trattamento delle acque reflue attualmente applicate nei sistemi centralizzati può essere implementata anche in contesti decentralizzati (Capodaglio et al., 2017). Diversi studi ne hanno infatti dimostrato la fattibilità, andando a implementare tecnologie avanzate come la filtrazione a membrana (Kümmerer et al., 2016), i processi avanzati di ossidazione ed elettrochimici (Otter et al., 2020), le tecniche di adsorbimento (Schumann et al., 2020) e i metodi di disinfezione (Alfiya et al., 2017) in sistemi decentralizzati. Queste tecnologie "grigie" sono altamente efficienti nella rimozione di una vasta gamma di contaminanti e possiedono un'impronta ecologica minore, agevolando la loro implementazione in contesti urbani dove lo spazio è limitato (Andersson et al., 2017). Tuttavia, in genere comportano un elevato consumo di energia e un considerevole costo



IdA



di manutenzione (Garrido-Cardenas et al., 2020). Inoltre, potendo causare la formazione di sottoprodotti tossici di disinfezione (come nitrosammine, bromato), residui di catalizzatori (es. nano-particelle di titanio) e residui di vario tipo a seconda della tecnologia selezionata, la loro sostenibilità ne può occasionalmente risultare inficiata (Jahan et al., 2021; Funke et al., 2021; Keyikoglu et al., 2021).

In questo contesto, il potenziale delle cosiddette “soluzioni naturali” (Nature-based solution, Nbs), come le zone umide artificiali (constructed wetlands, Capodaglio et al., 2017; Kobayashi et al., 2020), laghetti e lagune (Rizzo et al., 2020; Fiorentino et al., 2016), pareti (Svete, 2012; Masi et al., 2016; Fowdar et al., 2017) e tetti verdi (Zehnsdorf et al., 2019), è notevole, potendo queste tecnologie “verdi” facilitare il riuso locale dell’acqua nelle città. Infatti, oltre a garantire una serie di benefici ambientali e socio-economici (servizi ecosistemici come l’incremento della biodiversità o il miglioramento della qualità dell’aria), le tecnologie “verdi” sono economicamente convenienti, grazie al ridotto consumo energetico e ai bassi costi di implementazione e manutenzione (Fowdar et al., 2017; Zehnsdorf et al., 2019; Kobayashi et al., 2020).

È bene però anche ricordare come l’implementazione di alcune di queste soluzioni (wetlands e lagune) possa essere fortemente limitata a causa dalla loro richiesta di spazio che, specialmente nelle città con una densità di popolazione elevata e una bassa disponibilità di terreni, può costituire un limite molto difficile da aggirare (Cheng et al., 2018; Fiorentino et al., 2016). Soluzioni meno esigenti dal punto di vista della richiesta di spazio (come le pareti o i tetti verdi) offrono il vantaggio di sfruttare spazi non utilizzati nelle città come appunto le pareti vuote verticali e i tetti. Tuttavia, la maggior parte degli studi relativi a queste soluzioni sono stati condotti alla scala pilota, e in queste applicazioni la relazione tra la superficie richiesta e i tassi di carico idraulico/inquinante risulta spesso sottostimata. Inoltre, non tutte le aree disponibili potrebbero risultare adatte per ospitare tetti e pareti verdi. Ad esempio, potrebbero risultare in conflitto con altre strutture funzionali (ad esempio, finestre, balconi, pannelli solari, strutture per l’aria condizionata), essere limitate dalle condizioni strutturali (ad esempio, mancanza di pendenza adeguata, rinforzi o connessioni idriche necessarie) o essere soggette a vincoli legali legati alla modifica degli aspetti architettonici delle facciate. In generale, perciò le richieste di spazio e i requisiti di superficie possono ostacolare significativamente la diffusione di queste tecnologie per il riuso e la gestione dell’acqua nel contesto urbano. Inoltre, l’uso esclusivo di tecnologie verdi risente significativamente anche delle condizioni climatiche e potrebbe persino comportare un limite rispetto ai potenziali riutilizzi dell’acqua trattata, poiché non sempre riescono a garantire gli standard richiesti per il riuso in termini di carica batterica, microinquinanti ed emergenti (Arden and Ma, 2018).

Questo è uno dei motivi per cui le tecnologie combinate “verdi-grigie” possono rappresentare alternative interessanti per il trattamento dell’acqua in loco, potendo superare le limitazioni dell’uso delle tecnologie grigie o verdi singole nelle aree urbane. Le tecnologie “verdi” possono contribuire a ridurre i costi/energia e la formazione di sottoprodotti tossici (Castellar et al., 2022).

Le tecnologie CGGT (combinazione di tecnologie verdi e grigie) infatti potrebbero avere un grande potenziale nel facilitare schemi di trattamento decentralizzati nelle città, consentendo il recupero o il riuso dell’acqua, migliorando il trattamento dei contaminanti emergenti (con una miglior rimozione di composti bio-recalcitranti) ed eliminando prodotti o sottoprodotti tossici.

Per quanto il settore sia ancora in una fase iniziale di sviluppo, come si può dedurre dal numero relativamente basso di pubblicazioni disponibili per ciascuna configurazione tecnologica specifica, le principali ragioni per accoppiare tali tecnologie sembrano essere coerenti tra i diversi studi (Castellar et al., 2022).

Le tecnologie grigie sono solitamente utilizzate come prima fase di trattamento per rimuovere materiali recalcitranti e/o parametri microbiologici che possano essere poi ulteriormente rimossi nei sistemi verdi. In altre applicazioni le tecnologie grigie possono venir applicate come seconda fase di trattamento per rimuovere i patogeni che non sono stati eliminati attraverso le tecnologie verdi, e quindi soddisfare gli standard di riutilizzo sicuro.

Inoltre, la combinazione di tecnologie grigie compatte con tecnologie verdi economicamente convenienti potrebbe risultare particolarmente adatta in situazioni in cui la disponibilità di terreni è limitata ed è necessaria un’efficienza complessivamente elevata in termini di rimozione dei patogeni (batteri e virus) per garantire gli standard di riutilizzo per diverse finalità di recupero dell’acqua, compresi i riutilizzi potabili (Chen et al., 2011; Alves et al., 2012; Kümmerer et al., 2016; Pei et al., 2019).

In questo contesto, Arden e Ma (2018) e Wagner et al. (2020) hanno dimostrato come la combinazione di “wetland” con tecnologie avanzate come la radiazione ultravioletta, l’osmosi inversa, l’elettrodialisi o la ionizzazione capacitiva potrebbe essere una strategia adeguata a trattare le acque grigie mentre si soddisfano in modo affidabile gli standard di riutilizzo dell’acqua.

Le tecnologie verdi e grigie sono state ampiamente implementate, sia singolarmente che combinate, come unità di supporto in sistemi centralizzati/settoriali di trattamento delle acque reflue, sia per l’affinamento dell’effluente nelle centrali di trattamento delle acque reflue (Ahmed et al., 2008; Rizzo et al., 2020), sia per servire aree periurbane o rurali non coperte dalla rete fognaria (Li et al., 2021).

Bakheet et al. (2020), nella loro ricerca su un sistema di parete verde accoppiata al trattamento elettrochimico rappresentano il primo studio a esplorare una

tale combinazione offrendo un metodo affidabile ed ecologico per il riutilizzo delle acque grigie in sito. Altri esempi riguardano zone umide artificiali a flusso sotterraneo orizzontale e trattamenti di ozonizzazione per la rimozione dei residui di farmaci nelle acque reflue domestiche (Lancheros et al., 2019), oppure zone umide artificiali a flusso verticale mobile accoppiate con la filtrazione a membrana per il trattamento delle acque nere e grigie per il riutilizzo potabile (Lakho et al., 2020).

Il consolidamento delle conoscenze sulla promettente combinazione di queste tecnologie costituirà un passo importante per aumentare il loro potenziale impiego come soluzione alternativa alla gestione centralizzata dell'acqua nelle città. ■

Riferimenti bibliografici

- Ahmed, ., Popov V., Trevedi R.C., 2008. Constructed wetland as tertiary treatment for municipal wastewater. *Waste Resour. Manag.* 61, 77-84. <https://doi.org/10.1680/warm.2008.161.2.77>.
- Alfya Y., Friedler E., Westphal J., Olsson O., Dubowski Y., 2017. Photodegradation of micropollutants using V-UV/UV-C processes; Triclosan as a model compound. *Sci. Total Environ.* 601-602, 397-404. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.172>.
- Alves C.V.P., Chernicharo C.A.L., Von Sperling M., 2012. UV disinfection of stabilization pond effluent: a feasible alternative for areas with land restriction. *Water Sci. Technol.* 65, 247-253. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.363>
- Andersson E., Borgstrom S., Mcphearson T., 2017. Integrating the grey, green, and blue in cities: nature-based solutions for climate change adaptation and risk reduction. In: *Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions. Theory and Practice of Urban Sustainability Transitions*, pp. 91-109. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5>.
- Arden S., Ma X., 2018. Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: a review. *Sci. Total Environ.* 630, 587-599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.218>.
- Bakheet B., Prodanovic V., Deletic A., McCarthy D., 2020. Effective treatment of greywater via green wall biofiltration and electrochemical disinfection. *Water Res.* 185, 116228. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116228>.
- Capodaglio A.G., Callegari A., Cecconet D., Molognoni D., 2017. Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies. *Water Pract. Technol.* 12, 463-477. <https://doi.org/10.2166/wpt.2017.055>
- 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 (2022) 130660.
- Chen K.C., Wang Y.H., Lu Y.C., 2011. Treatment of polluted water for reclamation using photocatalysis and constructed wetlands. *Catal. Today* 175, 276-282. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2011.06.013>.
- Cheng D.L., Ngo H.H., Guo W.S., Liu Y.W., Zhou J.L., Chang S.W., Nguyen D.D., Bui X.T., Zhang X.B., 2018. Bioprocessing for elimination antibiotics and hormones from swine wastewater. *Sci. Total Environ.* 621, 1664-1682. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.059>.
- Fiorentino C., Mancini M., Luccarini L., 2016. Urban wastewater treatment plant provided with tertiary finishing lagoons: management and reclamation for irrigation reuse. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 91, 1615-1622. <https://doi.org/10.1002/jctb.4908>.
- Fowdar H., Hatt B.E., Breen P., Cook P.L.M., Deletic A., 2017. Designing living walls for greywater treatment. *Water Res.* 110, 218-232. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.12.018>.
- Funke J., Prasse C., Dietrich C., Ternes T.A., 2021. Ozonation products of zidovudine and thymidine in oxidative water treatment. *Water Res.* X 11, 100090. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2021.100090>
- Garrido-Cardenas J.A., Esteban-García B., Agüera A., Sánchez-Pérez J.A., Manzano-Agugliaro F., 2020. Wastewater treatment by advanced oxidation process and their worldwide research trends. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 17, 1-19. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010170>
- Jahan B.N., Li L., Pagilla K.R., 2021. Fate and reduction of bromate formed in advanced water treatment ozonation systems: a critical review. *Chemosphere* 266, 128964. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128964>.
- Keyikoglu R., Karatas O., Rezanian H., Kobya M., Vatanpour V., Khataee A., 2021. A review on treatment of membrane concentrates generated from landfill leachate treatment processes. *Separ. Purif. Technol.* 259, 118182. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118182>.
- Kobayashi Y., Ashbolt N.J., Davies E.G.R., Liu Y., 2020. Life cycle assessment of decentralized greywater

- treatment systems with reuse at different scales in cold regions. *Environ. Int.* 134. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105215>.
- Kümmerer K., Dionysiou DiD., Fatta-Kassinos D., 2016. Advanced treatment technologies for urban wastewater reuse. *Handb. Environ. Chem.* <https://doi.org/10.1007/698-2015-449>.
 - Lakho F.H., Le H.Q., Van Kerkhove F., Igodt W., Depuydt V., Desloover J., Rousseau D.P.L., Van Hulle S.W.H., 2020. Water treatment and re-use at temporary events using a mobile constructed wetland and drinking water production system. *Sci. Total Environ.* 737, 139630. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139630>.
 - Lancheros J.C., Madera-parra C.A., Caselles-osorio A., Torres-lópez W.A., Vargasramírez X.M., 2019. Ibuprofen and naproxen removal from domestic wastewater using a horizontal subsurface flow constructed wetland coupled to ozonation. *Ecol. Eng.* 135, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.05.007>.
 - Li X., Yang L., Xu K., Bei K., Zheng X., Lu S., An N., Zhao J., Jin Z., 2021. Application of constructed wetlands in treating rural sewage from source separation with high-influent nitrogen load: a review. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 37, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11274-021-03105-3>.
 - Lu Z., Mo W., Dilkina B., Gardner K., Stang S., Huang J.C., Foreman M.C., 2019. Decentralized water collection systems for households and communities: household preferences in Atlanta and Boston. *Water Res.* 167, 115134. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115134>.
 - Masi F., Bresciani R., Rizzo A., Edathoot A., Patwardhan N., Panse D., Langergraber G., 2016. Green walls for greywater treatment and recycling in dense urban areas: a case-study in Pune. *J. Water, Sanit. Hyg. Dev.* 342–347. <https://doi.org/10.2166/washdev.2016.019>.
 - Nelson V.I., 2008. New approaches in decentralized water infrastructure. In: Report, National Decentralized Water Resources Capacity Development Project. United States Environmental Protection Agency (EPA) and Water Environment Research Foundation (WERF). Cooperative Agreement No. X-830851.
 - Novotny V., Brown P., 2007. *Cities of the Future towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management*, first ed. IWA publishing, London.
 - OECD, 2015. In: *The Metropolitan Century Understanding Urbanisation and its Consequences*. OECD publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264228733-en>.
 - Oliveira G.A., Colares G.S., Lutterbeck C.A., Dell’Osbel N., Machado E.L., Rodrigues L.R., 2021. Floating treatment wetlands in domestic wastewater treatment as a decentralized sanitation alternative. *Sci. Total Environ.* 773, 145609. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145609>.
 - Otter P., Mette K., Wesch R., Gerhardt T., Krüger F., Goldmaier A., Benz F., Malakar P., Grischek T., 2020. Oxidation of Selected Trace Organic Compounds through the Combination of Inline Electro-Chlorination With UV Radiation (UV/ECl₂) as Alternative AOP for Decentralized Drinking Water Treatment, 12, pp. 1-19.
 - Pei M., Zhang B., He Y., Su J., Gin K., Lev O., Shen G., Hu S., 2019. State of the art of tertiary treatment technologies for controlling antibiotic resistance in wastewater treatment plants. *Environ. Int.* 131, 105026. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105026>.
 - Rizzo L., Gernjak W., Krzeminski P., Malato S., McArdell C.S., Perez J.A.S., Schaar H., Fatta-Kassinos D., 2020. Best available technologies and treatment trains to address current challenges in urban wastewater reuse for irrigation of crops in EU countries. *Sci. Total Environ.* 710, 136312. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136312>.
 - Schumann P., Ordoñez Andrade J.A., Jekel M., Ruhl A.S., 2020. Packing granular activated carbon into a submerged gravity-driven flat sheet membrane module for decentralized water treatment. *J. Water Proc. Eng.* 38 <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101517>.
 - Svete L.E., 2012. Master thesis. In: *Vegetated Greywater Treatment Walls : Design Modifications for Intermittent Media Filters*. Norwegian University of Life Sciences, Department of Mathematical Sciences and Technology, Norway. <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/188977>.
 - United Nations, 2019. Department of economic and social affairs, population division. In: *World Urbanization Prospects: the 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. United Nations, New York.
 - Wagner T.V., de Wilde V., Willemsen B., Mutaqin M., Putri G., Opdam J., Parsons J.R., Rijnaarts H.H.M., de Voogt P., Langenhoff A.A.M., 2020. Pilot-scale hybrid constructed wetlands for the treatment of cooling tower water prior to its desalination and reuse. *J. Environ. Manag.* 271, 110972. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110972>
 - Zehnsdorf A., Willebrand K.C.U., Trabitzsch R., Knechtel, S. Blumberg M., Müller R. A., 2019. Wetland roofs as an attractive option for decentralized water management and air conditioning enhancement in growing cities – a review. *Water*.