



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE



N. 1/2023



## Nel trattamento delle acque il massimo rispetto per l'ambiente

Da anni ci dedichiamo con passione  
allo sviluppo ed alla messa a punto  
di sistemi per la depurazione delle acque  
senza inquinare l'aria.

Ozono per ridurre i microinquinanti,  
ossigeno per eliminare gli aerosol per soluzioni  
a scala reale e sperimentazioni a cura del nostro  
laboratorio di biologia e chimica ambientale.

Gruppo SIAD.  
Technical gases, Engineering,  
Healthcare, LPG and Natural Gas.

[thesiadgroup.com](http://thesiadgroup.com)

The SIAD logo consists of a stylized green graphic of horizontal lines on the left, followed by the letters "SIAD" in a bold, green, sans-serif font.



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

## INDICE



VOL. 10  
NUM. 1  
2023

Ingegneria  
dell'Ambiente  
per il 2023  
è sostenuta da:



## WISE



### In copertina

- 3** Cambiamento climatico e drenaggio delle acque: recenti evidenze in Italia, strategie di progettazione e necessità di cambiamento  
*Giacomo Galimberti, Alessandro Balbo*

### Editoriale

- 10** Il riuso potabile delle acque reflue, fra utopia e realtà  
*Paolo Roccaro*

### Articoli

- 14** Rigenerazione di carboni attivi granulari (GAC) saturi da Pfas tramite irradiazione a microonde  
*Erica Gagliano, Yeakub Zaker, Cemre Birben, Pietro Paolo Falciglia, Tanju Karanfil, Paolo Roccaro*
- 23** IL Covid-19 e la gestione dei rifiuti sanitari in contesti a basso reddito: proposte per un quartiere informale di Maputo  
*Sofia De Giorgi, Mario Grosso, Francesca Villa*
- 42** Combinazione tra compostaggio e vermicompostaggio della FORSU: un caso studio siciliano  
*Gaetano Di Bella, Enrico Licitra, Antonino Laudani, Sabrina Milano, Laura Cozzo, Graziella Rabbeni, Maria Gabriella Giustra, Marco Gentile, Roberto Palumbo, Santo Castagna*

### Comunicazioni tecnico-scientifiche

- 56** Il riutilizzo delle acque reflue affinate: l'Italia è pronta a recepire il regolamento (UE) 2020/741?  
*Geneve Farabegoli*
- 63** Acque ad uso umano e contaminanti ubiquitari: Pfas e Bisfenolo A, dal testo della nuova direttiva ai test di laboratorio  
*Paola Verza, Francesca Faraon, Alessio Mattiazzo, Barbara Scantamburlo*

### Pubbliredazionali

- 67** Sonde e apparecchiature da campo CID per rilevare: COD, SST, tensioattivi, volume e velocità di sedimentazione dei fanghi
- 72** Il trattamento e recupero di solventi idrocarburici nelle acque reflue industriali farmaceutiche con estrazione a polimeri macro porosi (MPPE)

### Rubriche

- 76** Informazioni dalle aziende



**Direttore responsabile**Stefano Caserini (*Politecnico di Milano*)**Direzione scientifica**Stefano Caserini (*Politecnico di Milano*)Roberto Canziani (*Politecnico di Milano*)**Comitato scientifico**Manuela Antonelli (*Politecnico di Milano*)Arianna Azzellino (*Politecnico di Milano*)Vincenzo Belgiorno (*Università di Salerno*)Giorgio Bertanza (*Università di Brescia*)Alessio Boldrin (*DTU, Copenhagen, Danimarca*)Gianluigi Buttiglieri (*Catalan Institute for Water Research, Girona, Spagna*)Andrea Capodaglio (*Università di Pavia*)Alessandra Carucci (*Università di Cagliari*)Stefano Cernuschi (*Politecnico di Milano*)Raffaello Cossu (*Università di Padova*)Paola Crippa (*Università di Notre Dame, USA*)Giovanni De Feo (*Università di Salerno*)Massimiliano Fabbri (*Università di Napoli Federico II*)Francesco Fatone (*Università Politecnica delle Marche*)Elena Ficara (*Politecnico di Milano*)Paola Foladori (*Università di Trento*)Mario A. Gandini (*Univ. Aut. de Occidente, Cali, Colombia*)Grazia Ghermandi (*Università di Modena e Reggio Emilia*)Daniele Goi (*Università di Udine*)Mario Grosso (*Politecnico di Milano*)Giovanni Lonati (*Politecnico di Milano*)Claudio Lubello (*Università di Firenze*)Francesca Malpei (*Politecnico di Milano*)Salvatore Masi (*Università della Basilicata*)Giulio Munz (*Università di Firenze*)Salvatore Nicosia (*Università di Palermo*)Senem Ozgen (*Laboratorio Energia e Ambiente, Piacenza*)Eleonora Perotto (*Politecnico di Milano*)Francesco Pirozzi (*Università di Napoli Federico II*)Alessandra Poletti (*Università di Roma La Sapienza*)Raffaella Pomi (*Università La Sapienza, Roma*)Marco Ragazzi (*Università di Trento*)Ezio Ranieri (*Politecnico di Bari*)Enrico Remigi (*DHI, Merelbeke, Belgio*)Lucia Rigamonti (*Politecnico di Milano*)Paolo Roccaro (*Università di Catania*)Francesco Romagnoli (*Riga Technical Univ., Riga, Lituania*)Diego Rosso (*University of California, Irvine, USA*)Sabrina Saponaro (*Politecnico di Milano*)Elena Sezenna (*Politecnico di Milano*)Fabio Tatano (*Università di Urbino*)Sergio Teggi (*Università di Modena e Reggio Emilia*)Davide Tonini (*JRC Siviglia*)Vincenzo Torretta (*Università dell'Insubria*)Mentore Vaccari (*Università di Brescia*)Paola Verlicchi (*Università di Ferrara*)Gaspere Viviani (*Università di Palermo*)Maria Chiara Zanetti (*Politecnico di Torino*)**Comitato di redazione**

Stefano Cernuschi, Arianna Azzellino, Mario Grosso,

Giovanni Lonati, Lucia Rigamonti, Elena Sezenna

**Segretaria di redazione**

Loredana Alaimo

**Grafica e impaginazione**

Gianluca Soddu


**INGEGNERIA  
DELL'AMBIENTE**


N. 1/2023

**Copyright**

I testi sono pubblicati da Ingegneria dell'Ambiente con la licenza CREATIVE COMMONS Attribuzione – Non commerciale – Condividi allo stesso modo 3.0 Italia (CC BY-NC-SA 3.0 IT)

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/it/deed.it>

Chiunque è libero di:

- *Condividere* – riprodurre, distribuire, comunicare al pubblico, esporre in pubblico, rappresentare, eseguire e recitare questo materiale con qualsiasi mezzo e formato;
- *Modificare* – remixare, trasformare il materiale e basarsi su di esso per le sue opere;

alle seguenti condizioni:

- *Attribuzione* – Deve essere attribuita adeguatamente la paternità del materiale, fornendo un link alla licenza e indicando se sono state effettuate modifiche. È possibile realizzare queste condizioni in qualsiasi maniera ragionevole, ma senza suggerire che il licenziante avalli il modo in cui il materiale è usato.
- *Non Commerciale* – Non è possibile usare il materiale per scopi commerciali.
- *Stessa Licenza* – Se si trasforma il materiale o ci si basa su di esso, è fatto obbligo di distribuire il contributo così prodotto con la stessa licenza del materiale originario. Il licenziante non può revocare questi diritti fintanto che i termini della licenza sono rispettati.

**Editore**

COLORSHADE

di Cabrini Matteo M., Via Cristoforo Colombo, 7,  
20068 Peschiera Borromeo (MI), Italia.

- Redazione e pubblicità: Loredana Alaimo, Tel. 329.3126157, e-mail: [redazione@ingegneriadellambiente.net](mailto:redazione@ingegneriadellambiente.net)
- Registrata presso il Tribunale di Milano (n.108 del 21/3/2014)
- Per abbonamenti: Tel. 02.2847518, Fax 02.45482383, e-mail: [amministrazione@ingegneriadellambiente.net](mailto:amministrazione@ingegneriadellambiente.net)
- Per informazioni: Ing. Stefano Caserini, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (DICA), Sezione Ambientale, Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Tel. 02.23996414 – e-mail: [info@ingegneriadellambiente.net](mailto:info@ingegneriadellambiente.net)

Publicato on-line il 22 maggio 2023.

Finito di stampare in **maggio 2023**,

presso Colorshade di Cabrini Matteo M.,

Via Cristoforo Colombo, 7, 20068 – Peschiera Borromeo (MI)





**Fig. 1.** Riqualificazione parcheggio comunale via Vignee – via Spinada a Cucciago (CO) tramite de-impermeabilizzazione e rain-garden, WISE Engineering (2022). Da: Call for ideas per la selezione di interventi di adattamento e mitigazione ai cambiamenti climatici basati sull'impiego di SuDS Sustainable Drainage System, Regione Lombardia e ERSAF.

## CAMBIAMENTO CLIMATICO E DRENAGGIO DELLE ACQUE: RECENTI EVIDENZE IN ITALIA, STRATEGIE DI PROGETTAZIONE E NECESSITÀ DI CAMBIAMENTO

**Giacomo Galimberti, Alessandro Balbo**

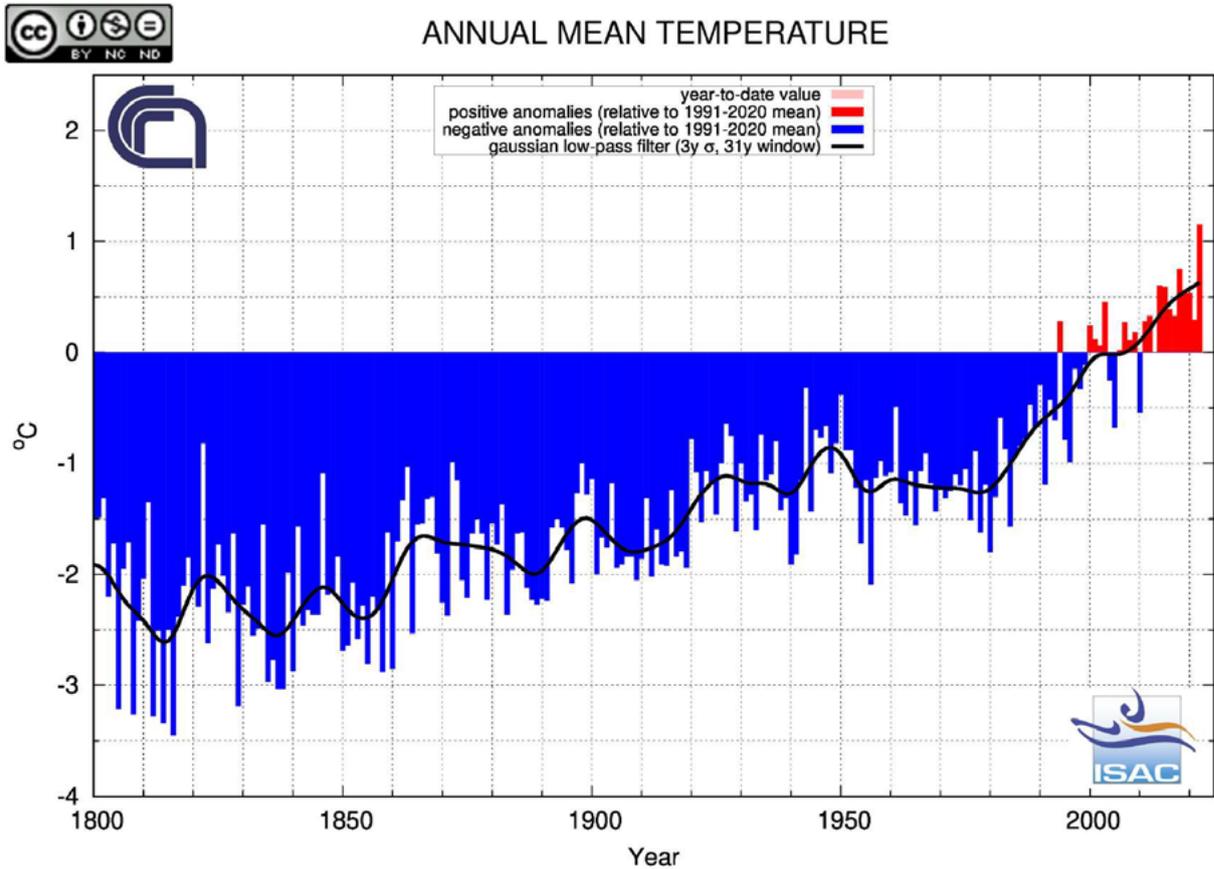
\* Wise Engineering srl

### 1. Effetti del cambiamento climatico

Il 2022 è stato un anno caratterizzato da caldo estremo e deficit di precipitazioni, tra i peggiori mai registrati in larga parte dell'Europa (Cat Berro e Mercalli, 2023). In particolare, secondo il gruppo di Climatologia storica dell'Istituto di scienze dell'atmosfera e del clima del Consiglio nazionale delle ricerche di Bologna

(Isac-Cnr, Brunetti et al., 2006), per l'Italia è risultato il più caldo e siccitoso dal 1800. Caldo e siccità hanno avuto pesanti ripercussioni sull'agricoltura, sulla produzione idroelettrica, sulla salute pubblica ed hanno anche causato, abbinati alle scarse precipitazioni nevose invernali, ingente fusione dei ghiacciai alpini. La siccità, le scarse nevicate e anomalie positive di temperatura impattano inoltre enormemente anche su interi comparti economici legati al turismo, basti pensare alle località sciistiche e a parchi acquatici. Nonostante la prolungata siccità,

\*Per info: WISE Engineering srl; Via Alcide De Gasperi 85, Rho (MI). [www.wisebenefit.it](http://www.wisebenefit.it); [info@wisebenefit.it](mailto:info@wisebenefit.it); Tel. 02.49412944.



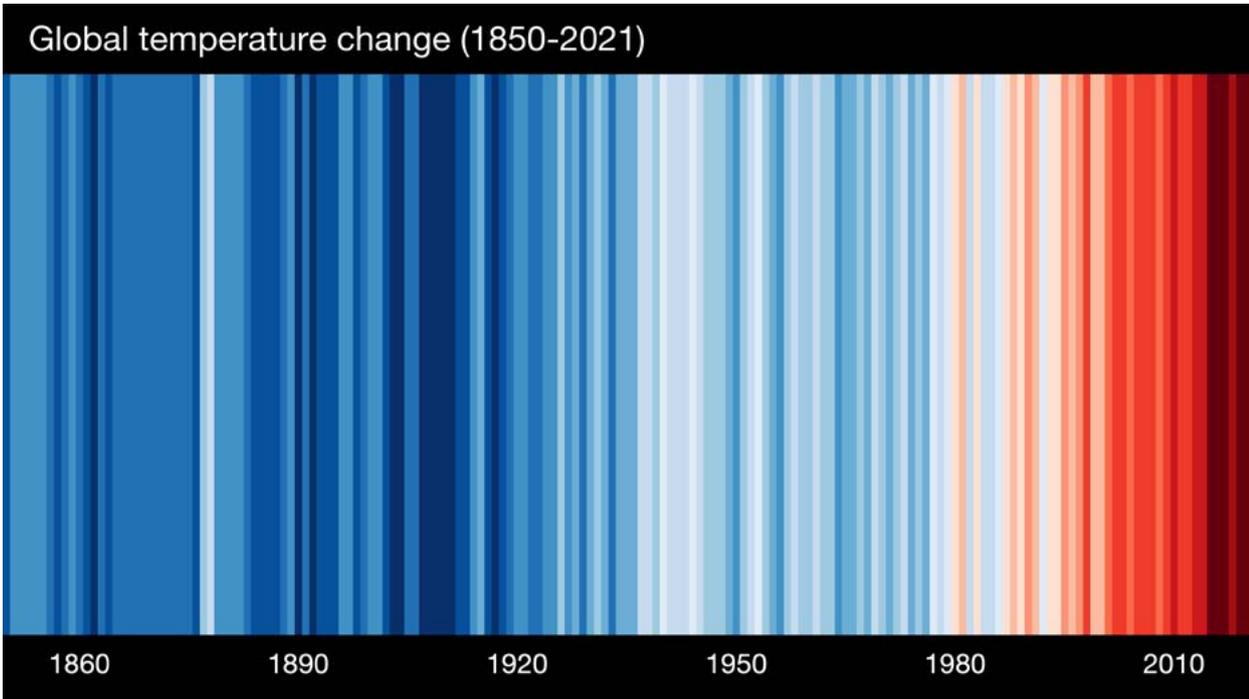
**Figura 2.** Serie CNR-ISAC delle anomalie termiche annue a scala nazionale in Italia, dal 1800 al 2022, risultato l'anno più caldo nella serie storica a partire dal 1800.

nello scorso anno non sono neppure mancati eventi temporaleschi estremi, quali i rovinosi nubifragi alluvionali del 15 settembre nelle Marche e del 26 novembre sull'isola di Ischia.

Anche il primo trimestre del 2023 è stato caratterizzato da temperature sopra la media e da un elevato deficit di pioggia. Le risorse idriche nivali accumulate in Italia nella stagione invernale 2022-2023 risultano circa la metà rispetto a quelle dell'anno precedente, che già aveva creato situazioni critiche per i fiumi, gli ecosistemi e gli utilizzi antropici.

Vari studi di attribuzione meteorologica, la branca della climatologia che indaga i rapporti tra il cambiamento climatico e specifici eventi meteorologici, hanno riscontrato il legame tra i valori estremi di caldo e siccità e i cambiamenti climatici indotti dal riscaldamento globale antropogenico (Dominik e Schumacher, 2023; Faranda, 2023). Per quanto attiene alle precipitazioni, per l'Italia si evidenzia una tendenza generalizzata su tutto il territorio nazionale all'aumento in frequenza ed intensità dei fenomeni di precipitazione estrema, non solo in scenari di elevato cambiamento climatico, ma anche in scenari con cambiamento climatico più contenuto (Spano et al., 2020). Gli studi con-

dotti nell'ambito del progetto ClimaMI, inserito nel report "Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in sei città italiane" della fondazione CMCC Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (Spano et al., 2021) evidenziano ad esempio per l'ambito urbano milanese un trend di diminuzione del numero di giorni piovosi (-1 giorno ogni 4 anni) e un parallelo aumento dell'intensità di pioggia (+1 mm/h ogni 6 anni). Non solo eventi di precipitazione intensa, ma anche le caratteristiche geografiche e idrogeologiche del territorio, unite all'urbanizzazione, sovente in aree alluvionali, e al consumo ed impermeabilizzazione dei suoli, rendono le città particolarmente esposte al rischio climatico (Amanti et al., 2023), sia per allagamenti da corsi d'acqua, che per insufficienza delle reti di drenaggio. Nel Rapporto sul Dissesto Idrogeologico in Italia, i ricercatori dell'Ispra mostrano che in Italia sono ben 7423 i comuni con aree a pericolosità idraulica media, aree a pericolosità da frana elevata e molto elevata e con aree soggette ad erosione costiera, pari all'94% del numero totale dei comuni italiani. La popolazione italiana soggetta ad alluvioni è pari a oltre 8,6 milioni di abitanti (Trigila et al., 2021).



**Figura 3.** Data visualization del cambiamento climatico: le “warming stripe” di Ed Hawkins, University of Reading, mostrano l’aumento della temperatura annuale media globale negli ultimi 170 anni con scala di colori dalle temperature più basse (blu) alle più alte (rosso).

## 2. Necessità di ripensare alle strategie di gestione delle acque e Nature Based Solutions

In questo contesto, e tenendo conto degli scenari futuri, appare evidente come gli approcci e le metodologie adottate in passato per far fronte alla mitigazione del rischio geo-idrologico e per la gestione delle acque non siano più adeguati ed anzi debbano essere ripensati in profondità. Approcci settoriali e disgiunti, che ripropongono la storica separazione delle competenze e professionalità, così come la frammentazione e le barriere tra gli Enti in funzione degli usi della risorsa idrica e dei territori e ambiti di applicazione, non sembrano più sufficienti ed efficaci. Occorre invece adottare nuovi approcci e nuove soluzioni, integrando tra loro competenze diverse, hard e soft engineering per infrastrutture grigie e verdi e blu al fine di costruire sistemi resilienti e tenere conto del cambiamento climatico.

A tal fine, la “soft engineering” adotta soluzioni naturali ingegnerizzate (nature-based solutions, green and blue infrastructures) per gestire il drenaggio urbano e sfruttare i diversi servizi ecosistemici da esse fornite (Huber, 2010):

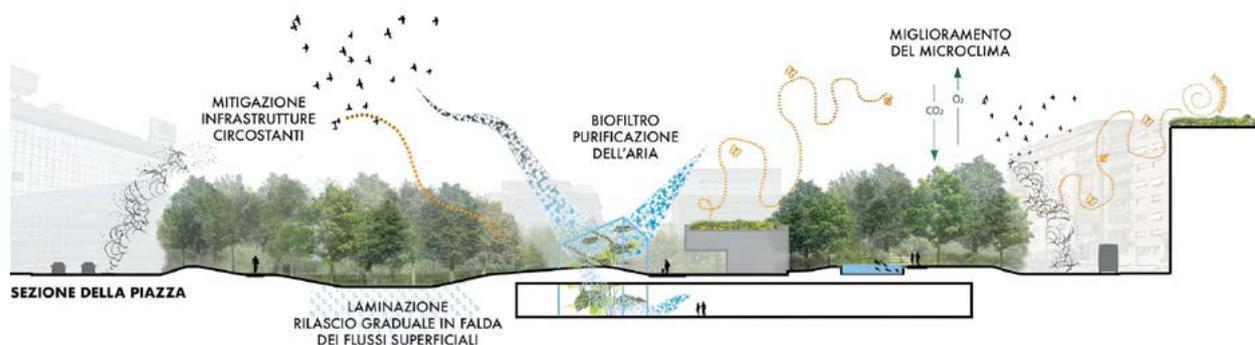
- regolazione atmosferica;
- regolazione climatica;
- regolazione idrica e recupero delle acque;
- controllo dell’erosione e trattenimento dei sedimenti;
- bilanciamento cicli dei nutrienti;

- riduzione carico inquinante sfruttando i processi naturali;
- pollinazione;
- aumento biodiversità;
- produzione di biomasse e formazione di suolo;
- aumento aree ricreative;
- educazione ambientale.

Le soluzioni e i progetti occorre che siano multi-obiettivo e multilivello, che mirino ad obiettivi di diminuzione del rischio idraulico, insieme alla riqualificazione fluviale e alla rigenerazione urbana, migliorando al contempo la fruizione, la salute e la qualità della vita e degli spazi. Ogni progetto e intervento, alle diverse scale e in funzione dell’ambito e delle fonti di finanziamento, dovrebbero ambire a contribuire alla mitigazione e all’adattamento ai cambiamenti climatici, fornendo un impatto positivo sull’ambiente, sul territorio e sulle comunità.

Elemento chiave è l’adozione di soluzioni “nature based” (NBS), in grado di fornire anche servizi ecosistemici per migliorare la gestione dell’acqua meteorica e di contribuire, nelle città, a mitigare l’effetto isola di calore e a creare ambienti vivibili per la collettività. Le NBS si sono diffuse nel Regno Unito dagli anni ’90, per poi diffondersi in Europa, Stati Uniti ed Australia.

Adottare sistemi NBS nei sistemi di drenaggio significa abbandonare la logica incentrata sui dispositivi tradizionali di raccolta, allontanamento rapido delle acque di pioggia e scarico nei fiumi, quali recettori finali, per passare invece a sistemi di drenaggio soste-



**Figura 4.** Esempio di riqualificazione urbana tramite nature based solution con drenaggio sostenibile e servizi ecosistemici.

*Fonte.* Competizione Reinventing Cities “Una piazza per Loreto”, Bunch studio associato di architettura con Wise Engineering per il drenaggio urbano sostenibile (2021).

nibile, che prevedono l’intercettazione e l’infiltrazione delle acque in maniera localizzata e diffusa, con alleggerimento delle reti di fognatura e dei reticoli superficiali, tramite l’impiego di varie soluzioni, che comprendono l’impiego di depressioni superficiali, piante, pavimentazioni permeabili, sistemi di raccolta e riutilizzo o infiltrazione delle acque piovane.

Esempi virtuosi di tali soluzioni iniziano ad essere sempre più diffusi anche in Italia, sulla scorta di alcuni interventi significativi, recentemente realizzati o in corso di sviluppo, anche grazie ai finanziamenti legati al PNRR.

Nel panorama nazionale particolare spinta all’impiego di NBS è stata data in Regione Lombardia, tramite la Legge Regionale 4/2016 “*Revisione della normativa regionale in materia di difesa del suolo, di prevenzione e mitigazione del rischio idrogeologico e di gestione dei corsi d’acqua*” e dal successivo Regolamento Regionale 7/2017 sull’invarianza idraulica e idrologica. Sono quindi stati finanziati progetti di de-impermeabilizzazione e rinverdimento di aree pubbliche per la mitigazione e l’adattamento ai cambiamenti climatici per ripristinare la permeabilità dei suoli e aumentare le superfici urbane coperte da vegetazione, tramite apposita linea di finanziamento ai Comuni con dotazione pari a 5 milioni di euro.

Tra i progetti virtuosi si citano ad esempio:

- Milano città spugna: piano di interventi, finanziato dal PNRR, sviluppato da Città Metropolitana di Milano con il gestore del Servizio Idrico Integrato Cap Holding, per contrastare il cambiamento climatico tramite 90 interventi in 32 comuni, per un investimento di 50 milioni di euro; l’obiettivo è rinforzare l’ecosistema della Città metropolitana di Milano, favorendo l’assorbimento dell’acqua piovana e riducendo i danni economici e ambientali delle piogge intense, stimolare la riqualificazione e la vivibilità degli spazi con il contenimento delle isole di calore e sostenere la biodiversità.

- La Magnifica Fabbrica della Scala: concorso internazionale di progettazione del Comune di Milano per la creazione della nuova sede dei laboratori e dei depositi del teatro alla Scala e per l’ampliamento del parco della Lambretta, con gestione sostenibile delle acque tramite NBS e valorizzazione ambientale di un’area urbana e periferiale oggi dismessa.
- Facciamo fiorire l’acqua, intervento di rigenerazione urbana di un’intera strada a Bovisio Masciago, in provincia di Monza Brianza, sviluppato dal gestore del Servizio Idrico BrianzaAcque tramite l’utilizzo di sistemi di drenaggio sostenibile (SuDS) per la creazione di un’infrastruttura verde e blu lungo l’asse viario principale del centro cittadino.

### 3. Un cambiamento radicale, sempre più urgente

Il cambio delle tecnologie adottate per la gestione delle acque e la mitigazione del rischio geo-idrologico tramite l’introduzione di soluzioni *nature based* in luogo dei sistemi idraulici tradizionali non è tuttavia sufficiente, perché la sfida data dal rischio climatico richiede ben più di un cambio tecnologico.

A valle dei dati analizzati fin qui, infatti, risulta evidente l’urgenza sempre più pressante di un cambio di paradigma non solo nel mondo della progettazione ingegneristica, ma più in generale nel tessuto sociale, formativo e produttivo del nostro Paese. Inoltre, la comunicazione e il coinvolgimento di tutti gli strati della popolazione risultano di fondamentale importanza affinché le varie soluzioni tecnologiche e di policy siano realmente efficaci. È sicuramente necessario, infatti, che il mondo dell’ingegneria rivoluzioni le sue pratiche di lavoro, affiancando, come detto, all’hard engineering anche tecniche ed approcci soft engineering; ma, proprio in virtù della necessità di lavorare e ragionare in maniera più “olistica”, a questo cambiamento deve essere associata una parallela visione inte-

grata e multidisciplinare da parte di tutti gli attori coinvolti: la Pubblica Amministrazione, che si trova a dover gestire gli interventi, l'Università, che ha il fondamentale compito di formare i professionisti di domani, e la cittadinanza tutta, che deve essere più coinvolta e consapevole delle criticità e sfide ambientali e climatiche che sempre più incidono sulla quotidianità.

A livello di mercato, qualche passo si sta muovendo, anche sul piano nazionale, non solo in campo ingegneristico e progettuale, ma anche nell'evoluzione del concetto stesso di Azienda, che inizia a valutare la possibilità di perseguire più obiettivi insieme. Uno degli aspetti più interessanti degli ultimi anni è il dato di crescita del numero di Società Benefit in Italia dal 2018 a oggi; risulta evidente, infatti, una chiara attenzione crescente per questa tipologia di impresa. Le Società Benefit operano sul mercato con le stesse finalità di crescita economica di tutte le altre imprese profit, ma con una particolare attenzione anche al beneficio per le comunità e l'ambiente. Questo è il segnale della consapevolezza emergente della necessità di un modo diverso di fare business, che incorpora al suo interno anche l'attenzione verso l'ambiente e la società.

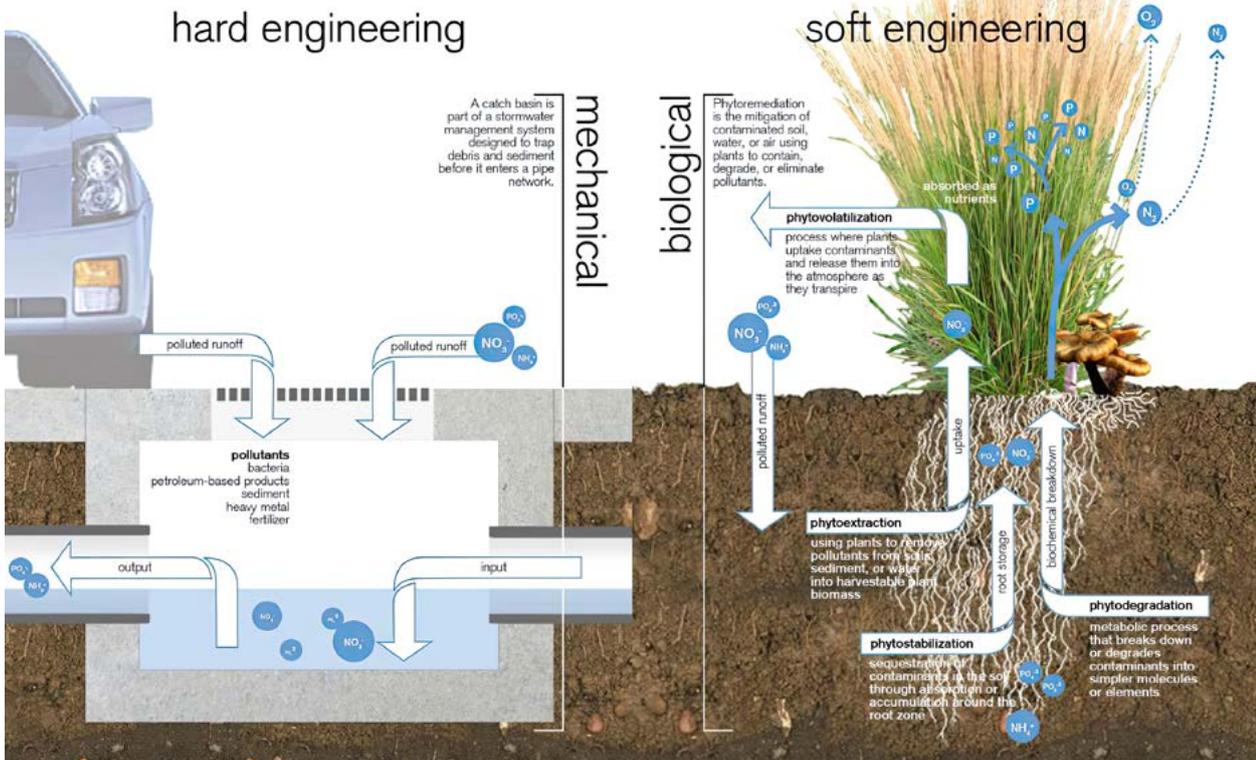
Nel settore di nostro interesse, per il contrasto al dissesto geo-idrologico e per la gestione della risorsa idrica, è chiaro come ogni progettazione debba necessariamente incorporare le ultime soluzioni e tecnologie

disponibili, ma diventa fondamentale che sia anche attenta e rispettosa dell'ambiente e del tessuto sociale circostante, che porti un "beneficio" ulteriore, appunto. Gli interventi che riguardano il servizio idrico integrato e i corsi d'acqua coinvolgono la risorsa comune più preziosa, necessaria per le attività umane, per la vita e la tutela degli habitat.

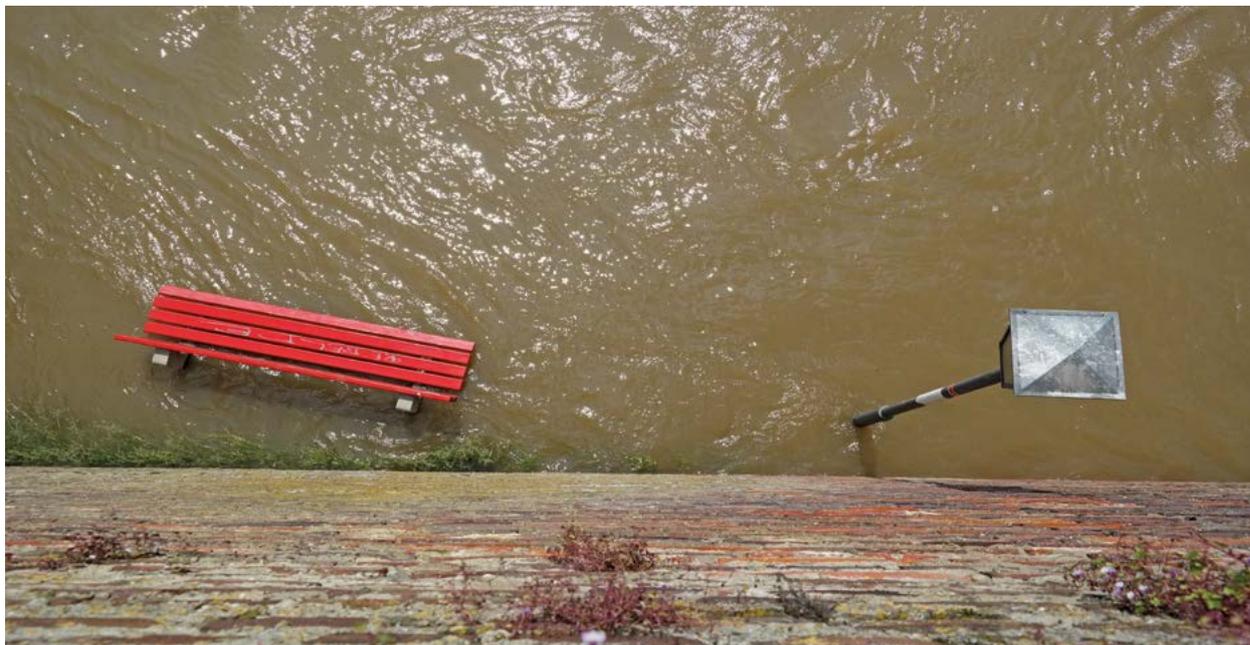
Alcune realtà nel mondo dell'ingegneria si stanno muovendo nella creazione di maggiore consapevolezza sui temi del cambiamento climatico e del dissesto idrogeologico utilizzando meccanismi di *Citizen Science*, ad esempio per il monitoraggio della pioggia, dei livelli di fiumi e laghi, per la qualità delle acque e per il contenuto di umidità del terreno (Buytaert et al., 2014).

La Citizen Science, inserita nel 2014 nella lista delle nuove parole del dizionario Oxford English, è definita come "la raccolta e l'analisi di dati relativi al mondo naturale da parte di un pubblico, che prende parte a un progetto di collaborazione con scienziati professionisti", con benefici per entrambe le parti, in termini di disponibilità e di raccolta dati (per i ricercatori) e di sviluppo e apprendimento di nuove conoscenze (per i cittadini).

Un progetto, sviluppato dagli scriventi, che mostra come l'ingegneria abbia già iniziato a muovere i primi passi verso una progettazione diversa, integrata, che guarda alle problematiche ambientali con approccio multi-obiettivo e multidisciplinare, coinvolgendo –



**Figura 5.** Confronto tra Hard Engineering e Soft Engineering in termini di processi per la riduzione dei carichi inquinanti generati. *Fonte.* Huber, J., 2010. Low Impact Development: a Design Manual for Urban Areas



e quindi sensibilizzando – anche la società, è ad esempio Cithyd (Citizen Hydrology). Il progetto è stato selezionato tra i progetti finalisti a Seeds&Chips 2018, The Global Food Innovation Summit, in collaborazione con il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), nell’ambito del focus sull’acqua “WaterFirst!”. Grazie allo sviluppo di un’applicazione e di un sito internet dedicato, viene promosso il coinvolgimento dei cittadini nel monitoraggio dei corsi d’acqua e dei fiumi. L’applicazione funziona grazie al contributo di volontari che, in autonomia, dai propri smartphone, possono consultare e inviare gratuitamente i livelli dei fiumi tramite la piattaforma, acquisendo consapevolezza

dei rischi alluvionali legati alle piene e ai rischi legati alla siccità e alla scarsità della risorsa idrica (Galimberti e Balbo, 2017). La piattaforma compie quindi alcuni semplici controlli per evitare l’inserimento di dati palesamenti errati, mentre la bontà dei valori inseriti può essere controllata e verificata da specifici utenti che collaborano attivamente al Progetto.

Per citare anche un esempio europeo, la piattaforma CrowdWater (Etter et al., 2018), sviluppata dall’Università di Zurigo, si occupa di investigare modalità e strumenti per il coinvolgimento della cittadinanza nel monitoraggio e aggregazione di diversi dati relativi ai corpi idrici, promuovendo l’engagement degli utenti con gio-

Le società Benefit: il trend annuale

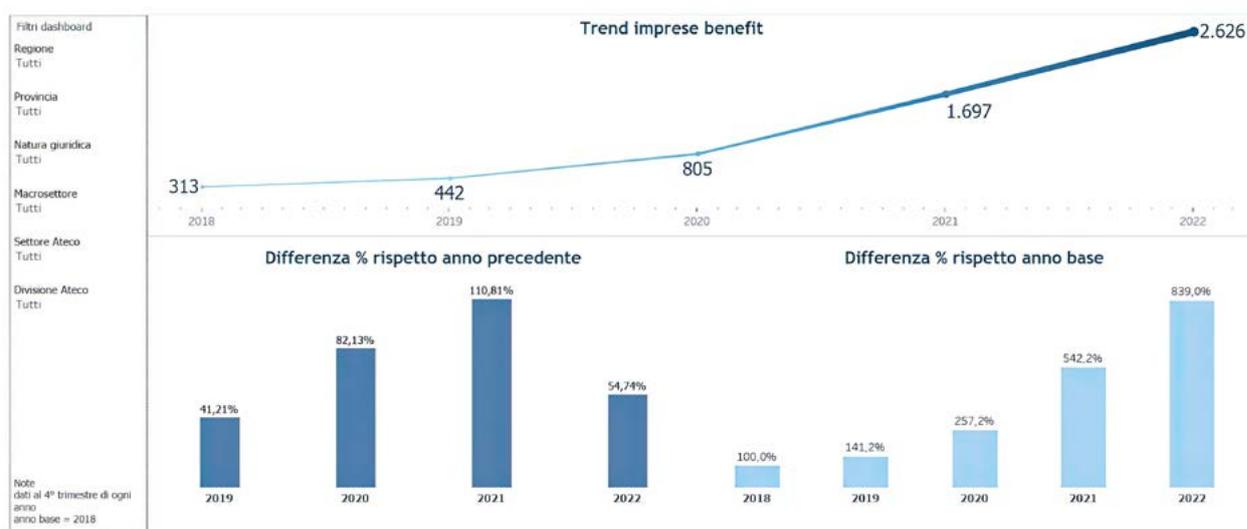


Figura 6. Dato di crescita delle Società Benefit in Italia dal 2018 al 2022. Fonte: estratto dalla piattaforma dedicata alle Società Benefit, Camera di Commercio di Taranto.



chi e concorsi. Gli studi condotti nell'ambito del progetto hanno mostrato anche l'importanza dei dati raccolti dai cittadini per la taratura dei modelli numerici di simulazione idrodinamica delle correnti fluviali.

Per rafforzare ulteriormente il messaggio di quanto il clima e i problemi legati all'approvvigionamento idrico siano questioni urgenti e che riguardano tutta la collettività è, però, essenziale che la comunicazione e i mass media si adattino efficacemente e con rapidità al cambio di prospettiva, progettando nuovi mezzi e vie per raggiungere target molto più ampi.

L'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), partendo dalla constatazione che comunicare i cambiamenti climatici in modo comprensibile e coinvolgente non è affatto semplice, ha recentemente prodotto un manuale di comunicazione per coinvolgere e informare il pubblico sui cambiamenti climatici (Corner et al., 2018). Uno dei principi chiave individuati nel manuale chiarisce l'importanza di intervenire in contesti e con esempi che tocchino il quotidiano di ciascuno di noi, in considerazione anche del fatto che c'è una

spaccatura sempre più forte tra le generazioni, e la crisi climatica – anche a causa di atti dimostrativi spesso controproducenti – è troppo spesso percepita come di solo interesse delle generazioni giovani e future.

Nei progetti che si portano avanti sui territori, ad esempio, è importante non solo inserire interventi a beneficio della collettività, ma anche organizzare momenti di condivisione degli obiettivi e dei risultati in cui alle persone venga spiegata la necessità e l'importanza di quel dato intervento.

Affrontare con efficacia la crisi climatica impone quindi l'adozione di un approccio integrato, multidisciplinare, che unisca progettisti, Pubblica Amministrazione, Università, scuole e mass media nell'adottare soluzioni condivise, sviluppate con il contributo e la partecipazione di tutti gli attori coinvolti. La mitigazione e l'adattamento al cambiamento climatico richiedono tecniche e metodologie progettuali innovative, che devono però essere inserite in un contesto più ampio, a tutte le scale, con modelli che coinvolgono aziende e comunità. ■

## Riferimenti bibliografici

- Amanti M. et al, 2014, “Eventi Estremi di Precipitazione e Criticità Geologico-Idrauliche nell'area Urbana della Capitale”, Focus sulle città e la sfida dei cambiamenti climatici, p. 171, ISPRA.
- Brunetti M., Maugeri M., Monti E., Nanni T., 2006, “Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenized instrumental time series”, *International Journal of Climatology*, 26, 345-381.
- Buytaert W., et al., 2014, “Citizen science in hydrology and water resources: opportunities for knowledge generation, ecosystem service management, and sustainable development”. *Frontiers in Earth Science*, 2 (26), 1–21.
- Cat Berro D. e Mercalli L., 2023, “L'anno più caldo e secco in oltre due secoli in Italia, il secondo più caldo in Europa”, Società Meteorologica Italiana Redazione Nimbus.
- Dominik L. Schumacher et al., 2023, “High temperatures exacerbated by climate change made 2022 Northern Hemisphere soil moisture droughts more likely”, *World Weather Attribution*.
- Etter S., Strobl B., Seibert J., van Meerveld H. J. I. (2018): “Value of uncertain streamflow observations for hydrological modelling”. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22(10), 5243-5257.
- Faranda D. et al, 2023, “Persistent anticyclonic conditions and climate change exacerbated the exceptional 2022 European-Mediterranean drought”, *Environ. Res. Lett.* 18 034030.
- Galimberti G., Balbo A. (2017). “New possibilities in hydrological monitoring offered by experiences of Citizen Science: CITHYD, a web application for hydrometric measurements in rivers”. *Proceedings of the 19th EGU General Assembly* 8102; 2017.
- Huber J. (2010), “Low Impact Development: a Design Manual for Urban Areas”, UACDC, Fayetteville.
- Oxford English Dictionary List of New Words, in *Oxford English Dictionary*, 13 September 2014.
- Spano D. et al, 2020, “Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in Italia”, Fondazione CMCC - Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici.
- Spano D. et al, 2021, “Analisi del rischio. I cambiamenti climatici in sei città italiane”, Fondazione CMCC - Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici.
- Trigila A., Ladanza C., Lastoria B., Bussetini M., Barbano A., 2021, “Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - Edizione 2021”. ISPRA, Rapporti 356/2021.



## IL RIUSO POTABILE DELLE ACQUE REFLUE, FRA UTOPIA E REALTÀ

**Paolo Roccaro**

Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura. Università di Catania

“Si può fare molto, perfino produrre acqua potabile dall’acqua reflua” è la risposta che ho dato ad alcuni studenti che mi chiedevano quali misure si potessero adottare per contrastare i problemi relativi alla crisi idrica. Tuttavia, la domanda necessita di una risposta più articolata che tiene conto dei diversi fattori (tecnici, sociali, culturali, economici e politici) che illustro in questa sede.

### Fattori economici e politici

Le scelte politiche sono spesso guidate dal denaro e dal *momentum*. Pertanto, il riuso delle acque reflue torna in primo piano solo quando si presenta una crisi idrica. D’altronde, ci sono tante notazioni storiche sull’argomento come quella di Thomas Fuller (1608-1661) “We never know the worth of water till the well is dry”. È infatti noto che il riuso delle acque reflue è

praticato in modo strutturato solo negli Stati dove la carenza di risorsa idrica è persistente (Texas, California, Singapore, Namibia, Florida, etc.). Mi colpì molto il caso del Queensland (Australia), dove, a causa di una lunga siccità, il governo decise di investire sul riuso delle acque reflue, realizzando rilevanti infrastrutture (Western Corridor Recycled Water Project). Era il 2009, quando partecipando ad un convegno a Brisbane, visitammo questi impianti e incontrammo diversi ricercatori internazionali che lavoravano presso centri di ricerca a supporto delle attività governative australiane. Un esempio virtuoso, penserete! Non tanto! Dopo qualche anno, passata la siccità, il sistema di riuso è stato abbandonato per ridurre i costi di gestione, non tenendo conto degli ingenti costi capitali affrontati per fronteggiare la crisi idrica e per garantire l’uso sostenibile dell’acqua.

### Fattori culturali e sociali

Il problema è quindi anche culturale, oltre che politico ed economico! Non è sostenibile usare acqua potabile per lo sciacquone del WC, per lavare le auto, per irrigare i campi agricoli, etc. Né tantomeno miscelare pochi grammi di feci e urine con diversi litri di acqua per poi cercare di separarli negli impianti di depurazione. Pertanto, mentre nei contesti industrializzati i sistemi centralizzati di depurazione evolvono verso le “bioraffinerie” per il recupero di risorse nell’ottica dell’economia circolare, nei nuovi insediamenti abitativi, specialmente in contesti di nuova realizzazione delle infrastrutture, si suggeriscono approcci diversi orientati verso i concetti di segregazione e di sistema decentralizzato che mirano all’uso sostenibile delle acque (SgROI et al., 2018; Tchobanoglous, 2020).

Tornando ai sistemi centralizzati (municipali o urbani), una delle limitazioni al riuso delle acque reflue è certamente la percezione pubblica. Molti progetti di riuso sono falliti per l’opposizione dei consumatori. È pertanto fondamentale lavorare con l’ausilio di professionisti della comunicazione per sensibilizzare la popolazione. D’altronde, poiché diverse fonti di approvvigionamento idrico convenzionali (acque superficiali e sotterranee) sono contaminate da reflui a causa del cosiddetto riutilizzo *de facto* (Rice et al., 2013), ovvero di un riuso non pianificato o accidentale, sarebbe più

logico per la popolazione accettare il riuso controllato e normato. Pertanto, il riuso indiretto non pianificato e non controllato, ampiamente diffuso in agricoltura, non può essere considerato una buona pratica. Di contro, per garantire un uso sicuro dell’acqua recuperata, è necessario implementare sistemi di riutilizzo pianificati e autorizzati secondo la normativa vigente. Spesso si dice che il regolamento sul riuso in Italia (DM 185 del 2003) sia molto stringente e quindi scoraggi l’implementazione di progetti di riuso dei reflui. Oggi vi sono molte aspettative nei confronti dell’implementazione del nuovo Regolamento (UE) 2020/741 che propone un approccio basato su pochi requisiti minimi di qualità delle acque e sull’analisi di rischio. Tuttavia, a parere dello scrivente, gli aspetti economici, sociali, culturali e politici, accennati in precedenza, potrebbero continuare ad avere il sopravvento sull’aspetto normativo. Sarà la carenza di risorsa idrica il principale driver del riuso delle acque reflue.

### Fattori tecnologici

Gli aspetti tecnologici e impiantistici non sono un fattore limitante per il riuso. Al fine di riutilizzare le acque reflue, sono disponibili numerose tecnologie di trattamento terziario, la cui combinazione garantisce il rispetto di elevati standard di qualità dell’acqua. Ad esempio, negli Stati Uniti sono in funzione, da un paio di decenni, diversi impianti di recupero dell’acqua

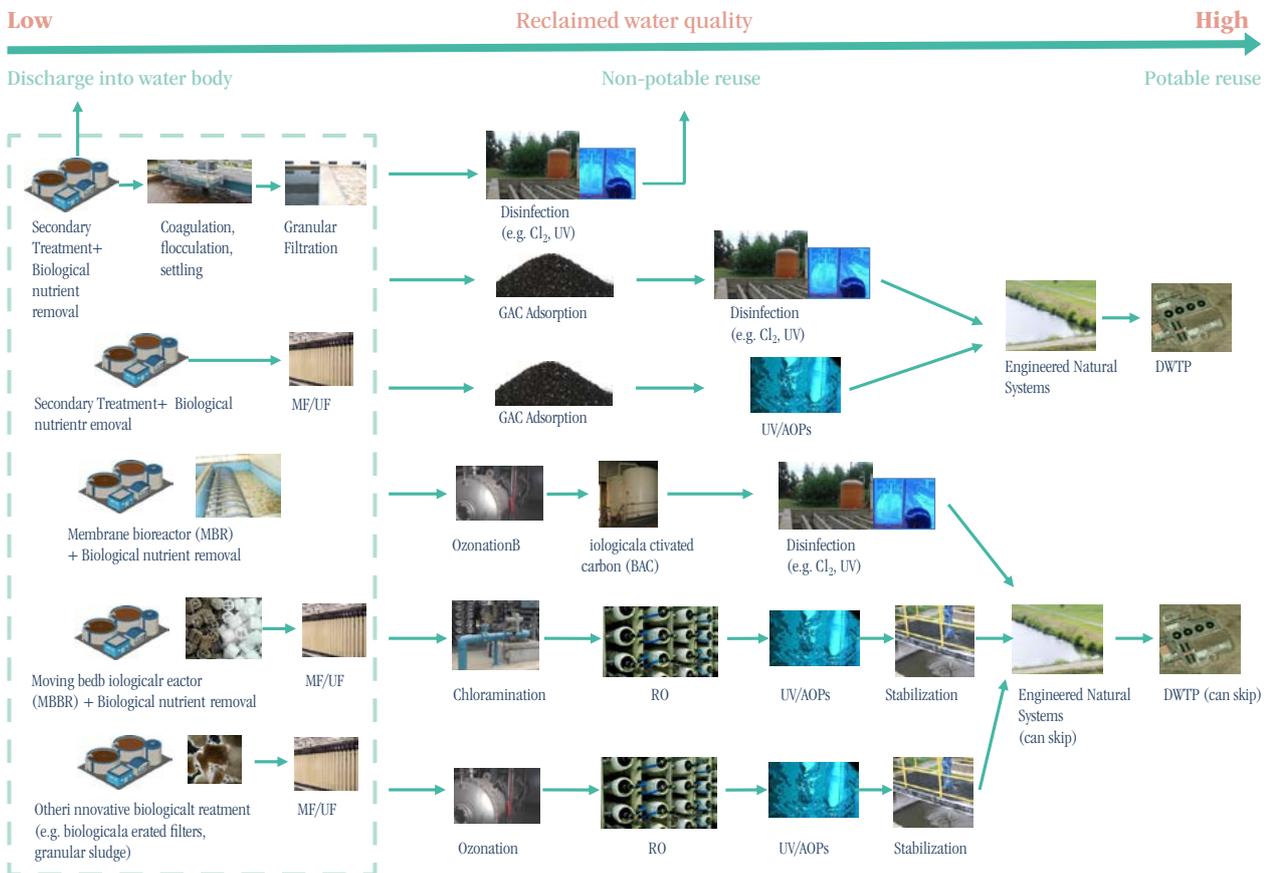
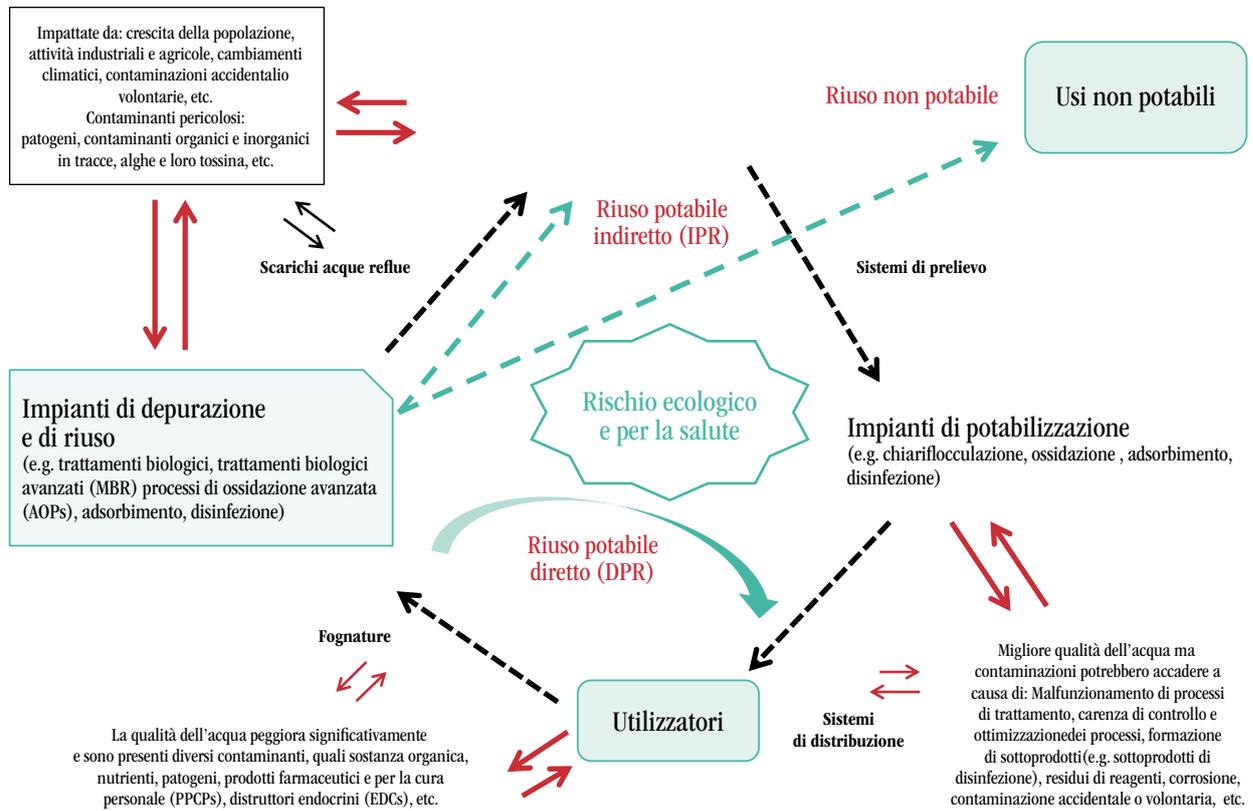


Figura 1. Filieri di recupero dei reflui per diverse opzioni di riuso (Roccaro, 2018).



**Figura 1.** Qualità delle acque nel ciclo idrico ingegnerizzato e ruolo del Riutilizzo Potabile Diretto e Indiretto (Roccaro, 2018).

che impiegano la cosiddetta “gold technology”, ovvero lo schema MF+RO+UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (microfiltrazione (MF) seguita da osmosi inversa (RO) e ossidazione avanzata tramite UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Questi impianti hanno prodotto acqua di qualità elevata, rendendola adatta praticamente a qualsiasi scopo, incluso il riutilizzo potabile (WHO, 2017). Sebbene gli impianti MF+RO+UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> siano efficienti, presentano costi di gestione elevati per l'energia necessaria per i processi UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ed RO e per il trattamento e smaltimento del concentrato della RO. Di conseguenza, gli impianti di ultima generazione utilizzano anche processi di adsorbimento, di ozonizzazione, spesso seguita da filtrazione biologica (ozono+BAC, biological activated carbon), e processi di tipo naturale (buffer naturali o ingegnerizzati, Managed Aquifer Recharge (MAR), etc.) combinati secondo un approccio multi-barriera (Figura 1).

### Il problema dei contaminanti emergenti

Uno dei problemi che maggiormente impegna i tecnici e i ricercatori del settore è la presenza dei contaminanti emergenti (contaminants of emerging concern, CEC) (Verlicchi, 2018) che possono essere rimossi tramite processi avanzati, tipicamente adsorbimento su carboni attivi (GAC), processi di ossidazione avanzata (AOPs) e processi a membrana (nanofiltrazione (NF) e/o RO). Questi processi, sebbene efficaci ed efficienti hanno dei limiti. Ad esempio, si osserva un rapido bre-

akthrough dei CEC più idrofili nei processi di adsorbimento; l'ozonizzazione e gli AOPs possono generare sottoprodotti più tossici dei CEC in ingresso, mentre le membrane sono costose e producono importanti volumi di concentrato da smaltire (Roccaro, 2018). Ad esempio, in uno studio sulla filiera di trattamento MF+RO+UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> è stata scoperta la formazione della N-nitrosodimetilammina (NDMA), un sottoprodotto di disinfezione potenzialmente cancerogeno la cui formazione cresceva utilizzando l'ozono (Sgroi et al., 2014). Di conseguenza, l'uso di questi processi deve essere combinato con un rigoroso controllo della formazione di sottoprodotti e/o della tossicità nell'acqua prodotta.

### Riutilizzo potabile indiretto e diretto

Diverse esperienze di riutilizzo potabile nel mondo (Windhoek, Namibia; Big Springs, Texas; Orange County, California; Singapore; Perth, Australia; Wulpen, Belgium) impiegano sistemi indiretti (Indirect Potable Reuse – IPR) (WHO, 2017). In questi impianti, l'acqua trattata con tecnologie avanzate viene inviata/accumulata in un buffer ambientale, un serbatoio superficiale o un acquifero sotterraneo, prima di essere utilizzata per scopi potabili. Vi sono invece pochissimi impianti di riutilizzo potabile diretto (Direct Potable Reuse – DPR), come quelli di Windhoek e Big Springs, nei quali le acque reflue recuperate sono inviate direttamente al sistema di approvvigionamento idrico municipale senza passare da un buffer ambientale o

ingegnerizzato. Il DPR (Figura 2) offre diversi vantaggi, fra i quali la riduzione delle distanze di trasferimento della risorsa idrica tramite condotte forzate e il riutilizzo a ciclo chiuso dell'acqua purificata utilizzando le reti idriche già esistenti e riducendo i costi legati alla realizzazione di nuove infrastrutture (Leverenz et al., 2011). Pertanto, negli ultimi anni diversi Stati come la California hanno investito ingenti risorse per l'implementazione del DPR.

È da sottolineare che per controllare la rimozione di un'ampia gamma di contaminanti nei sistemi IPR e DPR, dovrebbe essere adottato l'approccio multi-barriera, descritto in precedenza (Figura 1). Ad esempio nel caso più complesso (DPR), si suggerisce un sistema di trattamento basato sulle 3R (TWDB, 2015): *Ridondante*: più processi possono rimuovere lo stesso contaminante in modo che in caso di malfunzionamento di un processo, il sistema continua a funzionare efficacemente; *Robusto*: composto da una combinazione di tecnologie di trattamento per rimuovere un'ampia gamma di CEC; *Resiliente*: si applicano protocolli e strategie per affrontare i guasti e riportare velocemente i sistemi di trattamento in funzione. Inoltre, poiché la differenza sostanziale tra IPR e DPR è legata al tempo di intervento necessario a risolvere un caso di malfunzionamento o contaminazione, sono necessarie strategie di gestione affidabili e un efficace monitoraggio real-time in aggiunta alle 3R (Roccaro, 2018).

“Si può fare molto, perfino produrre acqua potabile dall'acqua reflua”, ovvero quando si decide di intervenire gli impianti di riuso delle acque reflue contribuiscono significativamente a contrastare la carenza idrica e diventano un'eccellenza dell'Ingegneria Sanitaria Ambientale. ■

## Riferimenti bibliografici

- Leverenz H.L., Tchobanoglous G., Asano T. (2011). Direct potable reuse: a future imperative. *J. Water Reuse Desal.*, 1:2–10.
- Rice J., Wutich A., Westerhoff P. (2013). Assessment of de facto wastewater reuse across the U.S.: trends between 1980 and 2008. *Environmental Science Technology*, 47:11099-11105.
- Roccaro P. (2018). Treatment processes for municipal wastewater reclamation: the challenges of emerging contaminants and direct potable reuse. *Current opinion in Environmental Science & Health*, 2:46-54.
- Sgroi M., Roccaro P., Oelker G.L., Snyder S.A. (2014). N-nitrosodimethylamine formation upon ozonation and identification of precursors source in a municipal wastewater treatment plant. *Environmental Science and Technology*, 48 (17), 10308-10315.
- Sgroi M., Vagliasindi F. G.A., Roccaro P. (2018) Feasibility, sustainability and circular economy concepts in water reuse, *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2:20-25.
- Tchobanoglous G. (2020). Gestione integrata delle acque reflue: il futuro del riutilizzo dell'acqua nelle grandi aree metropolitane, *Ingegneria dell'Ambiente* Vol. 7 n. 4/2020.
- TWDB (2015). Direct potable reuse resource document, final report. Texas Water Development Board (TWDB) Contract No. 1248321508 Volume 1 of 2. April 2015.
- Verlicchi P. (2018). I contaminanti emergenti nelle acque: a che punto siamo arrivati?, *Ingegneria dell'Ambiente* Vol. 5 n. 3/2018.
- WHO-World Health Organization (2017). Potable reuse: guidance for producing safe drinking-water. WHO Document Production Service, Geneva.



Image by Thomas Hoang from Pixabay

# RIGENERAZIONE DI CARBONI ATTIVI GRANULARI (GAC) SATURI DA PFAS TRAMITE IRRADIAMENTO A MICROONDE

Erica Gagliano<sup>1,2</sup>, Yeakub Zaker<sup>3</sup>, Cemre Birben<sup>3</sup>, Pietro Paolo Falciglia<sup>1</sup>, Tanju Karanfil<sup>3</sup>, Paolo Roccaro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Catania, Catania

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale, Università di Genova, Genova

<sup>3</sup> Department of Environmental Engineering and Earth Science, Clemson University, Clemson (SC), United States of America

## Sommario

Il gruppo delle sostanze per- e polifluoroalchiliche (PFAS) è motivo di grande preoccupazione a causa della loro persistenza ambientale, del potenziale di bioaccumulo e, in generale, per l'impatto dannoso sulla salute umana. Nonostante l'adsorbimento su carbone attivo granulare (GAC) sia il processo più utilizzato a scala mondiale per la rimozione di PFAS da acque contaminate, la performance a lungo termine dipende dal grado di saturazione dei filtri a GAC. Risulta quindi di prioritaria importanza l'individuazione di un trattamento di rigenerazione idoneo ed efficace per la rimozione dei PFAS da carboni saturi. Grazie alla natura dielettrica dei carboni attivi, la rigenerazione mediante irradiazione a microonde (MW) è considerata una tecnica efficace ed innovativa rispetto alla rigenerazione termica di tipo convenzionale. Obiettivo del presente lavoro è studiare l'efficacia dell'irradiazione a microonde per la rigenerazione di carboni attivi saturi da PFAS, valutando inoltre l'effetto dell'irradiazione a microonde sulla struttura porosa dei carboni attivi. I risultati ottenuti mostrano un rapido incremento di temperatura dei GAC in seguito all'irradiazione a microonde riducendo i tempi di trattamento necessari nel trattamento termico convenzionale. Temperature idonee per desorbire i PFAS dai GAC sono state raggiunte in brevi tempi di irradiazione (< 3 min) determinando elevate percentuali di rimozione di PFAS (>90%). Inoltre, le elevate percentuali di rimozione di PFAS raggiunte (> 90% quando il GAC ha raggiunto temperature di ~ 700-800 °C) e il ripristino della capacità di adsorbimento hanno evidenziato l'elevata potenzialità dell'irradiazione a microonde per la rigenerazione dei carboni attivi saturi da PFAS. L'irradiazione a microonde non ha causato il danneggiamento della struttura porosa del GAC come dimostrato dal confronto tra le proprietà fisiche dei campioni (e.g., BET area e volume dei pori) prima e dopo l'irradiazione a MW.

Le indagini in corso si stanno concentrando su esperimenti di rigenerazione su campioni di GAC saturi da PFAS prelevati da impianti a scala reale per valutare l'efficacia della rigenerazione mediante irradiazione a MW anche in presenza di altri composti (come la sostanza organica).

**Parole chiave:** Adsorbimento, carbone attivo granulare (GAC), irradiazione a microonde (MW), sostanze perfluoroalchiliche, rigenerazione.

## REGENERATION OF PFAS-LOADED GAC THROUGH MICROWAVE IRRADIATION

### Abstract

The group of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), manmade chemicals, is of great concern due to their environmental persistence, bioaccumulation potential and harmful impact on human health. Although adsorption through granular activated carbon (GAC) is the most employed treatment process for removing PFAS from contaminated water, GAC long-term performance depends on the filter's saturation due to rapid breakthrough. Consequently, it is paramount to identify a suitable and effective regeneration treatment for the removal of PFAS from saturated carbon. Thanks to the dielectric nature of activated carbons, regeneration by microwave irradiation (MW) is considered an effective and innovative technique compared to conventional thermal regeneration. The aim of the present work is to study the effectiveness of microwave irradiation in the regeneration of PFAS-saturated GAC, also evaluating the effect of MW irradiation on the GAC porous structure. Obtained results show a rapid increase in the temperature of GACs following microwave irradiation, reducing the treatment times required in conventional heat

IdA



\* Per contatti: Via Santa Sofia 64, 95125 Catania, Italia. Tel. 0957382716. paolo.roccaro@unict.it

Ricevuto il 31-3-2023; Correzioni richieste il 18-4-2023; Accettazione finale il 21-4-2023.

treatment. Suitable temperatures to desorb PFAS from GACs were reached in short irradiation times (< 3 min), resulting in high percentages of PFAS removal (>90%). Furthermore, the high PFAS removal rates achieved (>90% when GAC reached temperatures of ~700-800 °C) and the restoration of the adsorption capacity highlighted the high potential of microwave irradiation for carbon regeneration. Microwave irradiation did not damage the porous structure of the GAC as demonstrated by the comparison of the physical properties of the samples (e.g., BET pore area and volume) before and

The ongoing investigations focus on regeneration experiments on PFAS-saturated GAC samples taken from full-scale plants to evaluate the effectiveness of regeneration by irradiation at MW, even in the presence of other compounds (such as organic matter).

**Keyword:** *Adsorption; granular activated carbon (GAC); microwave (MW) irradiation; per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS); regeneration.*

## 1. Introduzione

Le sostanze per- e polifluoroalchiliche (*per- and polyfluoroalkyl substances*, PFAS) sono composti di origine industriale formati da una catena alchilica lineare o ramificata di lunghezza variabile (in genere da 4 a 14 atomi di carbonio) parzialmente (poli-) o totalmente fluorurata (per-) e da un gruppo funzionale terminale, generalmente un acido carbossilico o solfonico (Buck et al. 2011; ITRC, 2020). Appartengono a questo gruppo più di 4000 composti che vengono classificati in base al numero di atomi di carbonio che costituisce la catena in “composti a catena lunga” (ad es. acido perfluorooctanoico, PFOA, e acido perfluorooctansulfonico, PFOS) e “composti a catena corta” (ad es. acidi perfluorobutanoico e perfluorobutansulfonico, PFBA e PFBS). Altra classificazione basata sul gruppo funzionale terminale distingue gli acidi perfluorocarbossilati (PFCA) e acidi perfluorosulfonati (PFSA) (Buck et al. 2011; ITRC, 2020).

L'inizio della produzione dei PFAS risale alla fine degli anni '40, successivamente i PFAS hanno trovato impiego in molti processi industriali per la produzione di emulsionanti e tensioattivi in prodotti per la pulizia e schiume antincendio, per la realizzazione di un elevato numero di beni di consumo come pellicole fotografiche e rivestimento dei contenitori per alimenti (ad es. quelli dei “fast food”) (Gagliano et al., 2020; ITRC, 2020).

Conseguentemente, i PFAS possono essere rilasciati nell'ambiente durante la loro applicazione e produzione industriale ma anche in seguito alla degradazione dei prodotti di consumo in cui sono presenti. Numerose contaminazioni ambientali dovute alla presenza di PFAS sono state registrate negli ultimi due decenni. Ad esempio, nel 2013 in Veneto è stata individuata una contaminazione da PFAS di acque superficiali, acque di falda e acquedotti pubblici (Bertanza et al., 2020; WHO, 2017). Considerando l'estensione della contaminazione (~200 km<sup>2</sup>) e il numero significativo di cittadini residenti nell'area (120.000 cittadini),

la contaminazione in Veneto rappresenta il terzo caso più rilevante al mondo di contaminazione da PFAS (Bertanza et al., 2020; WHO, 2017).

Gli studi epidemiologici disponibili sull'uomo, seppur limitati, hanno evidenziato che l'esposizione ai PFAS è principalmente dovuta all'ingestione di cibo o acqua contaminati e che effetti severi sulla salute umana possono verificarsi a seguito di un'esposizione a lungo termine (Buck et al. 2011; ITRC, 2020). Da studi condotti anche sugli animali è emerso che il fegato rappresenta il principale organo bersaglio e che i PFAS causano epatotossicità, immunotossicità, neurotossicità, alterazioni ormonali nella riproduzione e nello sviluppo. Inoltre, nella specie umana l'eliminazione di tali sostanze è molto lenta a causa del processo di riassorbimento renale che li riporta in circolo (Buck et al. 2011; ITRC, 2020; Rahman et al., 2014).

Recentemente l'adozione di misure di salvaguardia della salute pubblica ha avuto come obiettivo la riduzione dell'esposizione ai composti appartenenti alla famiglia dei PFAS introducendo dei limiti nelle acque destinate al consumo umano. Tra queste occorre annoverare la nuova Direttiva Europea concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano che fissa il limite di 0,5 µg L<sup>-1</sup> per «PFAS – totale», con il quale si intende la totalità delle sostanze per- e polifluoroalchiliche (EU 2020/2184). Mentre nel marzo 2023, l'Agenzia per la protezione ambientale degli Stati Uniti d'America (US EPA) ha annunciato l'intenzione di introdurre dei limiti nazionali per sei composti appartenenti ai PFAS (EPA, 2023).

Tra i numerosi trattamenti testati per la rimozione di PFAS dalle acque, l'adsorbimento su carboni attivi granulari (*granular activated carbon*, GAC) ha trovato applicazione per il trattamento di acque reflue industriali, acque destinate al consumo umano, falde acquifere ed è attualmente implementata a piena scala (Du et al. 2014; Gagliano et al., 2020; Park et al. 2020). Tuttavia, è stato dimostrato che i PFSA sono meglio rimossi rispetto ai PFCA e che i

composti a catena lunga vengono maggiormente adsorbiti rispetto a quelli a catena corta (ITRC, 2020). È stato infatti osservato che il rapido breakthrough influisce negativamente le prestazioni a lungo termine dei filtri a GAC (Appleman et al., 2014; Du et al., 2014; Bertanza et al., 2020).

Lo smaltimento in discarica o l'incenerimento di GAC saturi di PFAS sono entrambi approcci costosi con potenziali rischi di contaminazione secondaria. Inoltre, la rigenerazione chimica richiede l'uso di solventi, è parzialmente efficace, costosa e produce acque di lavaggio ricche di PFAS che richiedono ulteriori trattamenti e smaltimento (Boyer et al., 2021; Gagliano et al., 2020). Il trattamento termico è stato proposto come approccio praticabile per il trattamento di matrici contaminate da PFAS (e.g. suoli, fanghi, GAC esausti) (Xiao et al., 2020; Wang et al., 2022). Tuttavia, a causa della struttura chimica dei PFAS che presenta legami C-F molto difficili da rompere, si evidenziano alcune lacune sulle conoscenze relative ai percorsi di degradazione e al destino dei PFAS nei processi termici (Wang et al., 2022). Inoltre, la rigenerazione termica basata sul riscaldamento convenzionale ed eseguita sotto gas ossidativi potrebbe danneggiare la struttura porosa del carbonio, riducendo la capacità di adsorbimento. Ad esempio, il trattamento termico convenzionale può modificare i gruppi funzionali e generare una perdita di massa di carbonio a causa dell'attrito (Ania et al., 2007; Zanella et al., 2014).

L'irradiazione a microonde (MW) rappresenta un'alternativa al riscaldamento termico convenzionale e, grazie alla natura dielettrica dei carboni attivi, è stata recentemente proposta come tecnica innovativa per la rigenerazione di GAC saturi da composti chimici come coloranti e farmaci (Ania et al., 2007; Durán-Jiménez et al., 2019; Falciglia et al., 2018). Recentemente sono state condotte indagini di laboratorio per studiare le prestazioni dell'irradiazione a MW nella rigenerazione di GAC saturi da PFOA e PFOS (Gagliano et al., 2021).

Lo scopo del presente studio è valutare sistematicamente l'efficacia dell'irradiazione a MW, eseguito a condizioni operative variabili (potenza e tempo di irradiazione), nella rigenerazione di GAC saturati mediante soluzione sintetica in acqua deionizzata di composti appartenente alla classe dei PFAS (cioè PFBA, PFOA, PFBS e PFOS). Inoltre, l'efficacia dell'irradiazione a MW per la rigenerazione di GAC saturi da PFOA o PFOS è stata valutata investigando cinque cicli consecutivi di adsorbimento e rigenerazione mediante MW. Cambiamenti alla struttura porosa dei campioni di GAC attribuibili alle microonde sono stati analizzati confrontando le proprietà fisiche dei campioni prima e dopo l'irradiazione a MW.

**Tabella 1.** Caratteristiche chimico-fisiche del carbon attivo selezionato (*Calgon Filtrasorb 400*).

Parametro	Valore
Composizione	Carbone bituminoso
Indice di iodio (mg g <sup>-1</sup> )	1000
Densità apparente (g cm <sup>-3</sup> )	0,49
Umidità (%)	< 2
Granulometria (mm)	0,85 – 2
Superficie specifica (BET area, m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	1064
Larghezza media dei pori (nm)	4
Volume dei pori (cm <sup>3</sup> g <sup>-1</sup> )	0,51
Punto di carica zero (pHpzc)	8,7

## 2. Materiali e metodi

### 2.1. GAC e PFAS investigati

In questo studio, un GAC a base di carbone bituminoso, *Calgon Filtrasorb 400* (F400), è stato selezionato perché ampiamente utilizzato per rimuovere i PFAS da acque contaminate (Gagliano et al., 2021; Park et al., 2020). Preliminarmente, i campioni di GAC F400 sono stati lavati con acqua deionizzata, asciugati in muffola a 100 °C per 12 ore e setacciati al fine di ottenere una frazione compresa tra 0,85 e 2 mm. In Tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche chimico-fisiche del carbone attivo selezionato.

Sono stati selezionati 4 composti target all'interno della classe dei PFAS rispettivamente due composti appartenenti al gruppo PFCA (PFBA e PFOA) e due composti appartenenti ai PFSA (PFBS e PFOS), inoltre è possibile distinguere i composti a catena corta (PFBA e PFBS) da quelli a catena lunga (PFOA e PFOS). La Tabella 2 riporta i composti selezionati nel presente studio.

### 2.2. Adsorbimento in batch

Al fine di saturare i campioni di GAC F400, sono state condotte delle prove di adsorbimento in batch in cui campioni di GAC sono stati posti in contatto con soluzioni in acqua deionizzata di ciascun composto (PFOA, PFBA, PFBS e PFOS, individualmente e C<sub>0</sub> = 500 mg L<sup>-1</sup>). Le miscele sono state mantenute in agitazione (180 rpm) mediamente per 24 ore a temperatura ambiente (25 ± 1 °C). La capacità di adsorbimento (mg g<sup>-1</sup>) è stata quindi calcolata sulla base delle concentrazioni iniziale e finale di ciascun composto in soluzione (mg L<sup>-1</sup>), la massa di GAC utilizzata (g) e il volume della soluzione (mL).

### 2.3. Prove di irradiazione a microonde

Un forno a MW da 2,45 GHz (potenza massima di 1,25 kW) è stato impiegato per eseguire la rigenerazione dei GAC saturi da PFAS. Prima di eseguire le prove di rigenerazione di GAC saturi da PFAS, sono

**Tabella 2.** Composti investigati in questo studio appartenenti alla classe dei PFAS.

Nome composto	Acronimo	Numero CAS	Numero atomi di C nella catena	Gruppo funzionale	Formula	Peso molecolare (g mol <sup>-1</sup> )
<b>Composti a catena corta</b>						
Acido perfluorobutanoico ( <i>Perfluorobutanoic acid</i> )	PFBA	375-22-4	4	Carbossilico	C <sub>4</sub> HF <sub>7</sub> O <sub>2</sub>	214,04
Acido perfluorobutansolfonico ( <i>Perfluorobutane sulfonic acid</i> )	PFBS	375-73-5	4	Solfonico	C <sub>4</sub> HF <sub>9</sub> O <sub>3</sub> S	300,1
<b>Composti a catena lunga</b>						
Acido perfluorooctanoico ( <i>Perfluorooctanoic acid</i> )	PFOA	335-67-1	8	Carbossilico	C <sub>7</sub> F <sub>15</sub> CO <sub>2</sub> H	414,07
Acido perfluorooctansolfonico ( <i>Perfluorooctane sulfonic acid</i> )	PFOS	1763-23-1	8	Solfonico	C <sub>8</sub> F <sub>17</sub> SO <sub>3</sub> H	500,126

stati sviluppati i profili di temperatura del GAC sottoponendo i campioni (non saturi da PFAS) a irradiazione a MW condotto a diversi livelli di potenza (250, 375 e 500 W) e tempi di irradiazione (da 1 a 8 min). Una termocoppia di tipo K è stata utilizzata per registrare le temperature dei GAC. In base alle temperature raggiunte dai campioni, sono stati quindi selezionate diverse combinazioni di irradiazione (potenza e tempi) da testare sui campioni di GAC saturi da PFAS.

Le prove di rigenerazione sono state inizialmente condotte sui campioni GAC saturi da PFOA o PFOS, anche effettuando cicli consecutivi di adsorbimento/rigenerazione. Successivamente, utilizzando un set up sperimentale customizzato che prevede un sistema di captazione di gas esausti, sono state effettuate le prove di rigenerazione sui campioni GAC saturi con PFBA, PFBS, PFOA o PFOS.

#### 2.4. Cicli consecutivi di adsorbimento/rigenerazione

La performance della rigenerazione mediante irradiazione microonde è stata ulteriormente valutata effettuando 5 cicli consecutivi di adsorbimento/rigenerazione. In particolare, i campioni di GAC saturi da PFOA o PFOS sono stati irradiati alle condizioni operative tali da assicurare temperature > 600 °C. Alla fine di ogni ciclo sono state determinate la perdita di peso (PP, %) del carbone attivo dovuto all'irradiazione a MW e l'efficienza di rigenerazione (RE, %), ottenuta dal rapporto tra la capacità di adsorbimento del GAC rigenerato e quella del GAC vergine.

#### 2.5. Set up sperimentale customizzato e sistema di captazione gas esausti

Al fine di determinare la percentuale di rimozione di ciascun composto analizzando anche i gas esausti prodotti durante la rigenerazione è stato utilizzando un set up sperimentale customizzato. Inoltre, il sistema è do-

tato di un sistema di monitoraggio e controllo in tempo reale dei parametri di processo come la temperatura. I campioni di GAC saturi da PFOA, PFOS, PFBA o PFBS sono stati irradiati a due diverse condizioni operative al fine di raggiungere temperature nei GAC maggiori di 300 °C (250 W x 1,75 min e 250 W x 3 min).

Inoltre, i gas di scarico sono stati raccolti durante l'irradiazione MW e i campioni di solvente della trappola sono stati analizzati utilizzando la cromatografia ionica (IC) per misurare il contenuto di fluoruro (prodotti defluorurati), mentre l'analisi in LC-MS/MS è stata condotta per controllare i prodotti di degradazione dei PFAS. Inoltre, il sistema di captazione dei gas esausti è stato lavato con una soluzione di metanolo/acqua per recuperare tutti i residui di PFAS o fluoruro.

#### 2.6. Metodi analitici e sperimentali

Le concentrazioni iniziali e finali di PFAS sono state misurate mediante LC-MS/MS (Agilent 6470 LC/TQ) seguendo il metodo descritto da Park et al. (2020).

La percentuale di rimozione (R, %) di ciascun composto è stata calcolata in base alla capacità di adsorbimento (quantità di composto adsorbito nel GAC), alla quantità di prodotti di degradazione analizzati nelle trappole con solventi e nella soluzione di lavaggio del sistema di captazione. Inoltre, il potenziale rilascio dei composti target e di altri composti a catena più corta (potenziali sottoprodotti di degradazione) da campioni GAC rigenerati con MW è stato misurato immergendo campioni rigenerati con MW in 200 mL di soluzione di acetato di ammonio in metanolo per 48 ore, quindi è stata analizzata la concentrazione residua di PFAS nei campioni liquidi attraverso LC-MS/MS (Gagliano et al., 2021; Xiao et al., 2020).

Infine, i cambiamenti nelle proprietà fisiche di F400 (prima e dopo l'irradiazione a MW) sono stati esaminati attraverso isoterme di adsorbimento di N<sub>2</sub> (ASAP 2020, Micromeritics Instrument Corp.).

### 3. Risultati e discussione

#### 3.1. Profili di temperatura e perdita di peso

I profili di temperatura del GAC irradiato a diverse potenze sono mostrati in Fig. 1a. Indistintamente dalla potenza applicata, i campioni hanno raggiunto temperature maggiori di 200 °C in 1 min di irradiazione, mentre alla massima potenza applicata (500 W), sono state raggiunte le temperature più elevate in tempi di irradiazione più brevi con un tasso di incremento pari a 146 °C min<sup>-1</sup> (Fig. 1a). I risultati ottenuti mostrano che il GAC ha una forte capacità di convertire la potenza assorbita in un rapido aumento di temperatura, come dimostrato dalle alte temperature raggiunte dai campioni GAC a causa dell'irradiazione MW.

Questi risultati sono simili a quelli osservati in precedenza e supportano i fattori chiave della rigenerazione basata sull'irradiazione a MW come le elevate velocità di riscaldamento in tempi brevi di trattamento (Falciglia et al., 2020; Durán-Jiménez et al., 2019). È stato inoltre dimostrato che il riscaldamento dielettrico mediante irradiazione a microonde determina la formazione di "hot spot" all'interno della struttura porosa del GAC in cui la temperatura risulta maggiore rispetto a quella registrata. Tali "hot spot" sono generati dalle interazioni che si verificano tra i  $\pi$ -elettroni delocalizzati dei carboni attivi e le microonde (Yang et al., 2017).

La variazione della perdita di peso con la temperatura raggiunta è mostrata in Fig. 1b. Si nota che la perdita di peso del GAC aumenta linearmente con la temperatura raggiunta dal GAC ( $R^2 > 0,98$ ). Tale correlazione può essere inoltre utile nella scelta del GAC più idoneo tra quelli disponibili in commercio per la rimozione di un composto target. Infatti, a parità di capacità di adsorbimento, un GAC caratterizzato da una minore perdita di peso e da un rapido incremento di temperatura do-

vrebbe essere preferito perché più idoneo alla rigenerazione termica (sia di tipo convenzionale che mediante irradiazione a MW) (Gagliano et al., 2021). Il valore massimo di perdita di peso è stato 6,1%.

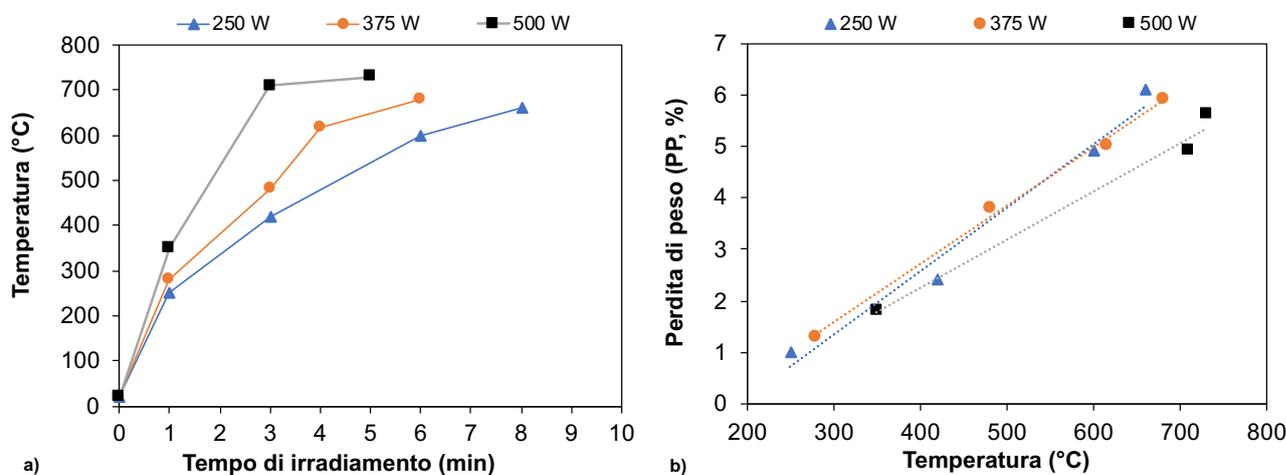
#### 3.2. Efficacia dell'irradiazione a MW per i campioni GAC saturi da PFOA o PFOS

Sulla base dei profili di temperatura ottenuti sono state selezionate diverse combinazioni di potenza e tempi di irradiazione in modo da testare l'efficacia dell'irradiazione a MW nella rigenerazione di GAC saturi da PFOA o PFOS. Le condizioni operative sono state scelte anche basandosi sul criterio di raggiungere temperature  $\geq 600$  °C (ad eccezione di una condizione operativa scelta come esperimento di controllo). Questo valore target è stato scelto sulla base dei risultati di analisi termogravimetriche (TGA) precedentemente condotte e riportate in letteratura (Xiao et al., 2020).

Dopo l'irradiazione i campioni sono stati sottoposti ad adsorbimento in batch al fine di valutare l'efficienza di rigenerazione ossia il rapporto tra la capacità di adsorbimento del GAC rigenerato mediante irradiazione a MW e quella del GAC vergine.

I risultati relativi ai campioni GAC saturi da PFOA e da PFOS sono mostrati in Fig. 2a e 2b, rispettivamente. Misurando la temperatura è emerso che a 125 W per 12 min sono state raggiunte temperature  $< 300$  °C, tali valori non sono idonei a desorbire i composti target (PFOA e PFOS) come dimostrato dai valori di efficienza di rigenerazione che a tali condizioni operative sono risultati inferiori al 30%.

Al contrario, sono state ottenute elevate efficienze di rigenerazione (90-95%) quando i campioni GAC sono stati irradiati a 500 W per 3 min. Valori di efficienze di rigenerazioni compresi tra 80-85% sono stati ottenuti a 250 W e 6 min di irradiazione.



**Figura 1.** (a) Profili di temperatura ( $T$ , °C) al variare della potenza di irradiazione (W); (b) Variazione della perdita di peso (PP, %) con la temperatura raggiunta dal GAC (adattato da Gagliano et al., 2021).

Confrontando le temperature raggiunte durante l'irradiazione a MW dei campioni GAC saturi (con PFOA o PFOS) con i profili di temperatura (Fig. 1), è possibile notare che a parità di condizioni operative (potenza e tempi di irradiazione) sono stati raggiunti valori simili. Questo suggerisce che il GAC è il principale materiale che assorbe le microonde e che la presenza di PFOA o PFOS adsorbito nel GAC non costituisce un fattore rilevante nella conversione dell'energia elettromagnetica delle microonde in calore (Durán-Jiménez et al., 2019; Gagliano et al., 2021).

### 3.3. Effetto di cicli consecutivi di adsorbimento/rigenerazione sulla capacità di adsorbimento del GAC

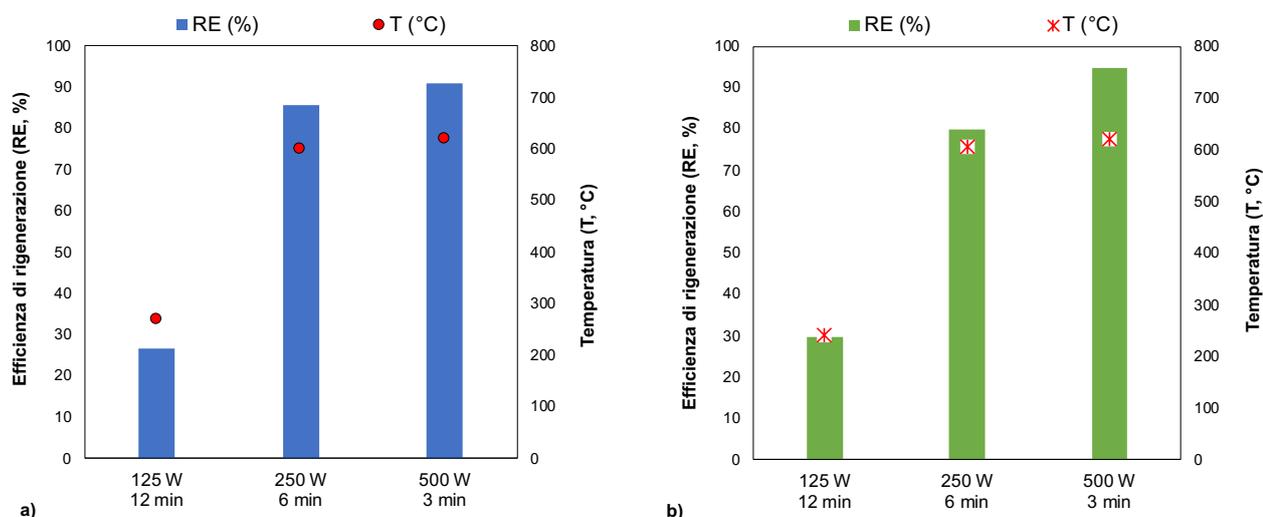
Sulla base dei risultati ottenuti, la combinazione 500 W x 3 min è stata scelta per effettuare l'irradiazione a MW nella sperimentazione per valutare l'efficacia durante cicli consecutivi. L'efficienza di rigenerazione (RE), ossia il rapporto tra la capacità di adsorbimento del GAC rigenerato e quella del GAC vergine, è stata utilizzata per monitorare la performance dell'irradiazione a MW durante 5 cicli consecutivi di adsorbimento/rigenerazione. I risultati di RE e perdita di peso ottenuti nei cicli consecutivi di adsorbimento/rigenerazione per campioni GAC saturi da PFOA o PFOS sono mostrati in Figura 3. Efficienza di rigenerazione > 90% sono state ottenute nei primi tre cicli nel caso del PFOA e il massimo valore pari a ~96% alla fine del III ciclo (Fig. 3a), mentre nel caso del PFOS il massimo valore di RE è stato ottenuto alla fine del I ciclo (pari a ~95%), poi i valori di RE sono diminuiti all'aumentare dei cicli di adsorbimento/rigenerazione (Fig. 3b). Alla fine del V ciclo sono stati raggiunti sia per i campioni saturi da PFOA che da PFOS percentuali di efficienza di rigenerazioni

pari a ~65%. Sono attualmente in corso cicli consecutivi di adsorbimento e rigenerazione utilizzando il set up customizzato che consentiranno di investigare anche i prodotti di degradazione e ottimizzare i risultati relativi alla RE grazie al controllo in tempo reale dei parametri di processo come la temperatura.

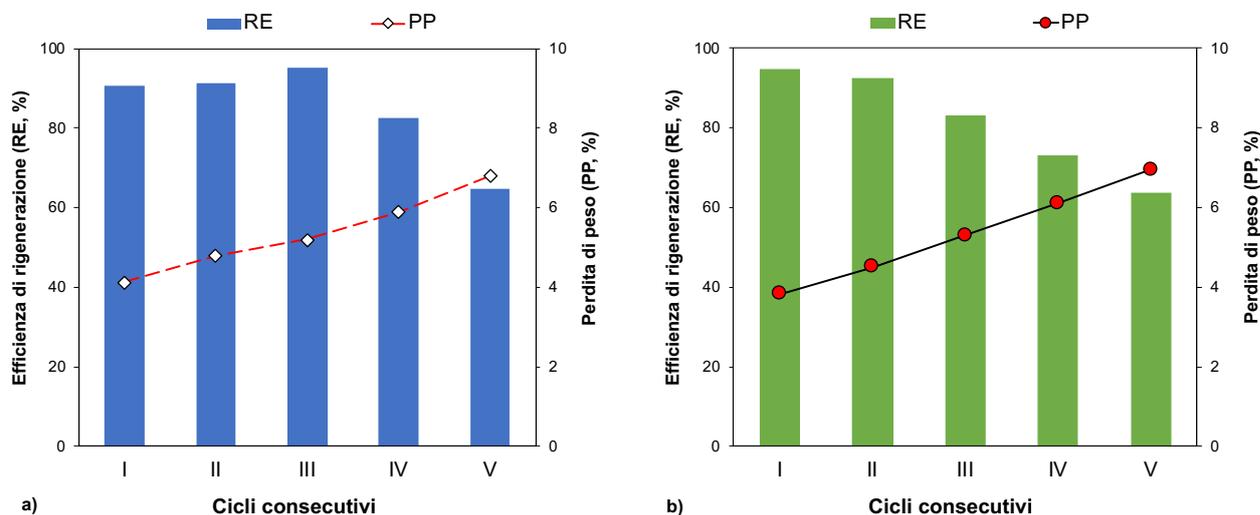
Le percentuali di RE ottenute nel presente studio sono paragonabili a quelle ottenute in studi condotti applicando l'irradiazione a microonde per la rigenerazione di carboni attivi saturi da altri composti (i.e. acido salicilico, cesio) (Ania et al., 2007; Falciglia et al., 2020). Inoltre, l'efficienza di rigenerazione ottenuta mediante irradiazione a MW risulta maggiore rispetto alle percentuali attribuite al processo di rigenerazione chimica e riportate in letteratura (Gagliano et al., 2020). La rigenerazione chimica presenta anche dei costi maggiori di esercizio e lo svantaggio legato al successivo trattamento della soluzione chimica di lavaggio.

In Figura 3 sono mostrate le percentuali di perdita di peso ottenute nei cicli consecutivi. Si può osservare che sia per i campioni saturi da PFOA (Fig. 3a) che i campioni saturi da PFOS (Fig. 3b), la perdita di peso dei GAC aumenta linearmente con il numero di cicli. La perdita in peso complessiva alla fine del V ciclo risulta inferiore al 7% e non rappresenta nel caso in esame una limitazione della fattibilità tecnica del processo di rigenerazione mediante irradiazione a MW.

Come precedentemente dimostrato, la perdita di peso nei carboni attivi sottoposti a vari cicli di rigenerazione dipende da diversi fattori come la natura del carbone attivo e del composto adsorbito e la temperatura raggiunta dai carboni attivi durante l'irradiazione a microonde (Ania et al., 2007; Gagliano et al. 2021). Infatti, un'eccessiva riduzione del peso dei carboni attivi sottoposti a rigenerazione mediante irradiazione



**Figura 2.** (a) Efficienza di rigenerazione e temperature raggiunte nei campioni GAC saturi da PFOA e sottoposti a irradiazione a MW (diverse condizioni applicate); (b) Efficienza di rigenerazione e temperature raggiunte nei campioni GAC saturi da PFOS e sottoposti a irradiazione a MW (diverse condizioni applicate).



**Figura 3.** (a) Efficienza di rigenerazione (RE, %) e perdita di peso (PP, %) nei campioni GAC saturi da PFOA e sottoposti a cicli consecutivi di adsorbimento/rigenerazione; (b) Efficienza di rigenerazione (RE, %) e perdita di peso (PP, %) nei campioni GAC saturi da PFOS e sottoposti a cicli consecutivi di adsorbimento/rigenerazione.

a microonde non consentirebbe il loro riutilizzo dopo un certo numero di cicli di adsorbimento/rigenerazione (Sun et al., 2017).

Inoltre, la perdita di peso ottenuta nel presente studio è inferiore alle percentuali attribuite ai processi di rigenerazione mediante riscaldamento termico di tipo convenzionale e riportate in letteratura (compresa tra 5-15 % per ogni ciclo rigenerativo) (Zanella et al., 2014).

### 3.4. Rimozione di PFAS da GAC mediante irradiazione a microonde

Utilizzando il sistema customizzato e applicando una potenza di 250 W per 1,75 min, le temperature raggiunte dai GAC saturi di PFAS sono risultate comprese tra 289 e 435 °C, mentre temperature più elevate (~700-800 °C) sono state raggiunte prolungando il tempo di irradiazione a 3 min (Fig. 4a). In tutti i campioni GAC sottoposti a irradiazione a MW sono state ottenute percentuali di perdita di peso < 6% (Fig. 4a), in particolare a temperature minori corrispondono perdite di peso minori.

Tutti e quattro i PFAS investigati sono stati quasi completamente rimossi dai campioni GAC a temperature più elevate (~ 700-800 °C) e le percentuali di rimozione di PFAS sono state >90%. Nello specifico, PFBA= 99,8%, PFOA=100%, PFBS= 90,6% e PFOS= 91,8% (Fig. 4b).

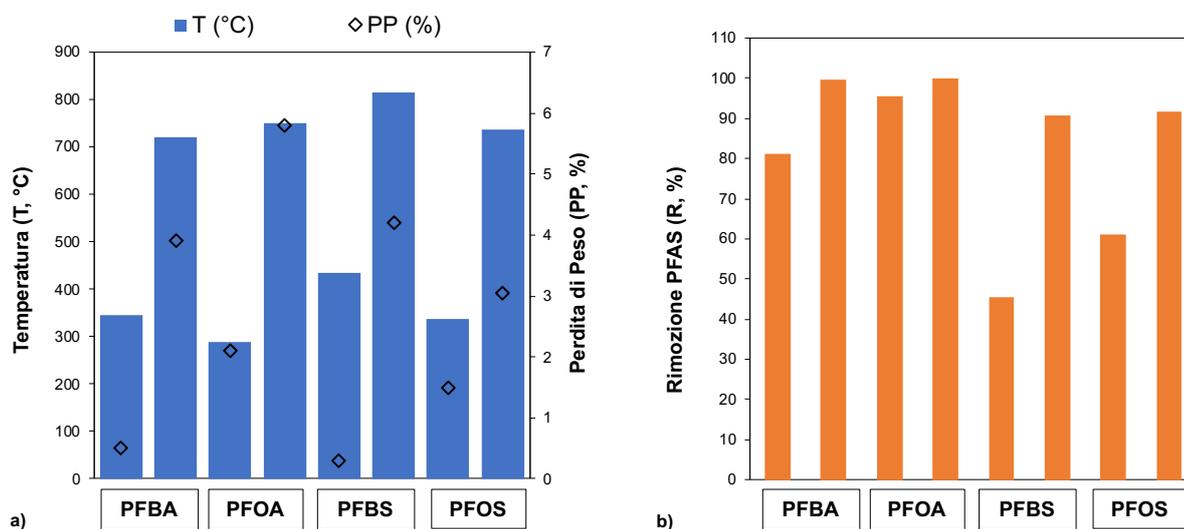
Tuttavia, alcune differenze nella rimozione del PFAS (R, %) potrebbero essere evidenziate osservando i risultati ottenuti a temperature più basse.

La Figura 4b mostra che la rimozione dei PFAS potrebbe dipendere dalla lunghezza della catena e dal gruppo funzionale. Infatti, a temperature più basse (~300 °C), il PFOA (PFCA a catena lunga) è stato rimosso meglio del PFBA (PFCA a catena corta) con

percentuali di rimozione rispettivamente di ~96% e ~82%. La rimozione di PFOS (PFSA a catena lunga) è risultata superiore a quella di PFBS (PFSA a catena corta) con percentuali di rimozione rispettivamente di ~61 e ~45%. Nel complesso, i PFCA (PFOA e PFBA) vengono rimossi meglio dei PFSA (PFOS e PFBS). In effetti, per la rimozione dei PFSA sono necessarie temperature più elevate rispetto ai PFCA, come riportato in altri studi (Xiao et al., 2020). Infatti, come precedentemente dimostrato, temperature comprese tra 400 e 700 °C sono adatte a desorbire diversi composti appartenenti alla classe PFAS (tra cui PFOS, PFOA, PFBS e PFBA) da suoli contaminati e GAC (Wang et al., 2022; Xiao et al., 2020). Il meccanismo di stripping legato all'evaporazione dell'acqua interstiziale può contribuire al desorbimento di PFOA e PFOS migliorando l'efficienza della rigenerazione di MW (Falciglia et al., 2020; Gagliano et al., 2021).

### 3.5. Effetto irradiazione a MW sui campioni GAC

L'effetto dell'irradiazione a microonde sui campioni di GAC è stato valutato analizzando anche la variazione delle proprietà fisiche del GAC prima e dopo l'irradiazione. In particolare, i campioni di GAC rigenerati a temperature più elevate (650 °C < T < 800 °C) sono stati analizzati attraverso isoterme di adsorbimento di N<sub>2</sub> al fine di valutare l'effetto dell'irradiazione a MW anche sulle proprietà fisiche dei GAC come area superficiale (BET) e del volume dei pori. I risultati hanno dimostrato che le percentuali di variazioni di tali parametri sono rimasti entro ± 5% rispetto ai valori di F400 vergine e che tali minime variazioni



**Figura 4.** (a) Temperatura ( $T$ , °C) e perdita di peso (PP, %) nei campioni di GAC saturi da PFAS in seguito all'irradiazione a MW; (b) rimozione percentuale (R, %) dei PFAS target nei campioni GAC irradiati a MW.

ni non dipendono dal tipo di composto adsorbito sui campioni GAC. Anche i campioni di GAC sottoposti a cinque cicli consecutivi di adsorbimento/rigenerazione hanno subito minime variazioni delle proprietà fisiche (<20%).

Tali risultati confermano che l'irradiazione a microonde non causa un danneggiamento della struttura porosa del carbone attivo in esame.

#### 4. Conclusioni

I risultati ottenuti nel presente lavoro sperimentale evidenziano che l'irradiazione a microonde può rappresentare una tecnica di rigenerazione efficace per carboni attivi saturi da PFAS. Il rapido incremento di temperatura in seguito all'irradiazione a microonde consentirebbe infatti di dimezzare i tempi di trattamento generalmente necessari nel trattamento termico convenzionale.

Temperature idonee per desorbire i PFAS dai GAC sono state raggiunte in brevi tempi di irradiazione (<3min) determinando elevate percentuali di rimozione di PFAS (>90%).

Elevate efficienze di rigenerazione (>65%) nei campioni GAC saturi da PFOA o PFOS sono state ottenute anche dopo 5 cicli successivi. La moderata perdita di peso, ottenuta anche dopo diversi cicli consecutivi di rigenerazione, può essere inclusa tra i vantaggi della rigenerazione mediante irradiazione a MW. Essa è risultata inoltre minore rispetto a quella generalmente ottenuta in seguito all'applicazione del trattamento termico convenzionale.

L'irradiazione a microonde non ha causato il danneggiamento della struttura porosa del GAC come dimostrato dal confronto tra le proprietà fisiche dei cam-

pioni (e.g., BET area e volume dei pori) prima e dopo l'irradiazione a MW.

Le indagini in corso si stanno concentrando su esperimenti di rigenerazione su campioni di GAC saturi da PFAS prelevati da impianti a scala reale per valutare l'efficacia della rigenerazione mediante irradiazione a MW anche in presenza di altri composti (come la sostanza organica).

Uno studio di fattibilità tecnico-economica sarà necessario per comprendere il consumo energetico e i costi risparmiati anche rispetto alla rigenerazione mediante trattamento termico convenzionale. Tali informazioni risulteranno fondamentali per guidare lo scaling-up della tecnologia di rigenerazione mediante irradiazione a MW e la sua applicazione per trattamento di GAC saturi da PFAS. ■

#### Riferimenti bibliografici

- Ania C.O., Parra J.B., Menéndez J.A., Pis J.J., 2007. Microwave-assisted regeneration of activated carbons loaded with pharmaceuticals. *Water Res* 41, 3299-3306. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.05.006>
- Appleman T.D., Higgins C.P., Quiñones, O., Vanderford, B.J., Kolstad, C., Zeigler-Holady, J.C., Dickenson, E.R.V., 2014. Treatment of poly- and perfluoroalkyl substances in U.S. full-scale water treatment systems. *Water Res.* 51, 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.067>
- Bertanza G., Capoferri G.U., Carmagnani M., Icarelli F., Sorlini S., Pedrazzani R., 2020. Long-term investigation on the removal of perfluoroalkyl substances in a full-scale drinking water treatment

- plant in the Veneto Region, Italy. *Sci. Total Environ.* 734, 139154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139154>
- Boyer T.H., Fang Y., Ellis A., Dietz R., Choi Y.J., Schaefer C.E., Higgins C.P., Strathmann T.J., 2021. Anion exchange resin removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from impacted water: A critical review. *Water Res* 200, 117244. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117244>
  - Buck R.C., Franklin J., Berger U., Conder J.M., Cousins I.T., Voogt P. De, Jensen A.A., Kannan K., Mabury S.A., van Leeuwen S.P.J., 2011. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 7, 513–541. <https://doi.org/10.1002/ieam.258>
  - Du Z., Deng S., Bei Y., Huang Q., Wang B., Huang J., Yu G., 2014. Adsorption behavior and mechanism of perfluorinated compounds on various adsorbents - A review. *J. Hazard. Mater.* 274, 443–454. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.038>
  - Durán-Jiménez G., Stevens L.A., Hodgins G.R., Uguna J., Ryan J., Binner E.R., Robinson J.P., 2019. Fast regeneration of activated carbons saturated with textile dyes: Textural, thermal and dielectric characterization. *Chemical Engineering Journal* 378, 121774. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.135>
  - EPA, 2023. Proposed PFAS National Primary Drinking Water Regulation <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>
  - EU 2020/2184, Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament on the quality of water intended for human consumption; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32020L2184&from=IT>
  - Falciglia P.P., Gagliano E., Brancato V., Malandrino G., Finocchiaro G., Catalfo A., De Guidi G., Romano S., Roccaro P., Vagliasindi F.G.A., 2020. Microwave based regenerating permeable reactive barriers (MW-PRBs): Proof of concept and application for Cs removal. *Chemosphere* 251, 126582. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126582>
  - Falciglia P.P., Roccaro P., Bonanno L., De Guidi G., Vagliasindi F.G.A., Romano S., 2018. A review on the microwave heating as a sustainable technique for environmental remediation/detoxification applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 95, 147–170. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.031>
  - Gagliano E., Falciglia P.P., Zaker Y., Karanfil T., Roccaro P., 2021. Microwave regeneration of granular activated carbon saturated with PFAS. *Water Res* 198, 117121. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117121>
  - Gagliano E., Sgroi M., Falciglia P.P., Vagliasindi F.G.A., Roccaro P., 2020. Removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) from water by adsorption: Role of PFAS chain length, effect of organic matter and challenges in adsorbent regeneration. *Water Res.* 171, 115381. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115381>
  - ITRC, 2020. Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Technical and Regulatory Guidance Document. *Emerg. Contam. Handb.* 85–262. <https://doi.org/10.1201/b22226-3>
  - Park M., Wu S., Lopez I.J., Chang J.Y., Karanfil T., Snyder S.A., 2020. Adsorption of perfluoroalkyl substances (PFAS) in groundwater by granular activated carbons: Roles of hydrophobicity of PFAS and carbon characteristics. *Water Res* 170. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115364>
  - Rahman M.F., Peldszus S., Anderson W.B., 2014. Behaviour and fate of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water treatment: A review. *Water Res.* 50, 318–340. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.045>
  - Sun Y., Zhang B., Zheng T., Wang P., 2017. Regeneration of activated carbon saturated with chloramphenicol by microwave and ultraviolet irradiation. *Chem. Eng. J.* 320, 264–270.
  - Yang Z., Yi H., Tang X., Zhao S., Yu Q., Gao F., Zhou Y., Wang J., Huang Y., Yang K., Shi Y., 2017. Potential demonstrations of “hot spots” presence by adsorption-desorption of toluene vapor onto granular activated carbon under microwave radiation. *Chem. Eng. J.* 319, 191–199.
  - Wang J., Lin Z., He X., Song M., Westerhoff P., Doudrick K., Hanigan D., 2022. Critical Review of Thermal Decomposition of Per- and Polyfluoroalkyl Substances: Mechanisms and Implications for Thermal Treatment Processes. *Environ Sci Technol* 56, 5355–5370. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02251>
  - WHO Keeping Our Water Clean: The Case of Water Contamination in the Veneto Region, Italy; 2017
  - Xiao F., Sasi P.C., Yao B., Kubátová A., Golovko S.A., Golovko M.Y., Soli D., 2020. Thermal Stability and Decomposition of Perfluoroalkyl Substances on Spent Granular Activated Carbon. *Environ Sci Technol Lett* 7, 343–350. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00114>
  - Yang Z., Yi H., Tang X., Zhao S., Yu Q., Gao F., Zhou Y., Wang J., Huang Y., Yang K., Shi Y., 2017. Potential demonstrations of “hot spots” presence by adsorption-desorption of toluene vapor onto granular activated carbon under microwave radiation. *Chemical Engineering Journal* 319, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.157>
  - Zanella O., Tessaro I.C., Féris L.A., 2014. Desorption- and decomposition-based techniques for the regeneration of activated carbon. *Chem Eng Technol* 37, 1447–1459. <https://doi.org/10.1002/ceat.201300808>

## Ringraziamenti

Questo studio è stato parzialmente finanziato dall'Università di Catania nell'ambito del “Piano di incentivi per la Ricerca di Ateneo 2020/2022” del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Progetto “Materiali e Metodologie chimico-fisiche avanzate per l'abbattimento di contaminanti Xenobiotici (MaMeX)” e dalla Water Research Foundation (WRF) project 5103.

# IL COVID-19 E LA GESTIONE DEI RIFIUTI SANITARI IN CONTESTI A BASSO REDDITO: PROPOSTE PER UN QUARTIERE INFORMALE DI MAPUTO

Sofia De Giorgi<sup>1,\*</sup>, Mario Grosso<sup>1</sup>, Francesca Villa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

## Sommario

La pandemia COVID-19 e le relative misure di contenimento hanno determinato delle conseguenze nella generazione dei rifiuti e nella loro gestione e smaltimento. Si sono riscontrati incrementi quantitativi dei rifiuti sanitari generati, variazioni nella composizione e nelle caratteristiche qualitative, soprattutto relative al grado di infettività, e un ampliamento spaziale del luogo di generazione, non più circoscritto esclusivamente alle strutture sanitarie. Nei Paesi a basso reddito tali cambiamenti hanno messo in crisi i sistemi di gestione già fragili e vincolati, laddove esistenti.

Inserito all'interno del progetto HANDS, finalizzato alla promozione della salubrità nel quartiere informale Chamanculo C di Maputo (Mozambico), questo studio presenta delle proposte di gestione dei rifiuti infettivi derivanti dalla pandemia da COVID-19, col fine ultimo di fornire indicazioni e raccomandazioni generalizzabili e replicabili in situazioni simili.

Non essendoci strutture sanitarie nel quartiere, il sistema progettato tiene conto dei flussi di rifiuti infettivi generati a livello comunitario da tutti gli abitanti: sono considerati quindi i dispositivi di protezione individuale usati (in particolare mascherine e guanti) e i rifiuti associati agli individui positivi o in isolamento preventivo.

Dopo un'analisi delle caratteristiche qualitative e quantitative dei flussi individuati, si presenta la progettazione del sistema di gestione, che comprende le fasi di prevenzione, raccolta, stoccaggio, trattamento di disinfezione e smaltimento finale. Tali fasi sono progettate tenendo conto delle buone pratiche già in atto e dei vincoli dati dal contesto, integrando la raccolta nel sistema esistente, e considerando un trattamento mediante triturazione e sterilizzazione che possa essere gestito a livello locale e decentralizzato. La proposta di intervento così elaborata si presta come riferimento in caso di situazioni che richiedessero un adattamento urgente del sistema di raccolta.

**Parole chiave:** *rifiuti; rifiuti infettivi; gestione dei rifiuti sanitari; pandemia COVID-19; Paesi a basso reddito.*

## COVID-19 AND MEDICAL WASTE MANAGEMENT IN LOW-INCOME COUNTRIES: PROPOSALS FOR AN INFORMAL NEIGHBOURHOOD IN MAPUTO

### Abstract

The COVID-19 pandemic and the related prevention measures affected waste generation and its management and disposal. In particular, infectious medical waste has assumed great importance: consequently, its management represents a relevant and current challenge, especially in vulnerable and resource-poor contexts.

During the pandemic period the medical waste generation increases in quantity, its composition and qualitative characteristics – especially related to infectivity – change and it is no longer limited exclusively to healthcare facilities, but includes a wider community area. In low-income countries, these changes have undermined the already fragile and basic management systems, where they exist, causing slowdowns in collection services, interruptions in recycling activities, overloading of hazardous waste treatment facilities and its inadequate disposal.

The HANDS project, in which this work is included, is aimed at the innovative and sustainable development of an informal neighbourhood in a low-income country to respond to the needs of the post-emergency period from COVID-19 pandemic, providing for a medium and long-term medical waste management system. In particular, in this paper, an infectious waste management system is proposed for Chamanculo C, the informal district of Maputo (the capital of Mozambique).

Analysing the current situation and the correct procedures for the infectious waste management, this research shows an application example of practices and interventions for the COVID-19 waste management in low-income countries, highlighting the good practices and providing recommendations that can be generalized and replicated in similar situations.

Since there are no health facilities in the neighbourhood, the designed system considers the infectious waste flows which are generated at the community level by all the inhabitants. The personal protective equipment used (in particular masks and gloves), infectious waste, related

\* Piazza Leonardo da Vinci, 32. 20133, Milano. Tel 02.23996415. sofia.degiorgi@mail.polimi.it.

Ricevuto il 6-2-2023. Modifiche sostanziali richieste il 16-3-2023. Accettazione il 24-4-2023.

to COVID-19 positive patients in isolation in their own homes, and potentially infectious waste, related to people in quarantine who have come into contact with positive individuals, are the three waste flows generated in the neighbourhood, which have to be handled. After an analysis of the qualitative and quantitative characteristics of the identified flows, the waste management system planning is presented, which includes the stages of collection, storage, disinfection treatment, and final disposal.

Infectious and potentially infectious waste is collected together with a door-to-door collection system, performed with the same frequency, the same tools and by the same operators as the municipal solid waste collection in the district. In order to avoid cross-contamination, the waste flows must be kept separated, using different colours bags. This waste is transported by handcart to the storage site, which consists of a large container, where waste is accumulated before being moved to the treatment site, located in the health centre. The treatment consists of an integrated steam sterilization process and shredding, to obtain residues with a negligible infectious load and with a reduced volume. Finally, sterilized waste is disposed of in the landfill.

The waste deriving from PPE is generated by all the inhabitants of the neighbourhood. Therefore, the collection system consists of waste bins, placed in widely frequented and strategic points of the district. Only used PPE is collected in the containers provided, so that a highly specific waste flow is created, in order to optimize the subsequent phases of the management system. At the same

time, this collection way involves the population of the neighbourhood, who raise awareness of the topics relating to waste and COVID-19 contamination risks. The PPE waste bags are transported to the storage site, which is located in the health centre, with a frequency regulated by the MSW collection system, by the size of the intervention area, and by the quantity of containers placed in the neighbourhood. Also in this case, waste is treated by the steam sterilization and shredding process, keeping the two flows separated, because of their different final destination. In particular, PPE waste is integrated into the building materials production process, offering an alternative solution to landfill disposal.

Furthermore, alternative treatment is evaluated, if the economic, technological, and managerial constraints of the context are particularly restrictive. It consists of waste quarantine for a certain period, in order to eliminate the viral load of the SARS-CoV-2 virus.

Finally, there are also proposals applicable at the community level for the reduction of medical waste generation in the long term, replacing disposable masks with reusable and cloth ones. Therefore, the fabric masks management system is designed, consisting of the phases of collection, washing, drying, and re-distribution in the health centre.

---

**Keyword:** *waste; infectious waste, medical waste management; COVID-19 pandemic; low-income countries*

---

## 1. Introduzione

Con l'arrivo della pandemia COVID-19, la vita quotidiana e le abitudini dell'intera popolazione mondiale sono cambiate, comportando degli impatti di carattere sanitario, economico, sociale ed ambientale a larga scala. L'intensità di tali impatti è dipesa di volta in volta dal contesto: se in molti luoghi le autorità competenti hanno raccomandato e hanno messo in atto delle misure di contenimento, precauzionali in un'ottica di protezione sanitaria, in alcuni casi tali misure hanno esacerbato le criticità dei contesti più vulnerabili e dei ceti sociali più fragili.

Un esempio di questi impatti è legato ai rifiuti, che in seguito alla diffusione dei dispositivi di protezione individuale e ad altre procedure sanitarie hanno subito una variazione in termini qualitativi e quantitativi. Ne sono conseguiti la crisi dei sistemi di gestione e di raccolta (IFC, 2020) e l'aumento del volume dei rifiuti contaminati in discarica (Zand e Heir, 2020), maggiormente critici nei paesi a basso reddito, dove già normalmente gli standard di sicurezza nella movimentazione dei rifiuti sono carenti (UNEP, 2020).

In questo panorama si inserisce il progetto HANDS (Health AND urban Space), finalizzato alla promozione della salubrità nel quartiere informale di Chaman-culo C a Maputo, in Mozambico. L'obiettivo principale del progetto è rappresentato dalla progettazione di un sistema di produzione e distribuzione sul territorio di una soluzione disinfettante (la Polichina), con l'ipotesi che una maggiore accessibilità a livello locale a tale preparato possa contribuire al contenimento della diffusione del virus e al miglioramento delle condizioni igienico-sanitarie. Considerando come la vulnerabilità sanitaria sia una questione complessa che richiede una visione ampia, multidisciplinare e olistica, nella quale i fattori ambientali, sociali, gestionali e sanitari sono strettamente interconnessi, a tale intervento ne sono stati associati altri, tra cui anche la gestione dei rifiuti sanitari generati nel quartiere nel periodo emergenziale pandemico, di cui tratta il presente articolo.

I numerosi studi sulla generazione dei rifiuti da COVID-19 esprimono raccomandazioni e suggerimenti per la loro corretta e sicura gestione, senza tuttavia presentarne l'applicazione a casi specifici (Adelodun

et al., 2021, Adusei-Gyamfi et al., 2022, Das et al., 2021, El-Ramady et al., 2021). Gli studi riguardanti gli impatti del COVID-19 nei contesti informali (Corburn et al., 2021; Duque Franco et al., 2020; Wilkinson et al., 2020), pur considerando anche i fattori sociali, economici e politici, si limitano a proporre forme di prevenzione e di contenimento della diffusione del virus in zone densamente abitate.

In questa trattazione si teorizza quindi una strategia di intervento per la gestione per i rifiuti derivanti dalla pandemia COVID-19 in un contesto specifico. La progettazione e il dimensionamento dell'intero sistema comprendono le fasi di prevenzione, raccolta, stoccaggio, trattamento e smaltimento finale dei rifiuti.

Mettendo in relazione la situazione attuale nel quartiere di Chamanculo C con le corrette pratiche di gestione, ed evidenziando inoltre le buone prassi già in opera (talora generalizzabili, replicabili e sostenibili), questa ricerca rappresenta una traccia per la pianificazione di interventi per la gestione di rifiuti infettivi, derivanti dal COVID-19 o da malattie analoghe, in Paesi a basso reddito, e particolare in contesti caratterizzati da condizioni igienico-sanitarie critiche.

### 1.1. I rifiuti infettivi

I rifiuti sanitari, definiti come la totalità dei rifiuti generati dalle strutture sanitarie (WHO, 2014), rappresentano una delle tipologie di rifiuti maggiormente pericolose (UNEP, 2018), e necessitano quindi di dedicate e specifiche modalità di gestione, trattamento e smaltimento.

La gran parte dei rifiuti sanitari pericolosi appartiene alla categoria dei rifiuti infettivi, definiti come materiale contaminato da microrganismi patogeni (batteri, virus, parassiti o funghi) in una quantità o concentrazione tale da far insorgere la malattia in coloro che ne vengono a contatto tramite inalazione, ingestione o esposizione cutanea. Questa categoria include i rifiuti contaminati con sangue o altri fluidi corporei, i rifiuti di pazienti infetti in isolamento, i dispositivi di protezione individuale (DPI) come mascherine, guanti, abiti e bendaggi contaminati e colture di agenti infettivi coltivati in laboratorio (WHO, 2014).

La pericolosità del rifiuto infettivo dipende dalle sue caratteristiche intrinseche: la potenziale infettività porta il rifiuto ad essere veicolo di malattie ed infezioni verso chi ne è esposto, come il personale sanitario e i lavoratori del settore dei rifiuti. La corretta gestione dei rifiuti infettivi, perciò, rappresenta una forma di prevenzione della diffusione di malattie generate dagli organismi patogeni. Al contrario, laddove i rifiuti non sono gestiti in maniera adeguata, sono abbandonati lungo le strade o smaltiti nelle discariche non controllate – come spesso accade nei Paesi a basso reddito

(Ali et al., 2017, Emilia et al., 2015) – tutta la popolazione risulta esposta ad alti rischi di contaminazione, aggravando le situazioni già vulnerabili da un punto di vista sanitario e sociale (WHO, 2014).

La gestione dei rifiuti infettivi si basa su una ben nota gerarchia. Per pianificare un sistema di gestione dei rifiuti idoneo al contesto di applicazione, si devono valutare vari fattori e vincoli: le caratteristiche qualitative e quantitative del flusso di rifiuti da trattare, il livello di sviluppo economico e tecnologico del contesto, la disponibilità di spazio e di risorse, gli impatti ambientali e sociali.

### 1.2. Il COVID-19 e i rifiuti infettivi

La pandemia COVID-19 è un'epidemia della malattia infettiva causata dal virus SARS-CoV-2, diffusasi in tutto il globo dalla fine del 2019 (dichiarata pandemia da marzo 2020 dall'OMS). Il principale mezzo di trasmissione è la particella liquida che viene emanata dalla bocca o dal naso del soggetto infetto, sintomatico o asintomatico, e inalata dal recettore. La principale sintomatologia consiste in difficoltà respiratorie, che possono essere piuttosto gravi nei soggetti fragili, richiedendo anche ricoveri in ospedale (WHO, 2023).

L'OMS e i governi dei singoli Paesi nel mondo hanno indicato delle procedure da seguire per contenere la diffusione dei contagi, quali mantenere la distanza interpersonale di sicurezza di almeno un metro, utilizzare una mascherina protettiva che copra naso e bocca, lavare frequentemente le mani con acqua e sapone o applicare del gel disinfettante a base alcolica. Nel caso in cui l'individuo inizi a mostrare dei sintomi, è fortemente consigliato l'isolamento fino alla guarigione. Dapprima, si raccomandava solamente agli operatori medico-sanitari e a tutti coloro che entrano in contatto con individui infetti l'utilizzo di dispositivi di protezione individuale (DPI). Successivamente, molti Paesi hanno imposto l'obbligo dell'uso della mascherina nei luoghi pubblici per tutta la popolazione (WHO, 2022).

A causa della pandemia COVID-19 e delle relative misure di contenimento, la generazione di rifiuti sanitari ha subito una variazione in termini di quantità, composizione, distribuzione spaziale e grado di infettività. Data l'alta contagiosità del virus e le gravi implicazioni sanitarie associate, il numero di ricoveri ospedalieri è incrementato notevolmente, causando una crescita nella quantità di rifiuti sanitari prodotti, sia nei Paesi più ricchi sia in quelli più poveri (Das et al., 2021). Come già anticipato, i rifiuti generati dai pazienti infetti dal virus SARS-CoV-2 sono considerati infettivi, così come tutti i DPI. Aumentano anche i volumi di altre tipologie di rifiuti medici, come le siringhe, i tamponi, i contenitori in plastica di gel disinfettante, i bendaggi, i rifiuti associati ai test antigenici e mole-

colari e alle vaccinazioni anti-COVID-19 (Haque et al., 2021; Das et al., 2021). Inoltre, la generazione dei rifiuti infettivi non è più circoscritta esclusivamente alle strutture sanitarie, ma anche ai centri di quarantena e alle abitazioni di individui in isolamento positivi al virus (Sharma et al., 2020). I relativi rifiuti urbani sono da assimilarsi ai rifiuti infettivi e da trattarsi come tali (Haque et al., 2021).

Durante il periodo pandemico i rifiuti che assumono maggiore interesse e attenzione sono i DPI contaminati, a causa delle ingenti quantità generate e per i potenziali impatti negativi sulla salute umana e sull'ambiente (Nzediegwu and Chang, 2020). Le mascherine sono costituite da materiale polimerico (polipropilene e polietilene), che rappresenta un supporto per la crescita di microorganismi patogeni, come il virus SARS-CoV-2, in grado di sopravvivere fino a 9 giorni alle condizioni ambientali (Kampf et al., 2020). Se da un lato tali dispositivi proteggono dalla diffusione del virus tra due individui, dall'altro, se non sono opportunamente smaltiti, possono rappresentare un'altra via di contagio (Prata et al., 2020). Inoltre, il materiale polimerico contribuisce all'inquinamento da macroplastiche e microplastiche negli ecosistemi marini e costieri, causando danni all'ambiente anche a lungo termine (Prata et al., 2020).

Per la gestione dei rifiuti sanitari da COVID-19 prodotti dalle strutture sanitarie, le linee guida internazionali raccomandano di seguire le normali procedure per la gestione dei rifiuti infettivi. Per tutte le fasi della gestione dei rifiuti sanitari, è raccomandato che il personale sanitario e gli operatori ecologici siano equipaggiati di adeguati DPI, come mascherine, guanti, stivali in gomma, tuta da lavoro (UNEP, 2020). Per la gestione dei rifiuti generati dai soggetti positivi in isolamento nelle proprie abitazioni, è necessaria la separazione dei rifiuti contaminati, inclusi mascherine e guanti, da quelli non contaminati e la raccolta all'interno di un doppio sacchetto, su cui è segnalato che sono rifiuti COVID-19 (Sharma et al., 2020). Si raccomanda che i sacchetti, una volta chiusi e disinfettati, siano raccolti da servizi speciali per la raccolta di rifiuti infettivi e trattati come rifiuti ospedalieri dalle autorità locali (WHO, 2020; UNEP, 2020).

### 1.3. Impatti nei contesti a basso reddito

Le variazioni quantitative e qualitative dei rifiuti generati hanno aggravato le criticità dei sistemi di gestione in contesti già fragili, causando rallentamenti nei servizi di raccolta, interruzioni della attività di riciclaggio, sovraccarico delle strutture di trattamento dei rifiuti pericolosi e relativo smaltimento inadeguato (UNEP, 2020; IFC, 2020). Inoltre, la carenza di misure appropriate per la gestione di mascherine e DPI usati

determinano un aumento dei volumi di rifiuti infettivi nelle discariche, comportando anche la contaminazione dei rifiuti urbani (Zand e Heir, 2020). In generale, la potenzialità di trasmissione del virus aumenta in presenza di pratiche di gestione dei rifiuti inappropriate, dove le occasioni di contatto diretto coi rifiuti sono maggiori (Iyer et al., 2021), e con la messa in atto di alcune pratiche dannose per la salute umana e per l'ambiente: per esempio, in Nigeria è stato riscontrato che i raccoglitori informali tendano a cercare le mascherine smaltite nelle discariche e rivenderle per il riutilizzo (Benson et al., 2021); in Bangladesh, la scarsità di strutture che trattano i rifiuti sanitari ha portato i centri sanitari a bruciare i loro stessi rifiuti o a mischiarli con i rifiuti urbani non pericolosi (El-Ramady et al., 2021); va citato infine il rischio connesso alla pratica diffusa del riutilizzo delle bottiglie di plastica, se contaminate (Nzediegwu and Chang, 2020).

Lo sviluppo sociale, economico e tecnologico del continente africano richiede l'introduzione di un metodo di gestione dei rifiuti sanitari che sia sostenibile, cioè comprenda criteri di salvaguardia ambientale, coinvolgimento sociale e convenienza economica. Tuttavia, importare le soluzioni dai Paesi più tecnologicamente ed economicamente avanzati in contesti in via di sviluppo non rappresenta la scelta più conveniente per arrivare ai migliori risultati. Sorge, dunque, la necessità di sviluppare soluzioni alternative che emergano dalle esigenze locali, che coinvolgano le comunità e siano quanto più decentralizzate, flessibili e a piccola scala, con implicazioni facilmente gestibili con le risorse disponibili (Adusei-Gyamfi et al., 2022). È bene tenere conto delle pratiche sostenibili per la gestione integrata dei rifiuti già in atto in questi territori, quali la riduzione della produzione dei rifiuti, a partire dal limitato consumo legato allo stile di vita sobrio, l'utilizzo di mascherine lavabili e riutilizzabili e l'integrazione di sistemi informali nella gestione dei rifiuti.

## 2. Il caso studio e l'inquadramento del contesto

### 2.1. Il progetto HANDS

Il progetto HANDS (Health AND Urban Space) è uno studio di ricerca multidisciplinare finanziato all'interno del programma di responsabilità sociale del Politecnico di Milano Polisocial Award 2020, il cui scopo è promuovere soluzioni innovative a problematiche sociali.

Lo studio ha come obiettivo generale la promozione della salubrità a Chamanculo C, ed è incentrato sulla creazione di un "laboratorio sociale" dedicato alla produzione locale di una soluzione disinfettante e la sua distribuzione sul territorio tramite l'utilizzo di dispensers. In un contesto informale, si ipotizza co-

me tale intervento possa avere benefici nel breve e nel lungo termine, permettendo di affrontare non solo l'emergenza pandemica, ma di ridurre al tempo stesso la diffusione di altre malattie legate alle condizioni insalubri. Inoltre, una produzione locale caratterizzata da bassi costi potrebbe aumentare l'autonomia del quartiere rispetto ad aiuti esterni. La maggiore sfida consiste nel rendere il sistema progettato autosufficiente, sostenibile e replicabile.

Intorno a questo nucleo progettuale si sviluppano anche altre azioni: la progettazione di un sistema di gestione dei rifiuti sanitari associati al COVID-19, la creazione di un modello appropriato per la produzione energetica da fonti rinnovabili, a livello domestico e di comunità, e, infine, il trasferimento delle conoscenze tecniche ai lavoratori locali. Gli interventi, dapprima elaborati in modo autonomo, entreranno poi in sinergia tra loro, per rispondere in maniera olistica ad un problema complesso.

Lo studio ha visto la collaborazione tra cinque dipartimenti del Politecnico di Milano e altri quattro partners (incaricati degli aspetti gestionali, finanziari, socio-economici e procedurali). Ogni dipartimento ha contribuito secondo le proprie competenze. Il CMIC (Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica) è l'ideatore della Polichina, la soluzione disinfettante sviluppata e autoprodotta dal Politecnico di Milano nel 2020 per fronteggiare l'emergenza COVID-19; all'interno dello studio, il CMIC si è occupato di tutti gli aspetti produttivi, sviluppando un macchinario per la produzione del disinfettante secondo due possibili formulazioni (a base di etanolo o di isopropanolo) (WHO, 2010) e diverse possibili scale di intervento. Il DASU (Dipartimento di Architettura e Studi Urbani) e il DABC (Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito) si sono occupati dell'analisi urbanistica e della progettazione del laboratorio, e il DENG (Dipartimento di Energia) della sostenibilità energetica. Infine, il DICA (Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale) ha preso in carico gli aspetti relativi alla gestione dei rifiuti legati alla distribuzione del disinfettante e dei rifiuti infettivi, oggetto del presente articolo. Una delegazione dei cinque dipartimenti ha effettuato nell'ottobre del 2021 una missione a Maputo, svolgendo una raccolta dati sul campo anche grazie al supporto della ONG italiana AVSI. Il report finale è stato consegnato a febbraio 2023.

## 2.2. Area di intervento: Chamanculo C

L'area di intervento del progetto HANDS è un quartiere informale della capitale del Mozambico. Secondo il report sullo sviluppo umano del 2020 per il Mozambico (UNDP, 2020), il valore dell'indice di sviluppo umano (ISU) del Mozambico per il 2019 risulta pari a

0,456, posizionando il Paese nella categoria di basso sviluppo umano e ponendolo al posto 181 sui 189 Paesi considerati.

Chamanculo è un quartiere periferico di Maputo, abitato da circa 150.000 persone (secondo il censimento del 2017) e suddiviso in quattro aree, Chamanculo A, Chamanculo B, Chamanculo C e Chamanculo D. Il presente studio si focalizza su Chamanculo C: quest'area è caratterizzata da un'alta densità abitativa (circa 26.000 abitanti in 1,4 km<sup>2</sup>) e da standard di vita medio-bassi (Stretz, 2012). Da un punto di vista urbanistico, il quartiere si è sviluppato in maniera disordinata e non pianificata, è costituito principalmente da vicoli stretti ed è soggetto ad allagamenti nella stagione piovosa, rendendo difficoltosa la circolazione dei veicoli. L'accessibilità limitata ai servizi essenziali (come acqua potabile, rete fognaria e sistema di gestione dei rifiuti), la mancanza di strutture sanitarie e il sovraffollamento favoriscono la diffusione di malattie, correlate alle scarse condizioni igienico-sanitarie.

La pandemia COVID-19 e le relative misure precauzionali hanno aggravato le condizioni di vita, già critiche, degli abitanti del quartiere e, in particolare, delle categorie sociali più vulnerabili. Lavare le mani con acqua e sapone rappresenta una pratica semplice e basilare per mantenere un'adeguata igiene e per proteggersi dal COVID-19; tuttavia, nelle abitazioni e nelle strutture pubbliche del quartiere, l'accesso all'acqua corrente non è dovunque garantito. Ciò comporta che i luoghi dotati di acqua pulita e di servizi igienici risultino essere sovraffollati, apportando un maggiore rischio di diffusione del virus. La chiusura momentanea dei luoghi pubblici e la raccomandazione di mantenere la distanza interpersonale rendono impossibile l'isolamento dei malati nelle piccole abitazioni nei quartieri informali. Inoltre, la chiusura delle scuole, che garantiscono istruzione, salute e buone condizioni di vita degli studenti, ha determinato forti impatti negativi sulla vita quotidiana dei bambini. Come DPI, sono ampiamente diffuse le mascherine monouso, che in alcuni casi sono lavate e riutilizzate, e le mascherine di comunità, tessute in capulana, una stoffa tipica dell'Africa orientale. Il Dipartimento di Salute e Ambiente della città di Maputo ha avviato una sartoria sociale per la fabbricazione di mascherine in stoffa, in prevenzione ai grandi impatti negativi sugli ecosistemi marini e costieri.

## 2.3. Gestione dei rifiuti solidi urbani a Chamanculo C

Per l'intera città di Maputo la responsabilità della gestione dei rifiuti solidi urbani (RSU) ricade sulla Municipalità di Maputo, che si occupa della pulizia stradale, della raccolta dei RSU, della gestione opera-

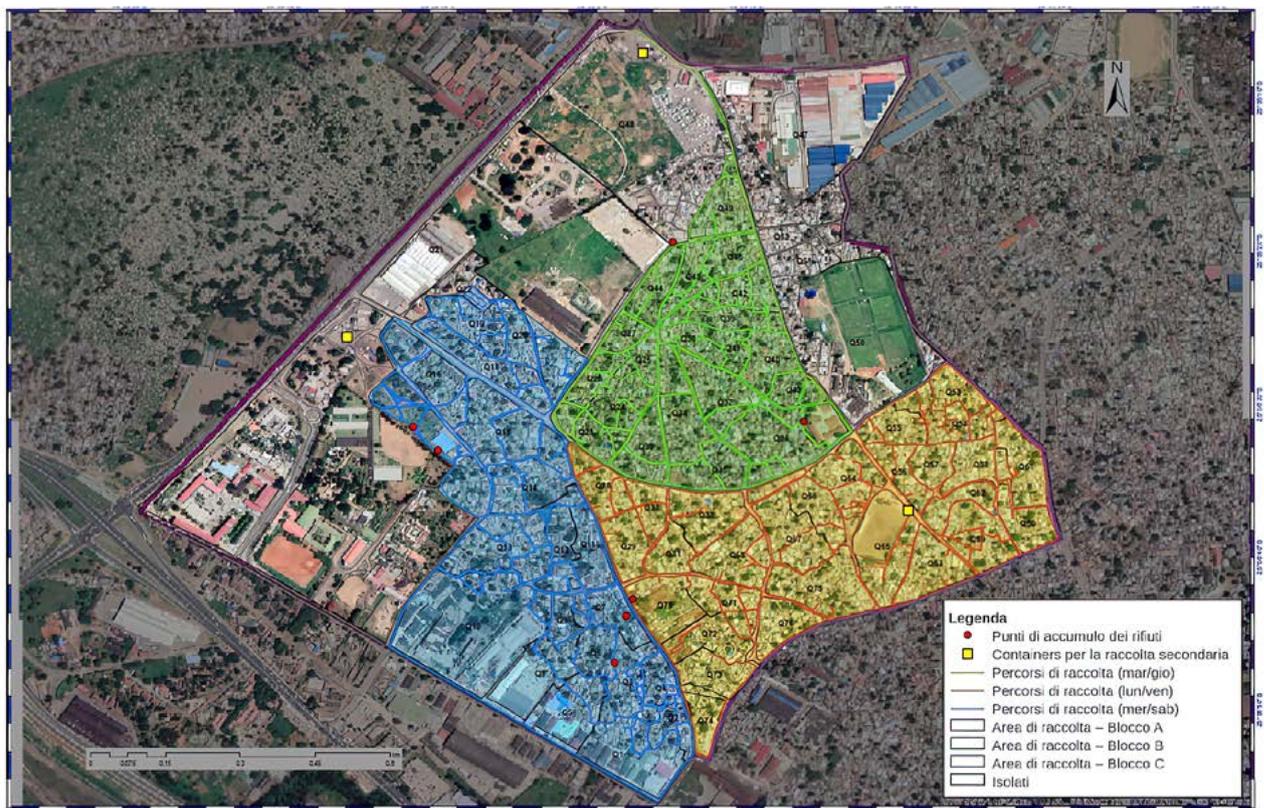
tiva e della manutenzione della discarica di Hulene, che rappresenta il sito ufficiale di smaltimento finale, e dell'eliminazione dei siti di smaltimento illegali. Le attività di raccolta differenziata, riciclaggio e compostaggio sono lasciate al settore privato, spesso in collaborazione con la Municipalità. I produttori di rifiuti non urbani sono responsabili della loro gestione, con la mediazione di imprese private (Stretz, 2012).

I RSU generati e raccolti nel quartiere di Chamanculo hanno una composizione principalmente costituita dalla frazione fine (48,40%), in particolare cenere (il combustibile utilizzato per cucinare è la legna o il carbone) e sabbia, e dalla frazione organica (37,00%), seguite dagli imballaggi (12,6%), come plastica (6,60%), carta (3,20%) e vetro (2,80%). La restante parte è costituita da metalli (2,80%) e da articoli igienici (0,80%) (Stretz, 2012). Da un punto di vista quantitativo, si stima che il tasso di generazione dei RSU nel distretto sia pari a  $0,49 \text{ kg ab}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (Dos Muchangos et al., 2017). Tale valore risulta inferiore a quello relativo ai quartieri del centro città ( $1,15 \text{ kg ab}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ), in cui le condizioni di vita degli abitanti sono migliori. Anche la composizione dei RSU mostra delle differenze, dovute dalla densità abitativa del quartiere, dalla presenza di servizi e attività commerciali o della ristorazione e dalla qualità della vita degli abitanti. Infatti, nel centro città i RSU sono costituiti prin-

cipalmente dalla frazione organica (63,70%) e dagli imballaggi (25,3%) (Stretz, 2012).

Per quanto riguarda la fase di raccolta, si stima una copertura del servizio superiore al 90% per l'intera città di Maputo, anche se tale valore può essere inferiore nelle periferie (Dos Muchangos et al., 2017). A Chamanculo C la raccolta dei RSU è organizzata in due passaggi: la raccolta primaria e la raccolta secondaria. Nella raccolta primaria i rifiuti sono conferiti con un sistema porta a porta, tramite l'utilizzo di carretti trasportati a mano (*tchovas*). Il quartiere è suddiviso in tre blocchi (A, B e C) e per ogni blocco la raccolta viene effettuata due volte a settimana, secondo la seguente programmazione (Fig. 1): lunedì e giovedì nel blocco A (giallo), martedì e venerdì nel blocco B (verde) e mercoledì e sabato nel blocco C (azzurro). I rifiuti raccolti sono trasportati e depositati in ampi containers, posizionati nel quartiere (Fig. 1), della capienza di 6-12  $\text{m}^3$ . Nella raccolta secondaria i tre containers, carichi di rifiuti, sono trasportati giornalmente da camion alla discarica di Hulene, dove vengono scaricati (Dos Muchangos et al., 2017, Stretz, 2012, HANDS, 2023). Gli operatori addetti alla gestione dei RSU sono equipaggiati con i DPI forniti dalla Municipalità, come mascherine, guanti e stivali.

I trattamenti di riciclaggio o compostaggio sono organizzati e gestiti da imprese private e associazioni, in



**Figura 1.** Suddivisione in blocchi per la raccolta primaria dei RSU a Chamanculo C e posizionamento dei containers per la raccolta secondaria (adattamento da AVSI, 2021).

collaborazione con la Municipalità. I materiali recuperati dai rifiuti, specialmente metalli, plastica, carta e cartone, vetro, RAEE e olio da cucina, sono venduti al mercato locale e internazionale (Dos Muchangos et al., 2017). Per esempio, l'impresa RECICLA compra i rifiuti in plastica, che sottopone a lavaggio e triturazione, per venderli successivamente a FACOBOL, un'impresa che si occupa della produzione di gomma, e a AGRIPLAS, un'azienda produttrice di plastica (AVSI, 2021). I raccoglitori informali, chiamati *catadores*, contribuiscono al sistema di riciclaggio, selezionando i materiali (metalli, plastica ed eccezionalmente vetro) nella discarica di Hulene o nei cassonetti lungo le strade del quartiere. L'attività dei *catadores* è generalmente individuale e competitiva (Allen e Joassias, 2011).

### 3. Materiali e metodi per il dimensionamento del sistema di gestione dei rifiuti sanitari

#### 3.1. Contesto progettuale e scenari di intervento

Il principale obiettivo dello studio di ricerca consiste nella progettazione di un efficiente sistema di distribuzione della Polichina nel quartiere di Chamanculo C. Grazie all'uso della metodologia *IMM (Integrated Modification Methodology)* (Masera & Tadi, 2020), uno strumento di analisi urbanistica del territorio in grado di identificare le cause e la natura dei malfunzionamenti in un sistema urbano, il team DABC ha selezionato tre punti in cui potenzialmente posizionare il distributore di disinfettante. Tra i criteri di valutazione si considerano il massimo numero di abitanti raggiunti e

l'integrazione del dispenser nel contesto sociale, tramite la localizzazione in luoghi pubblici del quartiere. Nella Figura 2, per ognuno dei tre punti, sono state tracciate le linee isocrone che delimitano l'area attorno al sito di distribuzione, il cui tempo di raggiungimento a piedi arriva fino a 2 minuti e a 4 minuti. Inoltre, è mostrata anche la distribuzione della densità abitativa e della densità delle attività dell'area. In corrispondenza del sito 2 nella Figura 2, si trovano un ex centro di salute, ad oggi inutilizzato, un mercato e una scuola primaria.

Per la pianificazione del sistema di gestione dei rifiuti sanitari nel quartiere, si prende come punto di riferimento l'ex centro di salute, dato che i locali sono vuoti e potenzialmente utilizzabili ai fini del progetto, si inserisce in un contesto socialmente attivo e si colloca in una zona del quartiere densamente abitata e ampiamente frequentata. Pertanto, in fase di progettazione si valutano due scenari di intervento che si differenziano in base alla vastità dell'area di territorio che ricoprono e al bacino di utenza che usufruisce del servizio.

- Scenario 1: copertura dell'area intorno all'ex centro di salute, delimitata dalla linea isocrona relativa ai 4 minuti. Gli abitanti dell'area (circa 6482) sono i soli che beneficiano dei servizi pianificati di gestione dei rifiuti. Tutti gli interventi si effettuano solamente in quest'area.
- Scenario 2: copertura di tutto il quartiere di Chamanculo C, la cui popolazione è pari a circa 26.000 abitanti (dal censimento del 2017). Le fasi di raccolta e stoccaggio interessano tutto il territorio del quartiere, mantenendo nell'ex centro di salute quelle centralizzate.

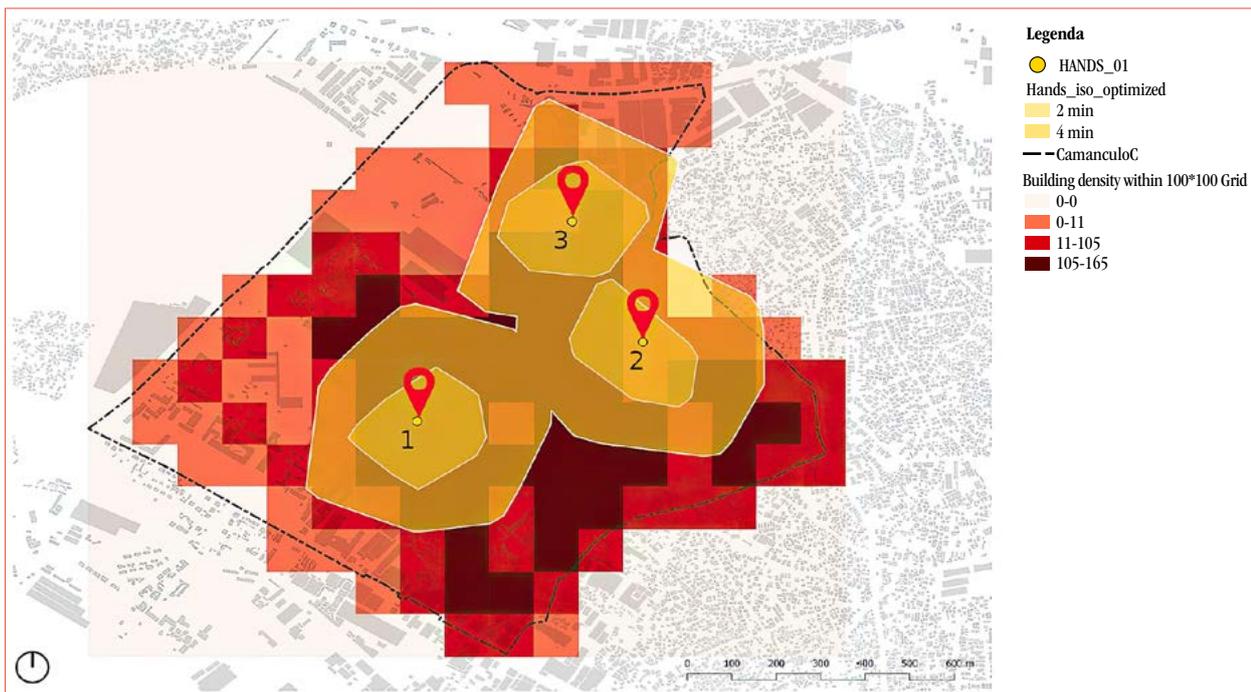


Figura 2. Analisi urbanistica del territorio di Chamanculo C (HANDS, 2023).

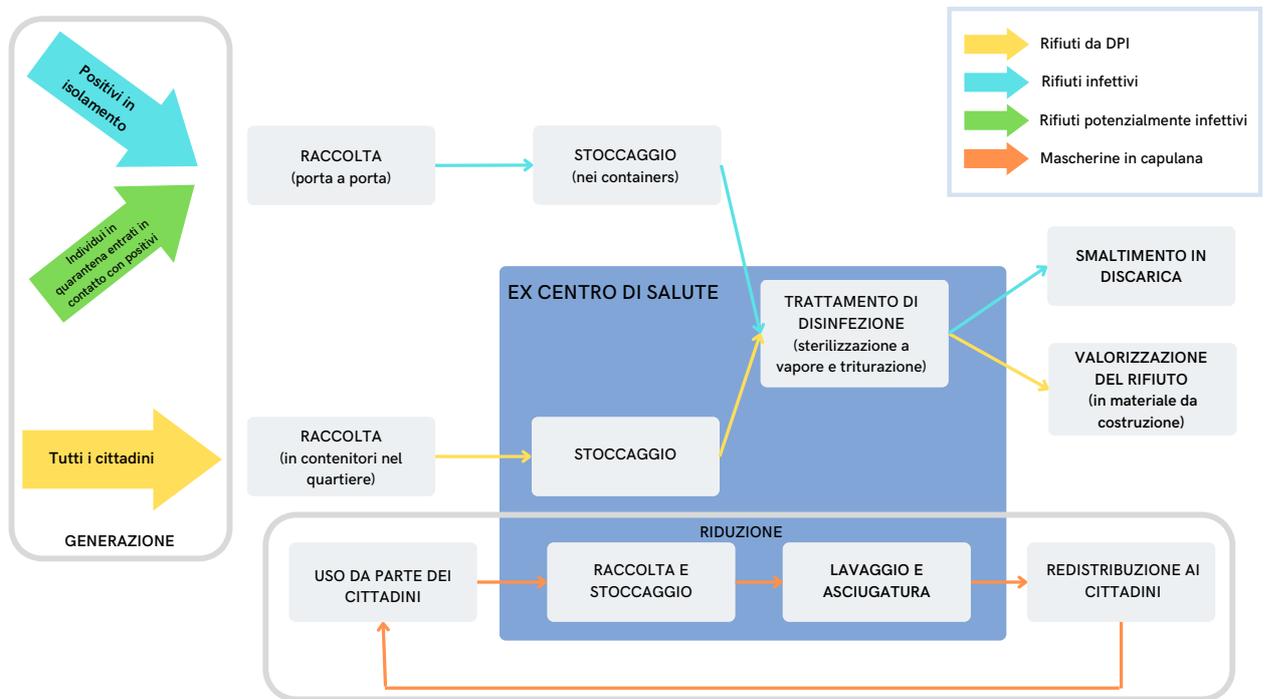


Figura 3. Diagramma di flusso.

### 3.2. Criteri di progettazione

Il sistema di gestione dei rifiuti sanitari è stato progettato seguendo le indicazioni per la gestione integrata dei rifiuti, nonché le linee guida internazionali e le buone pratiche per la gestione dei rifiuti infettivi durante la pandemia COVID-19. Anche i vincoli logistici, tecnologici, economici ed ambientali del contesto di applicazione sono stati tenuti in considerazione. In aggiunta, il continuo confronto con gli altri gruppi tematici coinvolti nella ricerca ha permesso di modellare una proposta che risponda alle esigenze del quartiere in ogni suo aspetto.

Il sistema finale è costituito dalle fasi di raccolta, stoccaggio, trattamento e smaltimento finale o valorizzazione del rifiuto, dimensionate per ciascuno dei flussi di rifiuti sanitari generati nel quartiere, come mostrato nel diagramma di flusso nella Figura 3. In particolare, le fasi sono progettate in modo diverso per le differenze tra i flussi di rifiuti, in base alle loro caratteristiche intrinseche di tipo fisico, merceologico e di origine. Nel diagramma di flusso è mostrato anche il sistema di gestione delle mascherine in stoffa, basato sul ritiro, trattamento e redistribuzione a livello centralizzato di quartiere. Di seguito nella trattazione, si illustrano le modalità di gestione e il dimensionamento di ciascuna fase nel dettaglio.

### 3.3. Generazione

Al fine di pianificare un efficiente sistema di gestione dei rifiuti, è necessario individuare i flussi che interessano l'area in esame e definirne le caratteristiche

quantitative e qualitative. A tale scopo è stato necessario ricorrere a dati di letteratura per sopperire alla mancanza di dati specifici, strategia spesso necessaria in contesti a basso reddito (Domini et al., 2018); quest'approssimazione è pertanto da considerare in fase di interpretazione.

Nel territorio di Chamanculo C non sono presenti ospedali, centri di salute, farmacie o altre strutture sanitarie. Pertanto, i flussi di rifiuti sanitari da gestire durante il periodo di pandemia COVID-19 consistono in quelli generati a livello comunitario:

- rifiuti infettivi, generati dai soggetti positivi al COVID-19 in isolamento nelle proprie abitazioni;
- rifiuti potenzialmente infettivi, generati dai soggetti in quarantena entrati in contatto con positivi;
- rifiuti da DPI, in particolare mascherine e guanti, generati da tutti i cittadini.

Dato che il quartiere manca di farmacie o altre strutture sanitarie, si è ragionevolmente ipotizzato che i rifiuti derivanti dai test diagnostici del COVID-19 non siano prodotti nell'area. Similmente, si assume che i rifiuti relativi alle vaccinazioni siano gestiti e smaltiti dagli enti responsabili della campagna vaccinale nel quartiere.

Si evidenzia come gli interventi precauzionali (isolamento e quarantena) determinino delle grandi variazioni della vita quotidiana, aggravando le condizioni di vita delle categorie sociali più vulnerabili, in particolare donne, bambini e anziani (Krauss et al., 2022). La decisione del governo del Mozambico di non ricorrere a un lockdown generale ha voluto quindi tutelare le famiglie più povere e vulnerabili, che avreb-

bero dovuto scegliere tra il rischio di contrarre il COVID-19 e la fame (Betho et al., 2022).

### 3.3.1. Generazione dei rifiuti infettivi

Come già anticipato, i rifiuti infettivi sono associati ai soggetti positivi sintomatici in isolamento nelle proprie abitazioni. Per gli individui malati e positivi al COVID-19, lo stato del Mozambico ha imposto l'obbligo dell'isolamento dalle altre persone per prevenire la diffusione del virus (CoM, 2020, MISAU, 2020). La composizione merceologica del rifiuto risulta molto simile a quella dei RSU, ipotizzando una maggiore produzione di rifiuti associati alla frazione degli articoli igienici necessari alla cura del malato. Infatti, si presuppone che tale frazione sia costituita da fazzoletti, salviette, prodotti da bagno e per l'igiene, garze e medicinali.

L'incremento relativo alla frazione degli articoli igienici è assunto pari al 500% (UNEP, 2020), in modo da stimare il tasso di generazione dei rifiuti infettivi, poiché i dati di letteratura su tale parametro non sono abbastanza dettagliati o generalizzabili ad ogni situazione e contesto (UNEP, 2020). Il valore stimato risulta pari a  $0,51 \text{ kg persona}^{-1} \text{ d}^{-1}$  (si ricorda che il tasso di generazione di RSU a Chamanculo è pari a  $0,49 \text{ kg ab}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ).

Grazie alle serie di dati epidemiologici della pandemia COVID-19, giornalieri e cumulativi (dal 6 febbraio 2021 al 27 marzo 2022), forniti dal portale del Ministero della Salute del Mozambico e riferiti sia al territorio nazionale sia alle singole province, si stima il numero totale di pazienti attualmente infetti in isolamento per la città di Maputo. Per Chamanculo C è sufficiente effettuare una proporzione considerando la popolazione della città di Maputo, pari a 1.101.170 abitanti secondo il censimento del 2017, e la popolazione dell'area presa in esame.

### 3.3.2. Generazione dei rifiuti potenzialmente infettivi

I rifiuti potenzialmente infettivi sono generati dagli individui in quarantena perché sono entrati in contatto con soggetti positivi, come già visto, e non hanno ancora accertato la loro positività al virus. Gli individui entrati in contatto con casi positivi e la cui positività non è ancora stata testata e accertata devono porsi in quarantena per un periodo (di norma 14 giorni) definito in base alla normativa vigente e deciso dall'autorità pubblica (MISAU, 2020, MISAU, 2021). Poiché non presentano alcun sintomo, si presuppone che la composizione dei rifiuti che producono non subisca una variazione qualitativa o quantitativa rispetto ai RSU, dei quali assumono anche il valore del tasso di generazione. In base a queste ipotesi, i rifiuti infettivi e potenzialmente infettivi presentano

delle caratteristiche qualitative simili e una composizione altamente eterogenea.

Similmente al caso dei rifiuti infettivi, il numero di individui entrati in contatto con positivi è stato definito ricorrendo ai dati epidemiologici giornalieri e cumulativi disponibili e supponendo che il numero di contatti per ogni individuo infetto rimanga invariato nello spazio. In questo modo si ottiene l'andamento nel tempo della generazione di rifiuti potenzialmente infettivi per l'area interessata.

### 3.3.3. Generazione dei rifiuti da DPI

L'utilizzo di dispositivi di protezione individuale, soprattutto mascherine e guanti, rappresenta una delle misure più efficaci per prevenire la diffusione del COVID-19: a tutti i cittadini è raccomandato di indossare le mascherine facciali nei luoghi pubblici, soprattutto se affollati, sui mezzi di trasporto pubblici e in ogni situazione di incontro tra persone (MISAU, 2020). Nel quartiere di Chamanculo C, dunque, i rifiuti da DPI costituiscono un rilevante flusso di rifiuti sanitari a cui prestare attenzione, generato a livello comunitario e caratterizzato da una composizione altamente specifica e omogenea. Secondo la formula sviluppata da Nzediegwu e Chang (2020), utilizzata inizialmente solo per i Paesi Africani ma applicata poi a tutti i continenti (Tripathi et al., 2020), si stima il numero di mascherine e guanti utilizzati giornalmente dalla popolazione ( $N_{\text{tot,giorno}}$ ). Nello specifico, la formula di Nzediegwu e Chang (2020) è stata sviluppata per la stima delle sole mascherine; lo studio di Chowdhury et al. (2022) ha esteso l'applicazione anche ai guanti monouso.

$$N_{\text{tot,giorno}} = \text{Pop}[ab] * \text{Popurb} [\%] * \text{Tassoaccettazione} [\%] * N_{\text{procapite, giorno}} (1)$$

Tale stima si basa su dati sito-specifici, come la popolazione (Pop) e la percentuale di popolazione urbana (Pop urb), nonché su parametri ipotizzati ragionevolmente al contesto di applicazione, quali il tasso di accettazione dei DPI e il numero pro capite giornaliero di DPI ( $N_{\text{procapite,giorno}}$ ). In particolare, essendo Chamanculo C un quartiere urbano di Maputo, la popolazione urbana risulta pari al 100%. Si ipotizza un tasso di accettazione pari al 70% per le mascherine (Benson et al., 2021) e al 30% per i guanti (Chowdhury et al., 2022); tali assunzioni si basano su casi studiati in contesti simili a quello in esame. Si suppone l'utilizzo di una mascherina giornaliera pro capite (Benson et al., 2021) e di un paio di guanti a settimana pro capite.

Infine, si valuta che il peso medio di una mascherina risulta pari a 5 g (WHO, 2022), poiché si utilizzano prevalentemente mascherine chirurgiche rispetto a quelle FFP più pesanti, e quello di un guanto pari a 9 g.

### 3.4. Raccolta

La strategia di raccolta dei rifiuti non è la medesima per i tre flussi, poiché le modalità con cui sono generati, il grado di infettività, le caratteristiche fisiche e le destinazioni finali sono differenti. Pertanto, i rifiuti infettivi e potenzialmente infettivi, che presentano delle peculiarità intrinseche molto simili, sono raccolti insieme, mentre per i rifiuti da DPI è previsto un sistema di raccolta dedicato, per una valorizzazione finale del rifiuto.

#### 3.4.1. Raccolta dei rifiuti infettivi e potenzialmente infettivi

Affinché si eviti l'aumento del rischio di diffusione del virus, è conveniente che la raccolta dei rifiuti infettivi e potenzialmente infettivi – da qui in poi sarà considerato un flusso unico di rifiuti infettivi – avvenga con un sistema porta a porta, effettuata simultaneamente a quella dei RSU. Pertanto, la frequenza di raccolta si conferma essere di due volte a settimana, per ciascuno dei tre blocchi in cui è suddiviso il quartiere, come visto prima.

Sebbene la modalità di conferimento sia la stessa dei rifiuti urbani, questi flussi devono essere mantenuti separati: come misura preventiva dalla contaminazione, si utilizzano sacchi di raccolta di colore differente e specifico per la tipologia di rifiuto, forniti dalle autorità pubbliche, su cui è preferibile che sia posta un'etichetta con la segnalazione "rifiuti COVID-19". Inoltre, al momento del conferimento, l'operatore addetto deve disinfettare il sacco con una soluzione a base alcolica (80% etanolo o 75% 2-propanolo), come raccomandato dalle linee guida internazionali.

Gli operatori addetti alla raccolta devono essere opportunamente equipaggiati con DPI in buone condizioni ed istruiti sulle modalità della raccolta di rifiuti infettivi, sulle accortezze da seguire e sui rischi di contaminazione.

Si presuppone che i RSU siano raccolti in sacchi a livello familiare, considerando che ogni famiglia di Chamanculo sia composta da un valore medio di 4,45 persone (dai dati del censimento del 2017). Al contrario, i rifiuti infettivi sono separati dagli elementi non contaminati, perciò la raccolta è effettuata dal singolo individuo positivo. Ipotizzando che la densità apparente dei rifiuti infettivi e potenzialmente infettivi sia uguale a quella dei RSU (pari a  $490 \text{ kg m}^{-3}$  secondo lo studio di Dos Muchangos et al., 2017), si considerano i sacchi di raccolta con una capacità di 30 L e un grado di riempimento dell'80% per effettuare un confronto sul numero di sacchi necessari per la raccolta dei rifiuti tra il periodo pandemico e precedente e per quantificare la disponibilità di sacchi da fornire ogni giorno di raccolta. Inoltre, si valuta il tempo necessario per il riempimento del sacco da parte degli individui positivi.

Infine, i rifiuti raccolti sono trasportati al sito di stoccaggio, situato in corrispondenza dei container per la raccolta secondaria dei RSU.

#### 3.4.2. Raccolta dei rifiuti da DPI

Per i rifiuti da DPI si prevede un sistema di raccolta dedicato: i cittadini conferiscono direttamente i loro DPI usati in appositi contenitori, posti in luoghi pubblici e frequentati del quartiere. Tale modalità di conferimento presenta numerosi vantaggi: si garantisce un minor rischio di abbandono dei DPI lungo le strade e la conseguente riduzione dell'inquinamento da plastica nei mari; si offre una maggiore possibilità di recupero di materiale e valorizzazione del rifiuto a valle del trattamento, limitando la quantità di rifiuti smaltiti in discarica, grazie alla formazione di un flusso costante, altamente specifico e omogeneo; infine, tutti i cittadini sono coinvolti nella gestione dei rifiuti che producono, sono informati e sensibilizzati sulle tematiche relative ai rifiuti alla contaminazione da COVID-19. La progettazione di questa fase consiste nella determinazione della quantità e delle caratteristiche qualitative dei sacchi di raccolta, nonché nella quantificazione, selezione della tipologia e localizzazione dei contenitori e, infine, nella pianificazione delle modalità di raccolta dei sacchi e trasporto al sito di stoccaggio, in base alla frequenza di raccolta selezionata.

Ipotizzando un valore di densità apparente di  $200 \text{ kg m}^{-3}$  (WHO, 2022) per i rifiuti da DPI, si considerano i seguenti elementi, per i sacchi di raccolta:

- capacità di 120 L;
- grado di riempimento dell'80%;
- colore specifico.

I contenitori di raccolta presentano le seguenti caratteristiche:

- capacità di 120 L (per praticità, uguale a quella del sacco);
- dotazione di coperchio, per favorire l'isolamento del rifiuto dall'ambiente esterno, e apertura con pedale, per evitare quella manuale;
- in plastica rigida (per esempio, HDPE), perché resiste agli agenti atmosferici, non assorbe liquidi, non è attaccabile dai parassiti ed è lavabile e sterilizzabile;
- colore specifico e opportuna segnaletica che indica il materiale da raccogliere.

Il trasporto dei sacchi pieni verso l'ex centro di salute, dove è predisposta l'area di stoccaggio, è operato dagli operatori addetti dotati di carretti a mano, che rendono più agevole il trasporto di sacchi voluminosi. I contenitori per la raccolta e i carretti a mano devono essere lavati e disinfettati dopo ogni utilizzo per garantire la sicurezza e la salute dei lavoratori.

### 3.5. Stoccaggio

La fase di stoccaggio disconnette l'andamento temporale del trattamento da quello relativo alla raccolta. Inoltre, il sito di stoccaggio rappresenta un punto di accumulo sicuro per i rifiuti, durante i picchi delle ondate dei contagi.

#### 3.5.1. Stoccaggio dei rifiuti infettivi

Il dimensionamento del volume di stoccaggio per i rifiuti infettivi è calcolato in modo tale da compensare un flusso in ingresso variabile (rifiuti generati, con relativi picchi) e un flusso in uscita costante (rifiuti avviati al trattamento). Si considerano quindi le quantità giornaliere di rifiuti in ingresso alla fase di stoccaggio, dipendenti dalle ondate dei contagi da coronavirus e pari alla somma della produzione giornaliera di rifiuti infettivi e potenzialmente infettivi, e la quantità giornaliera di rifiuti in uscita allo stoccaggio, pari a quella trattata giornalmente nel processo di disinfezione, ipotizzata costante e corrispondente al valore medio della serie di dati in ingresso (Fig. 4). Con questa metodologia si calcola il volume massimo di rifiuti da accumulare, a cui corrisponde – per ipotesi progettuale – il volume di stoccaggio.

In base al sistema di raccolta progettato, il sito di stoccaggio per i rifiuti infettivi si trova in corrispondenza dei containers per la raccolta secondaria dei RSU (Fig. 1). Si prevede l'utilizzo di contenitori chiusi da 12 m<sup>3</sup>, su cui apporre un'adeguata segnaletica per distinguerli da quelli per i RSU.

Infine, il trasporto giornaliero dei rifiuti dal sito di stoccaggio all'ex centro di salute, dove avviene il trattamento di disinfezione, è supportato dall'utilizzo dei carretti a mano, aventi una capienza circa di 250 kg di rifiuti.

#### 3.5.2. Stoccaggio dei rifiuti da DPI

Il dimensionamento del volume di stoccaggio dei rifiuti da DPI si basa sulla stessa metodologia utilizzata nel caso dei rifiuti infettivi, sebbene si valutino alcune differenze nelle modalità di alimentazione. Infatti, l'andamento nel tempo delle quantità di rifiuti in ingresso alla fase di stoccaggio dipende dalla modalità e dalla frequenza di raccolta.

In particolare, l'area relativa allo scenario 1 è caratterizzata da 4 giorni a settimana di raccolta in due blocchi differenti (Fig. 5a): in questi giorni si raccoglie la stessa quantità di rifiuti, pari alla produzione settimanale distribuita su 4 giorni. Nello scenario 2 (Fig. 5b) il volume in ingresso allo stoccaggio è pari alla quantità di rifiuti da DPI prodotta settimanalmente distribuita su 6 giorni; infatti, la raccolta avviene complessivamente 6 giorni a settimana. Invece, per la valutazione delle quantità di rifiuti in uscita dallo stoccaggio, si considera che il trattamento funzioni tutti i giorni della settimana, disinfectando una quantità costante di rifiuti, pari alla produzione media giornaliera nell'area considerata. Si individua il volume massimo necessario allo stoccaggio, che viene aumentato di un fattore di sicurezza pari a 1,2.

Lo stoccaggio dei rifiuti da DPI è situato nei locali dell'ex centro di salute. L'accesso al sito è permesso solo al personale addetto e consiste in un contenitore in cui accumulare i sacchi di rifiuti oppure un'area che abbia una superficie facilmente lavabile.

### 3.6. Trattamento

#### 3.6.1. Trattamento ottimale: sterilizzazione con vapore

Come evidenziato dai risultati dello studio di Voudrias (2016), la disinfezione a vapore risulta essere l'op-

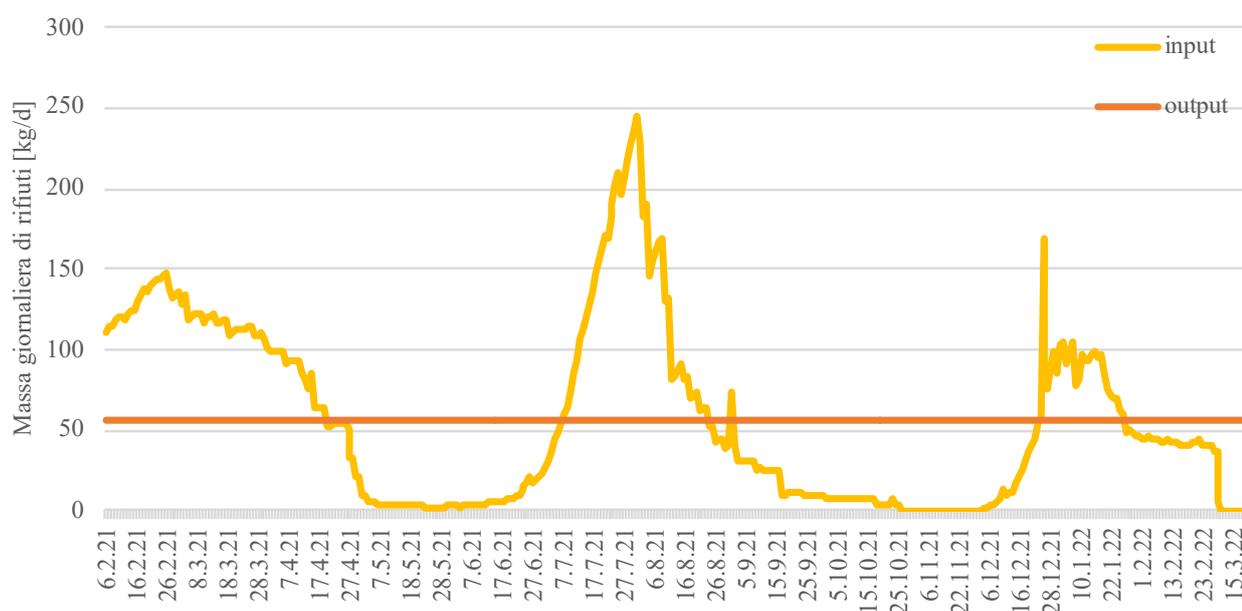


Figura 4. Quantità di rifiuti infettivi in ingresso e in uscita allo stoccaggio per lo scenario 1.

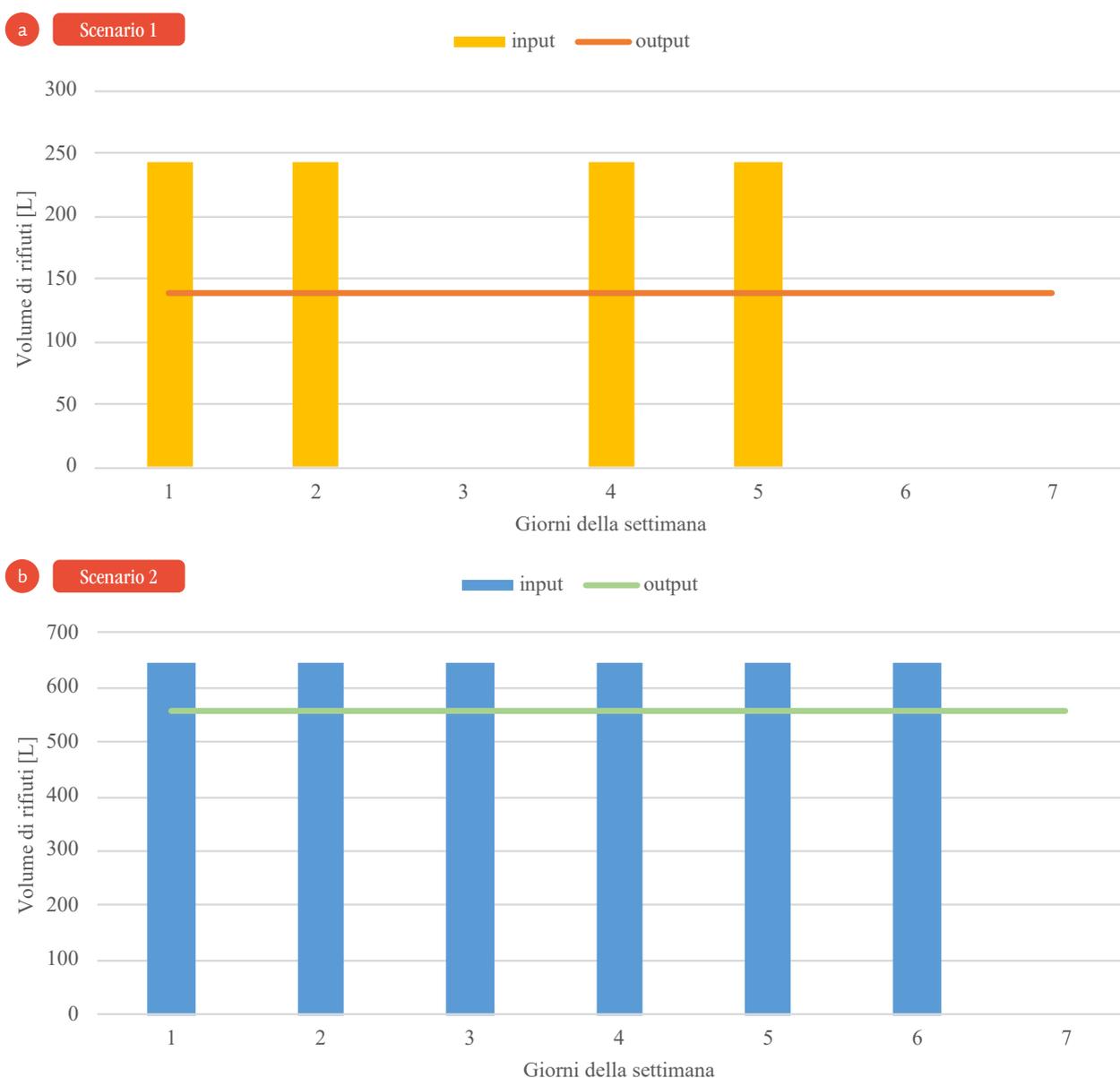
zione migliore per il trattamento dei rifiuti infettivi, da un punto di vista tecnico, ambientale, economico e sociale. Asim et al. (2021) raccomanda l'uso di un macchinario che opera la sterilizzazione con vapore e la simultanea triturazione dei rifiuti. Come esempio applicativo, sono stati considerati i modelli della compagnia Celitron, in modo da comprenderne il funzionamento, le condizioni operative e la capacità di trattamento.

Questo macchinario, *Integrated Sterilizer and Shredder* (ISS), è in grado di trattare rifiuti infettivi, come materiali soffici, mascherine e guanti, rifiuti anatomici e patologici e rifiuti taglienti. Non richiede specifiche competenze tecniche, grazie alla sua semplicità gestionale. Il processo è efficiente e facilmente adattabile in qualsiasi contesto di installazione. Garantisce una riduzione di volume del 20% senza l'emissione di so-

stanze pericolose. Infine, la triturazione dei rifiuti aiuta a prevenire la raccolta illegale e il riuso di DPI.

La triturazione e la sterilizzazione con vapore dei rifiuti infettivi avvengono in un unico vessel e il processo operativo si compone di cinque fasi.

- Carico dei rifiuti: i rifiuti sono caricati nella camera senza la necessità di aprire i sacchi precedentemente, con la garanzia di evitare il contatto con il materiale contaminato o potenzialmente contaminato.
- Creazione del vuoto: l'aria viene rimossa dalla camera attraverso un filtro e con l'ausilio di una pompa a vuoto.
- Riscaldamento per la sterilizzazione: il vapore è introdotto nella camera fino a raggiungere la temperatura e la pressione di sterilizzazione, pari rispettivamente a 134°C e 312 kPa. Il vapore è prodotto internamente da un generatore di vapore,



**Figura 5.** Quantità di rifiuti da DPI in ingresso e in uscita allo stoccaggio: (a) Scenario 1 e (b) Scenario 2.

alimentato da un sistema di purificazione e drenaggio dell'acqua. Contemporaneamente avviene la triturazione dei rifiuti: il vessel è dotato di un albero motorizzato (velocità di rotazione varia tra 400 e 1700 RPM) con lame per la triturazione e la frantumazione, per ridurre la dimensione e il volume totale dei rifiuti fino al 20% del volume originale. Le lame sono in grado di tritare anche oggetti taglienti, siringhe, carta, tessuti e stoffe, plastica e vetro.

- d. Sterilizzazione: quando viene raggiunta la temperatura di 134°C, inizia la sterilizzazione che dura almeno 3 minuti. Successivamente il vapore viene rimosso dalla camera e avviene il processo di essiccazione.
- e. Scarico dei rifiuti: i rifiuti sterilizzati sono rimossi dalla camera. Questi si presentano frammentati, non tossici, solidi e secchi e possono essere smaltiti come RSU.

Nel caso in esame, è applicato lo stesso trattamento di disinfezione sia per i rifiuti da DPI sia per i rifiuti infettivi, ma i due flussi sono trattati separatamente, perché seguiranno destinazioni finali differenti.

Secondo il catalogo della compagnia Celitron sono disponibili tre modelli di macchinario, che si differenziano per la capacità di trattamento. Pertanto, per selezionare il modello più adatto allo schema progettato, si confronta il volume di rifiuti da gestire con quello che il modello del macchinario riesce a trattare, per entrambi gli scenari. La scelta per ciascun scenario e le caratteristiche tecniche dei modelli di Celitron sono mostrate nella Tab. 1.

Selezionato il modello di macchinario, si stabilisce, con precisione, il numero di cicli giornalieri da effettuare, per entrambi i flussi di rifiuti. Tenuto conto della durata del ciclo, riportata nelle caratteristiche tecniche del macchinario, e ipotizzato il tempo necessario per la fase di carico e scarico dei rifiuti dalla camera, si determina anche la durata totale di lavoro giornaliero.

### 3.6.2. Trattamento alternativo: la quarantena

Qualora i vincoli tecnici ed economici non permettessero l'installazione e applicazione della tecnologia di sterilizzazione a vapore nel quartiere di Chamanculo C, si è ipotizzato un sistema di quarantena dei rifiuti COVID-19, come trattamento alternativo, col fine di mettere in sicurezza i rifiuti infettivi e assicurare la protezione minima dalla diffusione del virus SARS-CoV-2 per mezzo dei rifiuti contaminati. Infatti, il virus SARS-CoV-2 ha un limite di sopravvivenza sulle superfici, che può variare da 2 a 9 giorni in base alle condizioni ambientali e alle caratteristiche fisiche del materiale di supporto (Kampf et al., 2020).

La quarantena consiste quindi nello stoccaggio di un volume di rifiuti per un periodo di tempo superiore ai 9 giorni senza l'aggiunta o la rimozione di alcuna quantità. Questo dovrebbe garantire l'eliminazione del virus SARS-CoV-2, mentre ulteriori approfondimenti si rendono necessari per evitare la proliferazione di altri patogeni.

A monte della quarantena sarà poi necessario riadattare il sistema di raccolta e stoccaggio dei rifiuti generati nel quartiere. Per inviare i rifiuti raccolti direttamente nei contenitori per la quarantena, la frequenza di raccolta dei rifiuti infettivi, potenzialmente infettivi e da DPI si riduce da due a una volta a settimana, mantenendo i giorni fissati per la raccolta dei RSU nei tre blocchi. Dopo la fase di raccolta, i sacchi di rifiuti contaminati sono posti all'interno dei containers e lasciati in quarantena per almeno nove giorni. Alla fine di questo periodo, i containers vengono svuotati e i rifiuti proseguono verso la loro destinazione finale. L'intero ciclo di stoccaggio dura 11 giorni (per lo scenario 1) o 12 (per lo scenario 2), aggiungendo il tempo necessario per la pulizia e disinfezione dei contenitori al termine di ogni ciclo.

L'uso alternato di due contenitori per la quarantena permette di effettuare la raccolta una volta a settimana, evitando di ridurre ulteriormente la frequenza di raccolta una volta ogni 12 giorni, che comporterebbe un

**Tabella 1.** Caratteristiche tecniche del macchinario ISS (Celitron, 2022).

	<b>Scenario 1 ISS 25 L</b>	<b>Scenario 2 ISS AC-575</b>
<b>Volume della camera (L)</b>	25	150
<b>Dimensioni esterne (W x H x D) in mm</b>	1070 x 1025 x 725	1290 x 2150 x 2039
<b>Peso (kg)</b>	280	880
<b>Alimentazione elettrica</b>	3-Ph, 380-400 V, 50/60 Hz	3-Ph, 380-400 V, 50/60 Hz
<b>Potenza con il generatore di vapore (kW)</b>	12	36
<b>Consumo energetico medio per ciclo (kWh)</b>	1,7 kWh (1)	7-9 kWh (2)
<b>Durata del ciclo (min)</b>	15	25

Note: (1) Celitron (2023a). (2) Celitron (2023b).

aumento del numero di contenitori per la raccolta dei rifiuti da DPI nel quartiere e il rischio di abbandono illegale lungo le strade. I contenitori, preferibilmente chiusi e ben segnalati, sono posti in corrispondenza dei containers per la raccolta secondaria dei RSU.

### 3.7. Destinazione finale

La separazione dei flussi di rifiuti in tutte le fasi del sistema di gestione garantisce la differenziazione dei destini che i due flussi seguiranno. I rifiuti infettivi, con una composizione eterogenea, saranno smaltiti nella discarica di Hulene dopo la sterilizzazione. Al contrario, i rifiuti da DPI, la cui composizione è altamente specifica e le cui caratteristiche fisiche e chimiche sono omogenee, potrebbero essere integrati nella produzione di mattoni o altro materiale da costruzione (Asim et al., 2021). Per l'implementazione del processo di recupero occorrerebbe coinvolgere le imprese edili e civili del territorio, con cui bisognerebbe interfacciarsi per valutarne le capacità tecniche e la disponibilità ad avviare questo processo tecnologico innovativo. Questo sviluppo appare possibile in quanto in prossimità dell'ex centro di salute è situata un'impresa produttrice di mattoni, che potrebbe essere facilmente coinvolta.

### 3.8. Riduzione della generazione: mascherine di comunità in capulana

Come già anticipato, il Dipartimento di Salute e Ambiente di Maputo ha avviato delle sartorie sociali per la fabbricazione di mascherine di comunità in capulana, per favorirne l'integrazione e l'uso nel quartiere. Questa scelta rappresenta una soluzione sostenibile da un punto di vista sanitario, ambientale, economico e sociale. Infatti, si previene la diffusione del virus, si riduce l'utilizzo di mascherine monouso e la conseguente produzione di rifiuti nel medio e lungo termine e, infine, tali mascherine sono economicamente accessibili anche per le categorie sociali più povere.

Pertanto, è stato ipotizzato un sistema centralizzato di gestione delle mascherine di comunità per l'intero quartiere e localizzato nell'ex centro di salute. In primo luogo, le mascherine usate sono raccolte e stoccate all'interno di contenitori posti in corrispondenza di quelli per la raccolta dei rifiuti da DPI (entrambi ben segnalati). Dato che il numero delle mascherine in stoffa distribuite nel quartiere è inferiore a quello delle mascherine monouso, i contenitori saranno poco numerosi e saranno posizionati in un solo sito di raccolta. Per il trattamento delle mascherine in stoffa, è sufficiente il lavaggio in lavatrice ad una temperatura superiore a 60°C con i comuni detersivi, per inattivare il virus (Rowan e Laffey, 2020). Considerando il carico medio di 8 kg di

una lavatrice comune e il peso medio di una mascherina in stoffa pari a 10,29 g (Benson et al., 2021), risultano 777 pezzi trattati ad ogni lavaggio. Di conseguenza, la frequenza di lavaggio si determina in base al riempimento dei contenitori di raccolta, assumendo un valore ragionevole una volta a settimana. La fase di asciugatura dura dalle due alle cinque ore, durante le quali il dispositivo è esposto alla luce solare. In alternativa, si prevede l'installazione di un'asciugatrice, per favorire una riduzione degli spazi occupati.

## 4. Risultati e discussione

I flussi di rifiuti sanitari generati a Chamanculo C presentano peculiarità differenti che dipendono dalle modalità con cui questi sono generati e gestiti nel quartiere. Sia per i rifiuti infettivi sia per quelli potenzialmente infettivi, l'andamento nel tempo della produzione giornaliera è strettamente correlato con quello associato ai dati dei contagi da COVID-19, ottenendo due flussi non costanti nel tempo e altamente variabili (Fig. 6). Pertanto, per il dimensionamento delle fasi del sistema, sono stati utilizzati il valore medio e il valore di picco delle serie di dati; quest'ultimo è relativo all'ondata peggiore dei contagi e ritenuto il caso più critico, in modo tale da saper fronteggiare eventi particolarmente critici ed estremi, seppur poco ricorrenti. Infatti, nonostante tali valori siano relativi alla situazione epidemiologica già avvenuta, si assume che siano rappresentativi di una futura ed eventuale ondata di contagi del coronavirus. Invece, si assume che la produzione dei rifiuti da DPI, di cui è responsabile l'intera popolazione civile, sia uniforme e specifica nella composizione e costante nel tempo.

Nella Tabella 2 sono riportati i valori risultanti della generazione di rifiuti sanitari a livello comunitario nel quartiere di Chamanculo C. L'accuratezza dei risultati delle stime dipende fortemente dalla trasparenza dei dati epidemiologici relativi alla pandemia COVID-19, come il numero di casi positivi e il numero di pazienti ricoverati o in isolamento, nonché dalle ipotesi progettuali assunte e dalla flessibilità dell'applicazione di dati generali nel contesto specifico.

La Tabella 3 mostra i risultati del dimensionamento del sistema di gestione dei rifiuti sanitari progettato per il quartiere di Chamanculo C, differenziati in base allo scenario di intervento e al flusso di rifiuti considerato.

In base ai risultati ottenuti è bene fare delle opportune considerazioni.

- Per la valutazione della modalità di raccolta dei rifiuti infettivi e potenzialmente infettivi, è necessario confrontare la quantità totale di rifiuti generata nel quartiere nel periodo pre-pandemico e in quello pandemico. Di conseguenza, si valuta se l'incremento percentuale risulti così elevato da mettere in

**Tabella 2.** Generazione stimata dei flussi di rifiuti sanitari.

	Rifiuti infettivi		Rifiuti potenzialmente infettivi		Rifiuti da DPI
	Valore medio (kg d <sup>-1</sup> )	Valore di picco (kg d <sup>-1</sup> )	Valore medio (kg d <sup>-1</sup> )	Valore di picco (kg d <sup>-1</sup> )	(kg d <sup>-1</sup> )
<b>Scenario 1</b>	13,23	57,22	43,19	186,82	27,688
<b>Scenario 2</b>	53,06	229,53	173,25	749,36	111,06

crisi il sistema di raccolta in atto. Tale valore risulta essere intorno al 0,02% per la situazione media e circa 0,06% nel caso più critico, per entrambi gli scenari. Pertanto, si può affermare che l'incremento percentuale è trascurabile, cosicché la fase di raccolta non subirebbe conseguenze in termini di quantità di rifiuti da gestire.

- Per assicurare sempre il numero necessario di sacchi da fornire per la raccolta dei rifiuti infettivi e potenzialmente infettivi (anche nelle situazioni più critiche), 494 sacchi per lo scenario 1 e 1983 per lo scenario 2 devono essere disponibili. Tali valutazioni si basano sulla condizione che venga utilizzato un sacco nuovo ogniqualvolta ha luogo la raccolta, anche se riempito solo del 12%. Ciò risulta alquanto improbabile, poiché tendenzialmente il sacco viene conferito quando è riempito quasi del tutto, ogni tre settimane, favorendo la riduzione del numero di sacchi da tenere a disposizione al momento della distribuzione. Nella situazione pre-emergenziale i sacchi conferiti ogni giorno di raccolta contano 1455 pezzi nello scenario 1 e 5837 nello scenario 2.
- Il numero di containers per lo stoccaggio dei rifiuti infettivi raddoppia rispetto a quello necessario per la raccolta secondaria dei RSU. Questi containers rappresentano un punto di accumulo sicuro per i rifiuti infettivi, nell'eventualità di un picco di generazio-

ne, in seguito a un'ondata di contagi da COVID-19, che non può essere gestita in tempi rapidi. Questi contenitori, quindi, si riempiranno totalmente solamente nelle condizioni più critiche. Al contrario, ogni giorno i containers per la raccolta secondaria dei RSU sono riempiti e svuotati totalmente. Sebbene nella fase di raccolta l'incremento percentuale della quantità di rifiuti relativi al periodo pandemico porti a dei risultati trascurabili nelle modalità di gestione, in questo caso il numero di containers raddoppia, rappresentando un intervento spazialmente notevole, ma in ragione del fatto che i contenitori per le due diverse tipologie di rifiuti svolgono delle funzioni differenti nel sistema di gestione complessivo.

- La soluzione di trattamento proposta (sterilizzazione con vapore e triturazione) rappresenta l'opzione ottima per i rifiuti infettivi, poiché garantisce il raggiungimento dell'obiettivo di disinfezione, risulta compatta e i suoi parametri operativi sono controllabili. Affinché si eviti di danneggiare il macchinario di trattamento con oggetti metallici o materiali abrasivi, viene fornita ai cittadini una serie di raccomandazioni riguardo alla corretta composizione dei rifiuti.
- Il sistema di trattamento alternativo, consistente nel porre i rifiuti in quarantena, è stato progettato in modo tale da eliminare la carica virale del virus

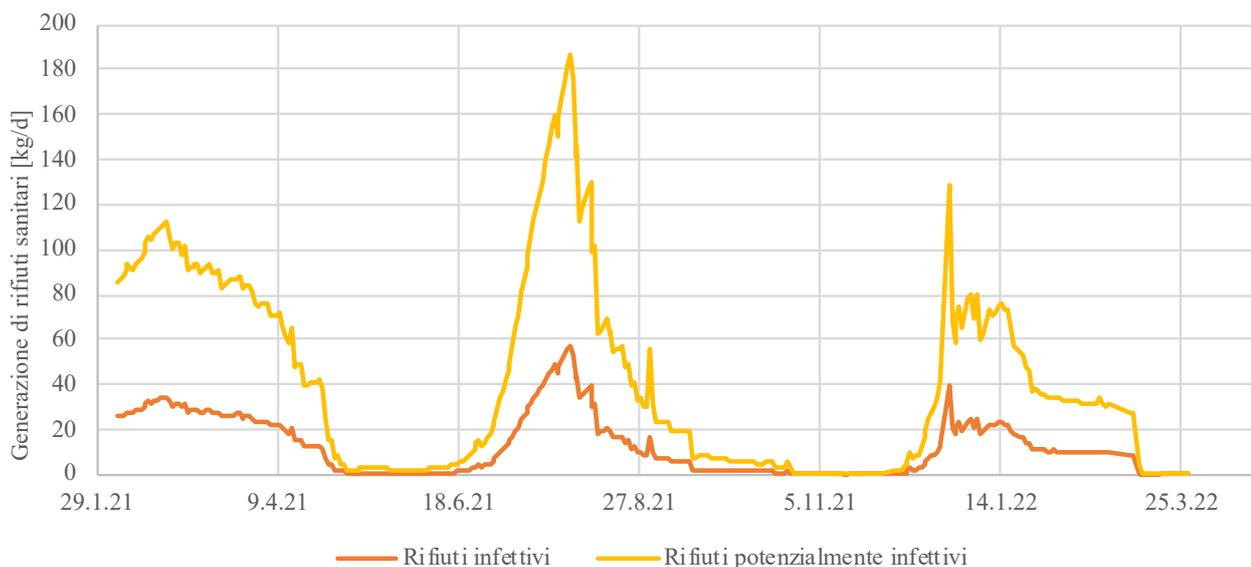
**Figura 6.** Andamento nel tempo della generazione di rifiuti infettivi e potenzialmente infettivi per lo scenario 1.

Tabella 3. Risultati del dimensionamento.

		Rifiuti infettivi e pot. infettivi	Rifiuti da DPI
<b>Raccolta</b>		Sistema di raccolta porta a porta Frequenza: 2 volte a settimana per ogni blocco Tempo di riempimento del sacco: 23 giorni Raccolta del sacco ogni 3 settimane circa	Raccolta dedicata Frequenza: 2 volte a settimana per ogni blocco
	S1	114 sacchi per giorno di raccolta (494 di picco)	11 sacchi a settimana 6 contenitori: 2 per ogni sito (ex centro di salute, mercato e scuola)
	S2	459 sacchi per giorno di raccolta (1983 di picco)	41 sacchi a settimana 21 contenitori: distribuiti omogeneamente nel quartiere
<b>Stoccaggio</b>		Vicino ai containers per la raccolta secondaria RSU	Nell'ex centro di salute
	S1	1 container (da 12 m <sup>3</sup> )	0,332 m <sup>3</sup>
	S2	4 containers (da 12 m <sup>3</sup> )	0,666 m <sup>3</sup>
<b>Trattamento ottimale</b>	S1	ISS 25 L (134°C, 312 kPa) 5 cicli giornalieri (8,5 kWh/giorno) 5,5 ore lavorative giornaliere	ISS 25 L (134°C, 312 kPa) 6 cicli giornalieri (10,2 kWh/giorno) 5,5 ore lavorative giornaliere
	S2	ISS 150 L (134 °C, 312 kPa) 3 cicli giornalieri (21-27 kWh/giorno) 5,83 ore lavorative giornaliere	ISS 150 L (134 °C, 312 kPa) 4 cicli giornalieri (28-36 kWh/giorno) 5,83 ore lavorative giornaliere
<b>Trattamento alternativo</b>	S1	2 m <sup>3</sup> di volume di quarantena 11 giorni di durata dell'intero ciclo (2 di riempimento + 9 di quarantena) Uso alternato di due contenitori	
	S2	8 m <sup>3</sup> di volume di quarantena 12 giorni di durata dell'intero ciclo (3 di riempimento + 9 di quarantena) Uso alternato di due contenitori	
<b>Destinazione finale</b>		Smaltimento alla discarica di Hulene	Integrazione nel materiale da costruzione

SARS-CoV-2 presente. Tuttavia, potrebbe favorire la proliferazione di altri ceppi batterici nel rifiuto, aspetto da sottoporre ad ulteriore analisi.

- I rifiuti da DPI sterilizzati potrebbero essere integrati nella miscela del materiale da costruzione, le cui caratteristiche fisiche e meccaniche presenterebbero dei miglioramenti. In aggiunta, il recupero di materiale e il conseguente risparmio di nuove risorse per il materiale da costruzione contribuirebbero ad un risparmio economico e ad una riduzione degli impatti ambientali e sanitari. La strategia di valorizzazione del rifiuto da DPI rappresenta una soluzione alternativa allo smaltimento in discarica ed innovativa, da valutare ed analizzare ulteriormente, poiché garantirebbe lo sviluppo anche in altri settori, quali la produzione di materiale da costruzione tanto quanto la gestione dei rifiuti sanitari, influenzando sullo sviluppo sociale dell'intero quartiere.
- Nonostante il sistema di lavaggio e asciugatura delle mascherine in capulana sia ampiamente applicabile al contesto, le modalità di ritiro e redistribuzione ne rendono complessa la gestione, in particolare riguardo alla necessità di un sistema di etichettatura per la restituzione di ogni mascherina al legittimo proprietario. Pertanto, è consigliabile avviare una campagna di sensibilizzazione riguardo ai metodi corretti di lavaggio e disinfezione della mascherina in stoffa a livello domestico.

## 5. Conclusioni

Gli impatti della pandemia COVID-19 sulla gestione dei rifiuti sanitari hanno portato alla luce le fragilità dei sistemi esistenti, soprattutto nei contesti a basso reddito, dove la gestione, il trattamento e lo smaltimento dei rifiuti sono ridotti all'essenziale o soggetti a malfunzionamenti, a causa delle limitate risorse economiche e tecnologiche. Inoltre, è sorta l'urgenza di pianificare delle strategie di gestione dei rifiuti per fronteggiare le criticità in periodo emergenziale e post emergenziale, e per limitare il possibile contatto tra la popolazione e gli operatori formali e informali del sistema di raccolta e i rifiuti infetti.

Per progettare il sistema di gestione dei rifiuti sanitari a Chamanculo C, sono stati individuati i tre flussi generati nel quartiere a livello comunitario, quali i rifiuti derivanti dai dispositivi di protezione individuale utilizzati, i rifiuti infettivi dai pazienti positivi al virus in isolamento e i rifiuti potenzialmente infettivi degli individui in contatto con soggetti positivi. Si segnala la difficoltà di ottenere dati realistici in base ai quali stimare i tre flussi, trattandosi di un evento recente e non ancora sufficientemente analizzato in letteratura. Questo genera un'incertezza che si ripercuote sul dimensionamento delle fasi del sistema di gestione, progettate per ciascun flusso in base alle modalità di generazione, alle caratteristiche intrinseche dei flussi stessi e all'utenza da servire. L'intero sistema di gestione è stato progettato per due scena-

ri differenti, in base all'ampiezza dell'area di intervento e alla numerosità dell'utenza servita. La selezione dello scenario di intervento dipende anche dalle ipotesi progettuali elaborate dagli altri gruppi tematici coinvolti nel progetto HANDS, per arrivare ad offrire una proposta applicativa che sia quanto più possibile omogenea e onnicomprensiva.

Questo studio, basato sull'analisi del contesto e sui dati disponibili in letteratura, rappresenta un esempio per la pianificazione di un sistema per la gestione dei rifiuti contaminati generati a livello comunitario in seguito a epidemie che si sviluppano in contesti con condizioni igienico-sanitarie critiche. In particolare, potrebbe prestarsi come riferimento in caso di situazioni che richiedessero un adattamento urgente del sistema di raccolta.

Lo studio ha tenuto in considerazione i vincoli derivanti dal sistema di gestione dei rifiuti realmente esistente a Chamanculo C, e la sua applicabilità e replicabilità varia in funzione di questi e a seconda delle fasi considerate. Le fasi di generazione, raccolta e stoccaggio sono influenzate in termini quantitativi dalle caratteristiche del contagio, che nel caso del COVID-19 presentava un'elevata morbilità e la permanenza del virus per un tempo considerevole sulle superfici; tuttavia, la procedura di dimensionamento di queste fasi risulta facilmente adattabile ad altre situazioni. L'applicazione del trattamento di sterilizzazione con vapore e triturazione potrebbe risultare utile qualora in futuro ci fosse la necessità di disinfettare i rifiuti infettivi derivanti da nuovi ambulatori medici nell'ex centro di salute o nel quartiere. Infatti, la proposta di un sistema di gestione a piccola scala e decentralizzato rappresenta un'alternativa ai metodi tradizionali, portando a delle soluzioni più flessibili e integrabili nel contesto. Le indicazioni fornite agli stakeholders locali riguardo alle corrette strategie di gestione e smaltimento dei rifiuti sanitari offrono l'opportunità di uno sviluppo tecnico e tecnologico del settore, senza sottovalutare gli aspetti ambientali.



**Figura 7.** Contenitore da 12 m<sup>3</sup> (uno di tre collocati a Chamanculo C) per il conferimento dei rifiuti da parte delle microimprese che si occupano della raccolta primaria (ott. 2021)

Gli interventi previsti si applicano a livello comunitario contribuendo allo sviluppo socioculturale del quartiere: infatti, tutti i cittadini sono coinvolti, informati e sensibilizzati sulle tematiche riguardanti la gestione dei rifiuti che producono e i metodi di prevenzione delle malattie infettive. Infine, per quanto riguarda la disposizione finale, la sterilizzazione dei rifiuti infettivi rappresenta una tutela per gli operatori dell'intera filiera, ivi compresi i raccoglitori informali, soprattutto dove la disposizione finale è una discarica facilmente accessibile, come in questo caso.

Nel suo complesso, il sistema di gestione dei rifiuti sanitari progettato comporterebbe un miglioramento delle condizioni igienico-sanitarie nel quartiere in una prospettiva a lungo termine e non strettamente legata alla pandemia COVID-19. ■

### Riferimenti bibliografici

- Adelodun B. et al. (2021) Insights into hazardous solid waste generation during COVID-19 pandemic and Sustainable Management Approaches for Developing Countries, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(6), pp. 2077–2086.
- Adusei-Gyamfi J. et al. (2022) Post covid-19 recovery: Challenges and opportunities for solid waste management in Africa. *Environmental Challenges*, 6, p. 100442.
- Asim N., Badiei M. e Sopian K. (2021) Review of the valorization options for the proper disposal of face masks during the COVID-19 pandemic. *Environmental Technology & Innovation*, 23, p. 101797.
- Allen e Joassias (2011) WIEGO. Mapping of the Policy Context and Catadores Organizations in Maputo, Mozambique.
- Ali M. et al. (2017) Hospital Waste Management in developing countries: A mini review. *Waste Management*



**Figura 8.** Raccolta con carretti (“tchovas”) a Polana, un altro sobborgo di Maputo (ottobre 2021).

- & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 35(6), pp. 581–592.
- AVSI (2021). Formação sobre resíduos sólidos com m. Milão. Fondazione AVSI, documentazione interna.
  - Benson N.U. et al. (2021) Covid-19 pandemic and emerging plastic-based personal protective equipment waste pollution and management in Africa. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(3), p. 105222.
  - Betho, R. et al. (2021) The macroeconomic impact of Covid-19 in Mozambique: A Social Accounting Matrix Approach. *Journal of International Development*, 34(4), pp. 823–860.
  - Chowdhury T. et al. (2022) Estimation of the healthcare waste generation during COVID-19 pandemic in Bangladesh. *Science of The Total Environment*, 811, p. 152295.
  - Celitron (2022) Disponibile su: <https://celitron.com/en/medical-sharps-waste-disposal-iss> (Ultimo accesso 5/12/22).
  - Celitron (2023a) ISS 25 L Product Specification Sheet – MS12-0003 v 2.2 EN. Disponibile su: <https://docplayer.net/211803203-Integrated-sterilizer-shredder-iss-25l.html> (Ultimo accesso 15/4/2023).
  - Celitron (2023b) ISS AC 575 Product Specification Sheet – MS11-0010 v 2.2 EN. Disponibile su: <https://www.steribel.be/wp-content/uploads/ISS-AC-575-Product-Specification-Sheet-v-2.2-EN.pdf>
  - CoM. (2020, March 14) Mozambique reinforces COVID-19 prevention measures. Club of Mozambique. Disponibile su: (Ultimo accesso 29/03/2023) (Ultimo accesso 29/03/2023) Corburn, J., Vlahov, D., Mberu, B. et al. (2020) Slum Health: Arresting COVID-19 and Improving Well-Being in Urban Informal Settlements. *J Urban Health* 97, pp. 348–357. Das A.K. et al. (2021) Covid-19 pandemic and Healthcare Solid Waste Management strategy – a mini-review. *Science of The Total Environment*, 778, p. 146220.
  - De Giorgi S. (2022) Il COVID-19 e la gestione dei rifiuti sanitari in contesti a basso reddito: proposte per un quartiere informale di Maputo. Tesi di laurea magistrale non pubblicata, Politecnico di Milano.
  - Domini M. (2018) The challenge of sharing data in cooperation projects: cause for reflection. *Journal of UNiversities and international development COoperation*, 1, pp. 234-243.
  - Dos Muchangos L.S., Tokai A. e Hanashima A. (2016) Application of material flow analysis to municipal solid waste in Maputo City, Mozambique. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 35(3), pp. 253–266.
  - Duque Franco, I., et al. (2020) Mapping repertoires of collective action facing the COVID-19 pandemic in informal settlements in Latin American cities, *Environment and Urbanization*, 32(2), pp. 523–546.
  - El-Ramady H. et al. (2021) Planning for disposal of covid-19 pandemic wastes in developing countries: A review of current challenges. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(9).
  - Emilia, A.U., Julius, N.F. and Gabriel, G. (2015) Solid medical waste management in Africa. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 9(3), pp. 244–254.
  - Haque M.S. et al. (2021) Coronavirus disease 2019 (covid-19) induced waste scenario: A short overview. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), p. 104660.
  - HANDS (2023). Health AND urban Space in Chamanculo, Mozambique. Report finale di progetto.
  - IFC (2020) COVID-19's Impact on the Waste Sector. International Finance Corporation (IFC). World Bank Group.
  - Ilyas S., Srivastava R.R. e Kim H. (2020) Disinfection technology and strategies for COVID-19 hospital and bio-medical waste management. *Science of The Total Environment*, 749, p. 141652.
  - Instituto Nacional de Estatística Gabinete do Presidente. (2017) Divulgação os resultados preliminares IV RGPH 2018. Censo 2017, IV Recenseamento Geral da População e Habitação. Disponibile su: <http://www.ine.gov.mz/operacoes-estatisticas/censos/censo-2007/censo-2017/divulgacao-os-resultados-preliminares-iv-rgph-2017/view> (Ultimo accesso 5/12/2022).
  - Iyer, M. et al. (2021) Environmental survival of SARS-COV-2 – a solid waste perspective, *Environmental Research*, 197, p. 111015.
  - Kampf G. et al. (2020) Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents. *Journal of Hospital Infection*, 104(3), pp. 246–251.
  - Krauss, J.E. et al. (2022) To prevent this disease, we have to stay at home, but if we stay at home, we die of hunger – livelihoods, vulnerability and coping with covid-19 in rural Mozambique. *World Development*, 151, p. 105757.
  - Masera G. e Tadi M. (2020) Environmental performance and social inclusion in informal settlements: A favela project based on the IMM

Integrated Modification Methodology. Research for Development [Preprint].

- MISAU (2020) Manual de prevenção COVID-19” Ministério da Saude do Moçambique. Disponibile su: <https://www.misau.gov.mz/index.php/manuais-e-material-educativo?download=322:manual-de-prevencao-a-covid-19> (Ultimo accesso 30/03/2023).
- MISAU “Informação sobre coronavirus COVID-19”. Ministério da Saude do Moçambique Disponibile su: <https://www.misau.gov.mz/index.php/informacao-sobre-coronavirus-covid-19> (Ultimo accesso 5/12/22).
- MISAU (2021) Informação caso confirmado COVID-19. Folheto informativo. Ministério da Saude do Moçambique Disponibile su: <https://www.misau.gov.mz/index.php/manuais-e-material-educativo?download=1143:folheto-isolamento-em-casa-e-criterio-de-alta> (Ultimo accesso 29/03/2023).
- Nzediegwu C. e Chang S.X. (2020) Improper solid waste management increases potential for COVID-19 spread in developing countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, p. 104947.
- Prata J.C. et al. (2020) Covid-19 pandemic repercussions on the use and management of plastics. *Environmental Science & Technology*, 54(13), pp. 7760–7765.
- Rowan N.J. e Laffey J.G. (2021) Unlocking the surge in demand for personal and protective equipment (PPE) and improvised face coverings arising from coronavirus disease (covid-19) pandemic – implications for efficacy, re-use and sustainable waste management. *Science of The Total Environment*, 752, p. 142259.
- Saxena P., Pradhan I.P. e Kumar D. (2022) Redefining bio medical waste management during COVID- 19 in India: A way forward. *Materials Today: Proceedings*, 60, pp. 849–858.
- Sharma H.B. et al. (2020) Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post covid-19 pandemic. *Resources, Conservation and Recycling*, 162, p. 105052.
- Stretz J. (2012) Operator Models. Respecting Diversity. Annex 7 - Maputo Case Study. Eschborn: GIZ. Disponibile su: <http://www.giz.de/en/mediacenter/publications.html>, cercare ‘operator models’.
- Tripathi, A. et al. (2020) Challenges, opportunities and progress in solid waste management during COVID-19 pandemic. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2, p. 100060.
- UNDP (2020) The Next Frontier: Human Development and the Anthropocene. Human Development Report 2020. Disponibile su: <https://hdr.undp.org/content/human-development-report-2020> (Ultimo accesso 5/12/2022). United Nations Development Programme.
- UNEP (2018) Africa Waste Management Outlook. United Nations Environment Programme.
- UNEP (2020) Waste Management during the COVID-19 pandemic. United Nations Environment Programme.
- Voudrias E.A. (2016) Technology selection for Infectious Medical Waste Treatment using the analytic hierarchy process. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(7), pp. 663–672.
- WHO (2010) Guide to local production: WHO-recommended Hand rub Formulations. World Health Organization.
- WHO (2014) Safe Management of Wastes From Health-Care Activities. World Health Organization.
- WHO (2020) Water, sanitation, hygiene, and waste management for SARS-CoV-2, the virus that causes COVID-19. Interim guidance. COVID-19: Infection prevention and control. WASH. World Health Organization.
- WHO (2022) Global analysis of healthcare waste in the context of COVID-19. Status, impacts and recommendations. World Health Organization.
- WHO (2023) Coronavirus disease (COVID-19). Overview. World Health Organization. Disponibile su: [https://www.who.int/health-topics/coronavirus#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/coronavirus#tab=tab_1) (Ultimo accesso 21/03/2023).
- Wilkinson A., et al. (2020) Local response in health emergencies: key considerations for addressing the COVID-19 pandemic in informal urban settlements. *Environment and Urbanization*, 32(2), pp. 503–522.
- Zand A.D. e Heir A.V. (2020) Environmental impacts of new coronavirus outbreak in Iran with an emphasis on waste management sector. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(1), pp. 240–247.

## Ringraziamenti

Questa ricerca è stata possibile grazie all’esistenza del progetto HANDS, finanziato da Polisocial, il programma di impegno e responsabilità sociale del Politecnico di Milano. Si ringraziano tutti i componenti del team HANDS: Camillo Magni, Laura Montedoro e Giuliana Miglierina (DASU), Mattia Sponchioni e Gianmarco Polotti (CMIC), Gabriele Masera, Massimo Tadi, Carlo Andrea Biraghi e Solomon Tamiru Tesfaye (DABC), Riccardo Mereu (DENG). Si ringraziano inoltre per il supporto sul campo Gabriele Tardivo e Samuel Matsinhe della ONG AVSI, l’Agenzia Italiana per la Cooperazione allo Sviluppo AICS - Mozambico, Architetti Senza Frontiere ASF Spagna e Italia, l’Università Eduardo Mondlane, Maputo.

# COMBINAZIONE TRA COMPOSTAGGIO E VERMICOMPOSTAGGIO DELLA FORSU: UN CASO STUDIO SICILIANO

**Gaetano Di Bella<sup>1\*</sup>, Enrico Licitra<sup>1</sup>, Antonino Laudani<sup>1</sup>, Sabrina Milano<sup>1</sup>, Laura Cozzo<sup>1</sup>, Graziella Rabbeni<sup>1</sup>, Maria Gabriella Giustra<sup>1</sup>, Marco Gentile<sup>2</sup>, Roberto Palumbo<sup>2</sup>, Santo Castagna<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Università degli Studi di Enna "Kore", Facoltà di Ingegneria e Architettura, Enna

<sup>2</sup> EcoEnna Servizi srl, Enna

## Sommario

In natura i lombrichi elaborano enormi quantità di detriti vegetali ingerendoli e convertendoli in vermicast, ovvero il prodotto finale del processo di digestione dei lombrichi. Il vermicast è ampiamente riconosciuto come fertilizzante organico adatto alle piante. Ad oggi, il vermicompostaggio controllato di matrici organiche diverse rispetto alle deiezioni bovine, come ad esempio la frazione organica derivata dai rifiuti solidi biodegradabili (FORSU), ha fatto registrare risultati contraddittori limitando, di fatto, l'estensione dei risultati di laboratorio ad iniziative su più ampia scala del vermicompostaggio. I substrati organici più "fruttuosi" rimangono il letame animale e/o rifiuti alimentari selezionati. Al fine di approfondire la tematica, in questo studio è stato analizzato un processo combinato di compostaggio-vermicompostaggio con *Eisenia fetida* per il trattamento della FORSU, mescolata con un substrato più idoneo ai lombrichi costituito da una miscela di lettiere animali e scarti alimentari preselezionati (MO – Materia Organica preselezionata). Per quanto riguarda la FORSU, sono state analizzate tre frazioni differenti provenienti da un impianto reale del settore di Gestione dei rifiuti municipali in Sicilia: FORSU tal quale, pre-compostato (PC, da intendersi come matrice organica che ha completato la fase di biodegradazione termofila) e Compost (C). I test di laboratorio hanno previsto 5 differenti applicazioni

con proporzione di miscelazione differente, in parte coadiuvati dall'aggiunta di materia organica preselezionata (MO). I parametri fisico-chimici e il rapporto di crescita dei vermi nei diversi trattamenti sono stati misurati e confrontati. I risultati hanno mostrato che il processo combinato ha aumentato la qualità del prodotto finale, specialmente per le matrici selezionate e per la FORSU preliminarmente trattata, con un prodotto fertilizzante che appariva omogeneo, granulare, inodore e ricco di nutrienti. In particolare, l'analisi fisico-chimica ha mostrato una significativa riduzione del rapporto C:N quando il vermicompostaggio è stato applicato alle matrici miscelate e MO, con rilevante aumento dell'azoto totale (N) e del fosforo disponibile (P). Il numero di lombrichi durante il processo è aumentato, sia in peso netto che in tasso di crescita, in particolare quando la FORSU è stata miscelata con materiale organico selezionato. Di contro, si è registrato un significativo accumulo di metalli pesanti nel "The di lombrico" (da intendere come fase liquida ottenuta da processi di biodegradazione del materiale organico e soprattutto dall'attività metabolica dei lombrichi), ed un contenuto degli stessi via via inferiore durante il processo.

**Parole chiave:** *compost, FORSU, Lombrichi, Vermicompostaggio.*

## COMBINATION OF COMPOSTING AND VERMICOMPOSTING OF OFMSW: A CASE STUDY IN SICILY

### Abstract

Earthworms elaborate huge amounts of plant debris by ingesting it and converting it into vermicast, the final product of the worm digestion process. Vermicast is widely

recognized as a suitable organic fertilizer for plants. To date, controlled vermicomposting of organic matrices, different than bovine manure, such as for example the organic fraction derived from biodegradable solid waste (OFMSW), has recorded contradictory results, effectively limiting the extension of laboratory results to in initiatives on a larger scale than vermicomposting. The most "fruitful" organic substrates remain animal manure and/

IdA



\* Facoltà di Ingegneria e Architettura – Università degli Studi di Enna "Kore", Cittadella universitaria, 94100 Enna gaetano.dibella@unikore.it

Ricevuto il 23-3-2023. Modifiche sostanziali richieste il 19-4-2023. Accettazione il 8-5-2023.

or selected food waste. In order to deepen the topic, in this study a combined process of composting-vermicomposting was analyzed with *Eisenia fetida* for the treatment of OFMSW, mixed with a more suitable substrate for earthworms consisting of a mixture of litters animals and pre-selected food waste (OM – pre-selected Organic Matter). As far as OFMSW is concerned, three different fractions from a real plant in the municipal waste management sector (Sicily) were analysed: OFMSW as it is, pre-composted (PC, meant as an organic matrix that has completed the thermophilic biodegradation phase) and Compost (C). The laboratory tests involved 5 different applications with different mixing proportions, partly assisted by the addition of pre-selected organic matter (OM). The physicochemical parameters and growth ratio of the worms in the different treatments were measured and compared. The results showed that the combined process increased the quality of the final product, especially for the selected matrices and for the pre-

treated OFMSW, with a fertilising product that appeared homogeneous, granular, odorless and rich in nutrients. In particular, the physicochemical analysis showed a significant reduction of the C:N ratio when vermicomposting was applied to the mixed matrices and MO, with a significant increase in total nitrogen (N) and available phosphorus (P). The number of earthworms increased during the process, both in net weight and growth rate, particularly when OFMSW was mixed with selected organic material. On the other hand, there was a significant accumulation of heavy metals in the “Tea of earthworm” (meant as a liquid phase obtained from organic material biodegradation processes and especially from the metabolic activity of earthworms), and a content of the same gradually lower during the process.

**Keyword:** *compost, FORSU, Earthworms, Nutrients, Vermicompost.*

## 1. Introduzione

La produzione di rifiuti solidi tende inevitabilmente ad accrescersi con la crescita demografica e lo sviluppo economico e sociale (Ebrahimi et al., 2018; Eslami et al., 2018). I rifiuti solidi comprendono i rifiuti municipali, industriali, agricoli e i fanghi di depurazione: nel complesso si prevede un progressivo incremento nella produzione di tali rifiuti (García-Sánchez et al., 2017).

Purtroppo, i convenzionali metodi di smaltimento dei rifiuti (discariche, inceneritori etc) risultano avere impatti ambientali più significativi rispetto ai trattamenti basati su processi biologici. Gli stessi, se basati su strategie di recupero di materia, risultano globalmente più efficienti rispetto ai processi di trasformazione termica.

In particolare, i metodi di trattamento basati su processi biotecnologici presentano molti vantaggi, tra cui alta velocità, facilità di controllo, bassi costi, elevata accettabilità ambientale e sanitaria e potenziale utilizzo a scale differenti (Yadav et al., 2010). Il compostaggio è il processo biologico più utilizzato e studiato per gestione della frazione organica dei rifiuti (Kumar et al., 2012). Il vermicompostaggio, di contro, si ispira ad un processo biologico simile (aerobico) operato dall'attività combinata di lombrichi e batteri, piuttosto che dei soli batteri aerobici (Adhikary, 2012).

Il compostaggio è un processo di biodegradazione dei rifiuti organici in condizioni aerobiche effettuato da microrganismi in cui i rifiuti organici vengono convertiti in composti minerali, come  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4$ , così come composti organici ricchi di humus. Questi ultimi, sono adatti per migliorare le proprietà fisiche del suolo (Lim et al., 2016; Qian et al., 2014).

Il processo di vermicompostaggio, simile al processo di compostaggio, è un processo biologico non esclusivamente batterico, in cui i nutrienti nei rifiuti organici si trasformano in un prodotto stabile, disponibile e nutriente per la crescita delle piante (Rupani et al., 2017). Nel processo di vermicompostaggio, infatti, l'ossidazione e la stabilizzazione biologica dei rifiuti organici dipendono dall'interazione tra lombrichi e microrganismi nel processo mesofilo di trasformazione. Specificatamente, l'attività dei lombrichi aumenta e migliora la matrice organica destinata al consumo di microrganismi. (Lazcano et al., 2008; Oluseyi et al., 2016; Pigatin et al., 2016). Il vermicompost finale è un materiale stabilizzato ed omogeneo ad alto contenuto di nutrienti e materiali a bassa tossicità che presenta molti vantaggi, come un'ottima capacità di scambio cationico, una maggiore capacità di ritenzione un'elevata concentrazione di nutrienti (Adi e Noor, 2009).

I lombrichi sono gli animali che elaborarono le maggiori quantità di suolo in natura (Feller et al., 2003; Premalatha et al., 2010 e 2013): ingeriscono detriti di piante morte ed escrementi di animali e suolo, contribuendo così alle positive trasformazioni del terreno e contemporaneamente, favorendo la mineralizzazione della fitomassa morta (Edwards et al., 2011). Ma, nonostante la quantità e tipologie di lombrichi in natura, l'uso controllato dei lombrichi per trattare i rifiuti organici è stato finora in gran parte limitato al compostaggio dei vermi del letame animale e in minor misura dei rifiuti alimentari domestici (Tauseef et al., 2013). Nella gestione dei rifiuti municipali, tuttavia, accanto ai rifiuti alimentari esistono altre frazioni più recalcitranti di origine vegetale come i rifiuti di foglie, erbacce o scarti delle colture, nonché elementi

tossici derivati dalla non perfetta separazione a monte. Per questo motivo il vermicompostaggio applicato alla FORSU ha evidenziato molti limiti e risultati contrastanti limitando l'applicazione su larga scala. Nonostante, il vermicompostaggio sia un processo intrinsecamente pulito, che richiede molta meno energia rispetto al compostaggio, in quanto le temperature raggiunte durante il processo risultano essere decisamente inferiori e non richiede rivoltamento periodico dei cumuli, né aerazione forzata grazie all'attività dei lombrichi, i dubbi sui risultati di lungo periodo e delle reali influenze negative dovute alla presenza di alcuni inquinanti nei rifiuti municipali, seppur selezionati, confinano oggi l'applicazione del vermicompostaggio prevalentemente alle trasformazioni di scarti provenienti dalla zootecnica, di letame bovino e rifiuti alimentari selezionati a livello mono-residenziale.

In questo contesto, ad esempio, non può essere ignorato che la presenza di potenziali elementi tossici, come i metalli pesanti presenti nei rifiuti, può minacciare la qualità del suolo e l'ambiente di accrescimento dei lombrichi. In ogni caso, le trasformazioni biochimica dei metalli pesanti durante il processo di vermicompostaggio sono ancora controversi nonostante l'attuale standard sul compost ponga limiti alle concentrazioni totali di alcuni metalli tossici. Diversi studi hanno riportato aumenti di concentrazioni totali di metalli pesanti durante il processo di vermicompostaggio (Khawairakpam e Bhargava, 2009; Suthar, 2010; Hait e Tare, 2012), mentre altri studi hanno ottenuto un comportamento totalmente inverso (Gupta e Garg, 2008). Probabilmente, i diversi modelli di sviluppo osservati sono strettamente legati ai meccanismi di bioaccumulo sito-specifici istaurati e all'evoluzione della riduzione di quantità di sostanza organica in termini di adattamento biologico (Suthar e Singh, 2008; Ngo et al., 2011). Pertanto, l'attività dei lombrichi può influenzare la reale solubilità e biodisponibilità dei metalli pesanti, modificandone la speciazione del vermicast (Wong e Selvam, 2006; Singh e Kalamdhad, 2012).

In questo scenario, risulta molto attuale l'interesse scientifico volto alla combinazione dei processi di compostaggio e vermicompostaggio. In questa filiera di trasformazione, opportunamente ottimizzata, un'ampia gamma di rifiuti organici anche resistenti alla decomposizione, possono essere potenzialmente decomposti senza compromettere l'efficienza del processo. In tal senso, la combinazione del compostaggio con il processo di vermicompostaggio potrebbe risultare idoneo alla biodegradazione di rifiuti solidi provenienti dalla raccolta differenziata cittadina, ad alta o bassa qualità (Lim et al., 2016; Sanchez-Monedero et al., 2010).

Considerando il grande volume di FORSU prodotta e la necessità di una corretta gestione e trasformazione di questi scarti in prodotto riutilizzabile ed ecologico, questo studio mira a valutare il processo combinato di composting-vermicompostaggio per la gestione della FORSU, eventualmente coadiuvando il processo con l'aggiunta di matrici organiche preselezionate. La sperimentazione è stata basata su test in batch di laboratorio, con impianti di vermicompostaggio pilota, su cui sono stati monitorati e misurati i parametri fisico-chimici, il tasso di crescita dei lombrichi e le loro caratteristiche di accrescimento (Accumulo di metalli nei tessuti, produzioni di "the di lombrico" etc.) durante i processi di trasformazioni di matrici reali provenienti da un impianto di compostaggio nella provincia di Catania, in Sicilia (Italia).

## 2. Materiali e metodi

### 2.1. Analisi chimico fisiche

Le misure di umidità, pH e temperature sono state effettuate con sonde ad infissione, direttamente sulla matrice solida.

Il contenuto di azoto è stato valutato per mezzo di un metodo pseudo-standardizzato (Corsino et al., 2021). Questo metodo ha previsto una prima fase di preparazione, con triturazione delle matrici organiche da analizzare, e valutazione preliminare dell'umidità (in stufa, per 24 ore a 105°C). Partendo dal valore di umidità iniziale si procedeva a calcolare l'aliquota necessaria di matrice triturata da porre in agitazione con acqua deionizzata in modo tale da garantire un corretto rapporto sostanza secca/acqua (0,5 grammi di sostanza secca e 500 mL di acqua o 1 g SS con 1 L di acqua).

La fase successiva prevedeva una prima agitazione meccanica, volta a rompere/sfaldare i granuli di dimensioni maggiori e creare una sospensione omogenea, e una agitazione blanda dei campioni (in piastra magnetica) per 30 minuti.

Al termine della fase di agitazione veniva prelevata l'aliquota di slurry necessaria per l'analisi dell'azoto totale eseguita per spettrofotometria (metodo acido cromatropico).

Il contenuto di fosforo è stato valutato tramite spettrometria ICP (*Inductively Coupled Plasma*). La preparazione dei campioni ha previsto l'iniziale triturazione, o pestellamento tramite mortaio, volta a rendere la matrice solida omogenea e destrutturata. Successivamente ad 1 g umido di campione venivano aggiunti 6 ml di acido nitrico e 3 ml di acido cloridrico, al fine di predisporre la fase di digestione dei campioni a 145°C per 2 ore. Una volta filtrato (0,45 micron) un campione di 50 ml si è proceduto all'analisi spettrometrica.

Per quanto riguarda il contenuto di materia organica nei campioni e nel vermicast di ogni test, sono state avanzate due misure: Contenuto di carbonio organico e di sostanza organica con metodo Walkley-Black (Violante 2000). Il carbonio organico (C.O.) è una componente misurabile della sostanza organica (S.O.) del suolo. In particolare, il C.O. (< S.O.) è la componente biologicamente “disponibile” misurabile della materia organica del suolo che costituisce una piccola porzione del terreno ma svolge un ruolo fondamentale nella funzione fisica, chimica e biologica del suolo. Il contenuto di carbonio organico dei suoli varia con il tipo di suolo, ma anche al variare dell’uso del suolo e, in misura ancora maggiore, con le diverse pratiche colturali (es. concimazione organica nelle zone dove è diffuso l’allevamento). Per questo motivo, i rapporti C/N sono stati riferiti al contenuto di C.O.

## 2.2 Impianto di compostaggio

L’impianto da cui sono state campionate le matrici oggetto di studio è ubicato all’interno del territorio della Provincia di Catania (Sicilia), dislocato su una superficie di circa 25.500 mq. Il layout comprende:

- area di pretrattamento iniziale, stoccaggio e miscelazione;
- area di biostabilizzazione (costituita da 8 biocelle);
- area di maturazione post-biostabilizzazione e stoccaggio prodotto finito;
- bacino di contenimento del colaticcio;
- area per presidio trattamento aria esausta tramite biofiltro e scrubber;
- locali tecnici e area lavaggio ruote.

La potenzialità ricettiva dell’impianto è attualmente di 150.000 T/anno di rifiuto organico (Frazione Organica dei Rifiuti Solidi Urbani) con una linea di processo che prevede:

- pesa e ricevimento;
- scarico e stoccaggio rifiuti ligneo-cellulosici;
- triturazione legno e stoccaggio legno triturato;
- scarico e stoccaggio rifiuti organici;

- miscelazione rifiuti;
- bio-ossidazione accelerata e intermedia;
- stabilizzazione, maturazione e stoccaggio compost grezzo;
- vagliatura finale;
- stoccaggio compost finito.

All’interno dell’area di ricevimento e preparazione è prevista l’operazione preliminare di miscelazione dei diversi rifiuti con legno triturato, in modo da migliorare le caratteristiche della miscela, in termini di composizione e umidità, per lo sviluppo dei processi biochimici e la qualità del prodotto finale. In seguito a miscelazione, il materiale viene trasportato all’interno delle biocelle (superficie lorda di 670 mq cadauna), dove inizia il processo di compostaggio. La pavimentazione impermeabile è dotata di una rete di raccolta del percolato. Il sistema di aerazione può essere attivato sia in modalità “ad immissione” che “in aspirazione”: l’aerazione garantisce il controllo della temperatura e del contenuto di ossigeno. Terminata la fase di bio-ossidazione, generalmente dalla durata media di 14 giorni il materiale viene trasferito alla sezione di stabilizzazione-maturazione, dalla durata di almeno 75 giorni e nella quale avviene il completamento del processo di trasformazione dato dalla formazione di composti organici più stabili (con rivoltamento periodico dei cumuli). Completata la fase di maturazione, il prodotto è soggetto ad operazione di raffinazione finale, costituita dalla vagliatura per la rimozione dei materiali grossolani.

I campioni oggetto dei test sperimentali condotti presso il LISA (Laboratorio di Ingegneria Sanitaria Ambientale) dell’Università di Enna, hanno previsto il prelievo di tre campioni di circa 30 kg:

- FORSU, prelevato dalla sezione 5 del precedente elenco puntato, prima della fase di miscelazione con i bulking agents (legno triturato);
- PRE-COMPOSTATO, prelevato dopo la bio-ossidazione accelerata (sezione 6);
- COMPOST, prelevato dopo la fase di maturazione, prima della vagliatura (sezione 7).

**Tabella 1.** Caratterizzazione substrati iniziali.

PARAMETRI	UM	FORSU	Pre-compost (PC)	Compost (C)	Materia Organica selezionata (MO)
Contenuto organico	[g/kgss]	323,5	284,9	268,5	321,8
Contenuto Azotato (N)	[g/kgss]	10,97	12,89	13,84	7,54
Contenuto fosforo (P)	[g/kgss]	0,525	0,809	0,881	0,389
C/N	--	29,5	22,1	19,4	42,7
N/P	--	20,9	15,9	15,7	19,4
pH	--	4,0	6,0	6,0	5,5
umidità	%	85	85	85	95

Al fine di provvedere all'indagine sperimentale comparata con matrici ordinarie, è stato parallelamente preparato un campione di matrice organica selezionata da scarti in ambiente domestico, che rappresenta il campione "bianco" esente da impurità. La caratterizzazione analitica di ogni campione (iniziale) è riportata in Tabella 1.

La pianificazione dei test di laboratorio e l'approntamento delle vermicompostiere è descritto nel prossimo paragrafo.

### 2.3. Installazione sperimentale

Lo studio sperimentale ha previsto l'utilizzo di vermicompostiere "prefabbricate" fornite dall'azienda CONITALO leader nel settore della lombricoltura dal 1979 (<https://www.conitalo.it/>).

Ogni compostiera era costituita da un comparto inferiore per l'accumulo di percolato, e da ulteriori 3 comparti (di cui solo 2 sono stati utilizzati per gli scopi dello studio proposto) per l'alloggiamento delle matrici da compostare. Il comparto di bio-trattamento era fondamentalmente costituito da un sistema a lettiera in cui i lombrichi possono essere inoculati in un sottile strato di matrice organica che viene consumato nel tempo e a cui vengono aggiunti ulteriori strati nelle piattaforme superiori, raggiungibili liberamente dai lombrichi presenti negli strati inferiori. È importante che i vari strati di sostanza organica in ogni comparto non fossero troppo spessi (dimensione massima 4-5 cm) per permettere ai lombrichi di colonizzare e degradare l'intera profondità.

Sono stati previsti 5 test in 5 differenti compostiere, studiando le 4 matrici descritte nel paragrafo precedente, a cui si è aggiunto un test "misto" miscelando COMPOST e MATERIA ORGANICA SELEZIONATA, al fine di garantire l'eventuale e ulteriore supporto organico qualora la matrice compostata nell'impianto di compostaggio reale fosse stata esageratamente impoverita di substrato.

Ogni vermicompostiera è stata avviata con 3 kg di matrice/lettiera da analizzare.

Lo schema delle vermicompostiere e l'installazione sperimentale sono riportate in Figura 1, mentre in Tabella 2 sono riportate le composizioni percentuali delle matrici predisposte in ogni comparto dei 5 test.

### 2.4. Analisi della crescita della biomassa vermifuga

I lombrichi, *Eisenia fetida* (Pramanik e Chung, 2011), sono stati forniti dalla stessa azienda che ha fornito le vermicompostiere.

I vermi forniti erano giovani, conservati nella cultura madre in confezioni di 200 grammi. Inizialmente, la biomassa vermiforme è stata prelevata e adattata in colture miste letame-organico selezionato prima della messa in dimora nelle compostiere, fornite dalla stessa azienda. In particolare, prima dell'esperimento di vermicompostaggio, letame di coniglio e scarti vegetali sono stati mescolati in rapporti 2:1 (w/w), per i primi 10 giorni, e in rapporto 1:1 (w/w) nei successivi 10 giorni. Per fornire una migliore aerazione e controllo dell'umidità, rimuovendo al contempo eventuali gas tossici, si è garantita una miscelazione (manuale) giornaliera della lettiera. La matrice così preparata è stata posta nella prima vaschetta (comparto inferiore), di ogni vermicompostiera. I lombrichi localizzati nella vaschetta inferiore erano liberi di muoversi verso la vaschetta superiore in cui al giorno 0 (t=0 giorni) è stata allocata la matrice da investigare come descritto nel paragrafo precedente.

L'inoculo iniziale è stato realizzato con 200 grammi di lombrichi pre-acclimatati, inseriti nel comparto inferiore di ogni vermicompostiera.

La misura della crescita vermiforme è stata valutata in modo completo solamente alla fine della sperimentazione (t=180 giorni), quando scarti di anguria sono stati disposti all'interno delle vermicompostiere, in vaschette diverse da quelle in cui erano contenute le ma-

**Tabella 2.** Composizione dei diversi trattamenti.

Ripiano vermicompostiera	TEST	FORSU	Pre-compost (PC)	Compost (C)	Materia Organica selezionata (MO)
Comparto superiore	C1	100%	-	-	-
	C2	-	100%	-	-
	C3	-	-	100%	-
	C4	-	-	50%	50%
	C5	-	-	-	100%
Comparto inferiore	C1	-	-	-	100%
	C2	-	-	-	100%
	C3	-	-	-	100%
	C4	-	-	-	100%
	C5	-	-	-	100%

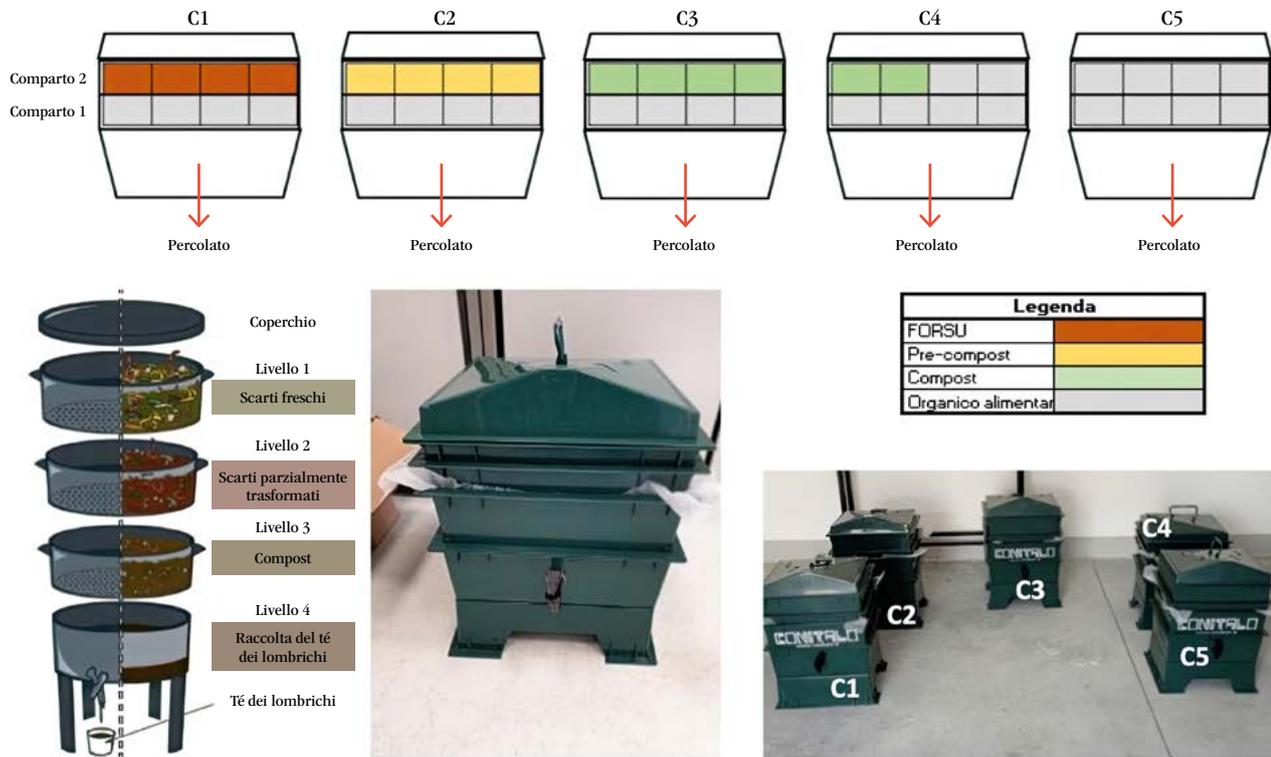


Figura 1. Batteria e particolari delle vermicompostiere installate.

trici trasformate, in modo da poter separare quotidianamente i vermi attratti dalla particolare tipologia di sostanza organica (abbondanza di acqua e zuccheri). Di contro, le analisi intermedie a 15 e 90 giorni sono state condotte su 5 campioni statisticamente rilevanti prelevati al centro e alle 4 estremità del cumulo di entrambe le vaschette. I lombrichi presenti nei campioni venivano pesati e rapportati all'intera massa. Più specificatamente, le analisi intermedie hanno previsto il campionamento di 5 aliquote (50 grammi) omogeneizzate per ogni vaschetta. Al fine di procedere all'analisi fisico-chimica (vedi paragrafo 2.1), i campioni sono stati inizialmente essiccati all'aria a temperatura ambiente, frantumati e setacciati a 0,5 mm. I vermi, preliminarmente rimossi manualmente, sono stati rapportati alla massa totale dopo averli lavati con acqua deionizzata per rimuovere il materiale aderente: gli stessi sono stati re-inseriti nella vermicompostiera specifica, una volta pesati.

Per la valutazione del bioaccumulo di metalli, circa 50 g di vermi, per ogni comparto significativo C1-C5, sono stati selezionati casualmente e tenuti al buio per 24 ore. Questo è stato necessario al fine di permettere ai lombrichi di rilasciare il contenuto intestinale che potrebbe pregiudicare la misura corretta, soprattutto nel caso abbiano ingerito materiale organico in quantità rilevante rispetto al loro peso. Quindi, dopo averli lavati con acqua ultrapura, si è proceduto alla liofilizzazione per l'analisi dei metalli pesanti (solo per il giorno 180). (Song et al. 2014).

### 3. Discussione e risultati

#### 3.1. Variazioni di pH, temperatura e umidità e volume della massa compostabile

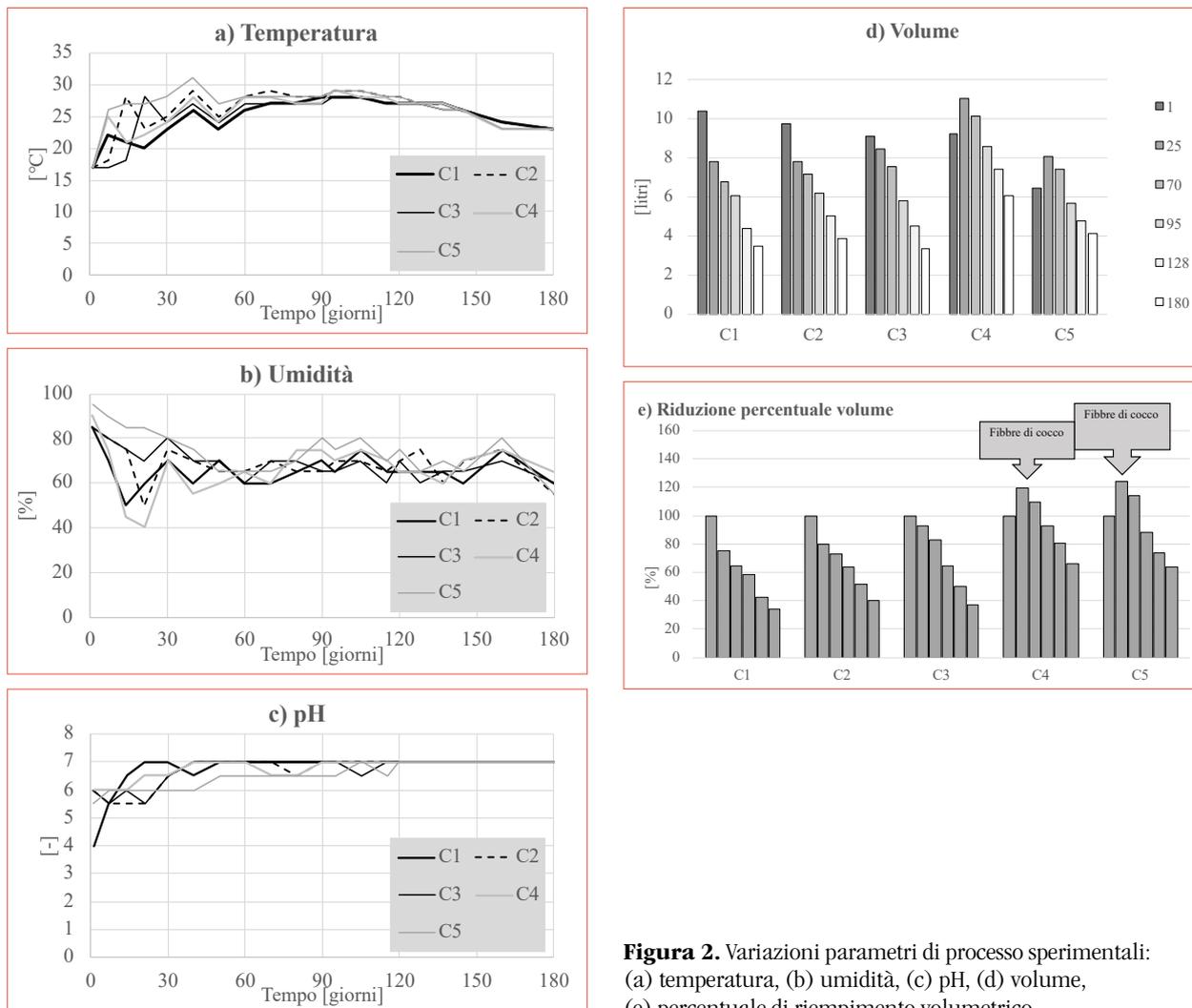
La Figura 2 riporta le misure dei parametri di controllo del processo, oltre alla variazione dei volumi relativa ad ogni vermicompostiera (C1-C5).

Tutti i reattori sono stati mantenuti a temperature ambiente, in un'area di stoccaggio ombreggiata e aerata. Conseguentemente, la temperatura della massa compostabile ha seguito le normali oscillazioni stagionali mantenendosi, a regime, dopo il 60esimo giorno attorno a  $25 \pm 3$  °C.

L'umidità è stata monitorata tramite continui e opportuni interventi correttivi di "umidificazione". Nello specifico l'obiettivo era quello di mantenere l'umidità attorno al  $70 \pm 10\%$ , in modo da non ostacolare l'azione dei lombrichi e le condizioni aerobiche necessarie per il loro sviluppo. Solamente per i campioni C4 e C5, è stato necessario inserire nella fase iniziale una opportuna quantità di fibre di cocco in modo da ridurre l'eccessivo valore iniziale di umidità ( $>90\%$ ), tipica degli ammassi di organico selezionato.

Per quanto riguarda i valori di pH, si è osservato che il vermicompost in ogni test ha raggiunto un valore pressoché neutro, partendo tuttavia da valori differenti fra loro. I valori di partenza risultavano particolarmente acidi, per il compost e l'organico selezionato (C1 e C5) e debolmente acido per tutti gli altri.

Possibili contributi alle variazioni di pH potrebbero essere dovuti alla differente produzione di  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$



**Figura 2.** Variazioni parametri di processo sperimentali: (a) temperatura, (b) umidità, (c) pH, (d) volume, (e) percentuale di riempimento volumetrico.

e acidi organici durante il processo (Yadav e Garg, 2011). In generale l'aumento del pH del vermicompost, rispetto ad altri processi di compostaggio (Yadav e Garg, 2011; Arancon e Edwards, 2011), è dovuto alla maggiore perdita di materia organica e al maggiore accumulo di diversi sali minerali nelle forme disponibili (ad esempio fosfato, ammonio, potassio) del vermicompost.

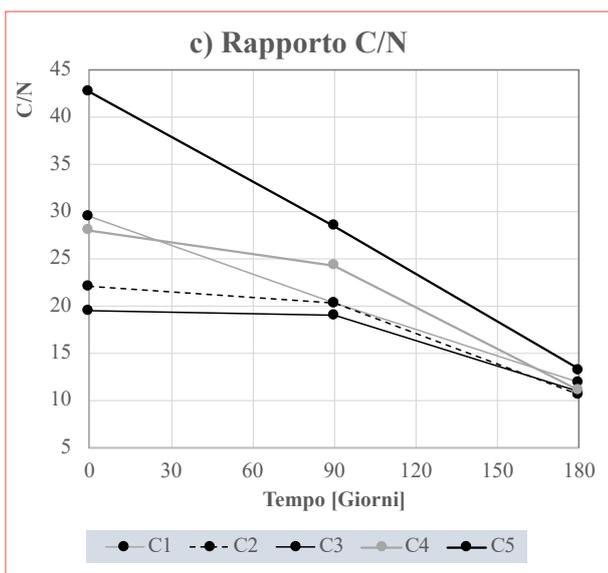
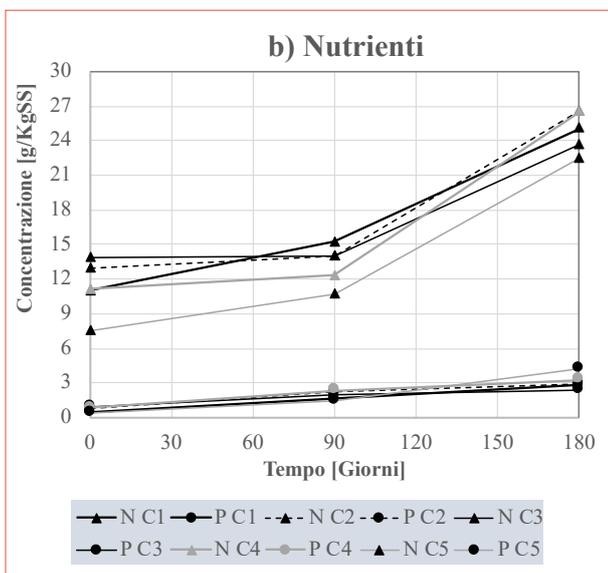
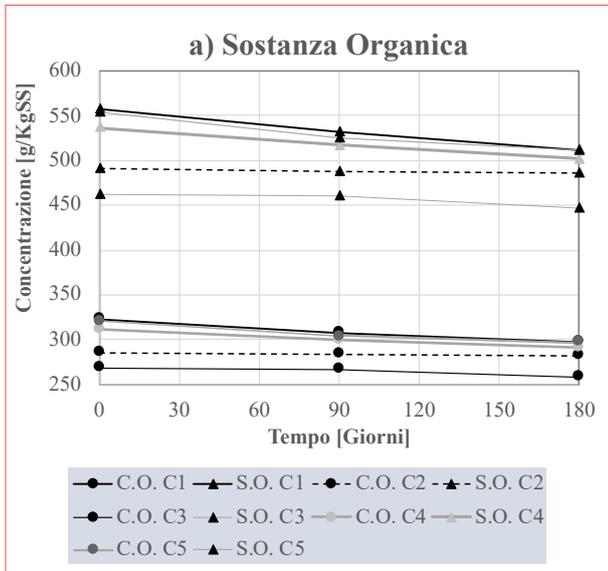
Parallelamente al processo di trasformazione, la massa di materiale nella compostiera ha raggiunto una densità via via maggiore a scapito di una significativa riduzione del volume. La riduzione di volume più significativa è stata osservata nel test C1 riferita al compost (oltre il 65%), mentre per i test C2 e C3 si attestava a valori minori (massimo 37-40%). Gli ultimi due test, condotti con materia organica opportunamente selezionata, hanno fatto registrare minori riduzioni di volume ed una densità maggiore, in questo caso occorre sottolineare che dopo le prime due settimane il volume della massa da trasformare risultava addirittura maggiore a causa del dosaggio di fibre di cocco.

### 3.2. Variazioni della sostanza organica e rapporto C/N (inizio-metà e fine)

La Figura 3 riporta l'andamento della componente organica, dei nutrienti e del rapporto C/N (N/P) durante la sperimentazione, per i 5 test di vermicompostaggio.

Come sottolineato in precedenza, si è registrata la perdita di sostanza organica. In generale, la perdita di massa organica più significativa (S.O. e C.O.) è stata osservata per le matrici inizialmente più "biodegradabili", nell'ordine C5-C1 (~ 8.5%) e C4 (~ 6.5%). Le matrici relative al pre-compost e compost provenienti dall'impianto reale, essendo state precedentemente trasformate dall'azione batterica attuata nell'impianto di compostaggio, hanno fatto registrare una minore perdita di componente organica (massimo 1-3%).

In modo complementare, ma con percentuale più rilevante, l'aumento dell'azoto totale (N) è stato registrato molto nel vermicompost ottenuto dai test C5, C4 e C1 (rispettivamente 198,6%, 138,5% e 128,5%) rispetto ai test C2 e C3 (ovvero 106,3%, 70,8%, rispettiva-



**Figura 3.** Variazioni durante la sperimentazione del contenuto di Sostanza Organica (a), Nutrienti (b) e rapporto C/N (c) in ogni test

riori a quello di partenza). È interessante sottolineare che mentre l'aumento del fosforo ha un andamento lineare, l'azoto è significativamente aumentato nella seconda metà del periodo sperimentale, una volta stabilizzata la fase stazionaria.

Per quanto riguarda lo sviluppo del vermicast, è evidente che la riduzione della sostanza organica è correlabile alla riduzione della massa secca dei rifiuti organici discussi nel paragrafo precedente: questo, a sua volta, è effetto del differente grado di decomposizione e mineralizzazione delle matrici di partenza e delle trasformazioni in vermicompost, con differenti e specifiche concentrazioni di azoto arricchito (Gupta e Garg, 2008). Inoltre, l'aumento significativo dei nutrienti può essere anche addebitato all'attività dei lombrichi che favorivano il rilascio di prodotti metabolici azotati attraverso le deiezioni del lombrico, urina e muco (Suthar e Singh, 2008).

Infine, il rapporto carbonio/azoto (C/N), dove la componente organica è stata riferita alla quota biodegradabile riferita al C.O., è uno dei più comuni indicatori utilizzati per stimare la maturità del compost e successivamente essere adatto per applicazioni sul campo (Suthar, 2010).

Il vermicompostaggio ha ridotto il rapporto C/N del 69,1% per C5, 60,8% per C4, 59,9% per C1, 52,1% per C3, 43,5% per C2. Questi valori sono tendenzialmente maggiori a quelli che in letteratura sono stati osservati nella trasformazione biologica da compostaggio (Song et al., 2014). Questo conferma il concomitante e contrario andamento del C.O. e N.

In termini assoluti, il rapporto C/N è risultato essere inferiore a 14 in tutti i test, con i valori inferiori osservati per le matrici provenienti dalla FORSU e dall'impianto di compostaggio ( $\leq 11$ ). Valori leggermente più alti sono stati osservati per le matrici contenenti organico selezionato, comunque inferiori a 12 per C4 e  $\leq 13,5$  per C5. In questo contesto, occorre sottolineare che già in passato Padmavatiamma et al. (2008) riportava che un rapporto C/N  $< 20$  indichi una maturità accettabile nel compost finito, ma un rapporto 15 è preferito per l'applicazione agronomica.

Pertanto, il rapporto C/N inferiore a 12 indicava che il vermicompost aveva le proprietà preferibili per potenziali applicazioni sul campo (Suthar, 2010).

mente). Un andamento simile è stato osservato per il fosforo (P) anche se, data l'esigua concentrazione di partenza, il risultato dell'aumento % sembra più marcato (valori di concentrazione anche 8-9 volte supe-

### 3.3. Crescita di biomassa

La Figura 4 riporta l'andamento della crescita della massa di lombrichi nelle 5 vermicompostiere.

Alla fine dell'esperimento, la massa totale del lombrico è cresciuta in tutti i test. In particolare, come prevedibile, l'aumento più significativo è stato raggiunto per C5, dove è stata investigata la matrice ottenuta da materiale organico selezionato. In questo caso la massa di lombrico è quasi triplicata.

Nel caso delle matrici intermedie, C2, C3 e C4, l'aumento di massa vermiforme si è attestata a poco più del doppio rispetto al valore iniziale.

Nel caso di C1, invece, la massa di lombrichi è aumentata del solo 87%.

Sicuramente i risultati della crescita sono direttamente collegati alla disponibilità di nutrienti e sostanza organica ma, soprattutto, all'ambiente di crescita iniziale. A tal proposito, le misure intermedie rilevate dopo 2 settimane hanno evidenziato una significativa perdita di biomassa dovuta alle condizioni non idonee della matrice di partenza.

Più specificatamente, i lombrichi "coltivati" nel primo scomparto (lettiera ottimale), uguale per tutti i test, si sono ritrovati a trasformare una matrice molto differente nel secondo scomparto. Alcune matrici, tra l'altro, risultavano molto "complicate" e non idonee allo scenario di crescita ordinario: di conseguenza la maggior parte dei lombrichi è "morta".

La mortalità è stata rilevante per C1 e C2 (65% e 60%) e significativa per C3 (50%). Al contrario in C5 non si è registrata nessuna mortalità. In C4, dove compost e materia organica selezionata sono stati miscelati, la mortalità è stata contenuta a meno del 50%. Probabilmente, la causa di questa iniziale "stabilizzazione" è stata dovuta all'ambiente particolarmente acido e putrescibile della matrice (più accentuato in C1, come mostrato dalla Figura 2c), profondamente differente rispetto alla matrice degradabile ottenuta da miscela di organico e letame della lettiera di accrescimento (primo comparto).

È importante evidenziare, che la biomassa sopravvissuta si è rapidamente adattata generando nuova biomassa vermifuga, adattata alle condizioni ostili

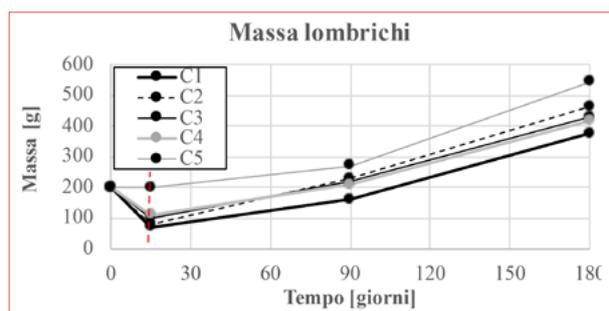


Figura 4. Crescita della massa vermiforme nei 5 test.

di accrescimento, come dimostrano i valori in crescita del 90esimo giorno. Il risultato finale ha permesso di definire una matrice comunque attiva composta da lombrichi adulti e "in fase di sviluppo" (che in alcuni test arrivava anche al 50% del totale) che hanno comunque contribuito alla trasformazione del vermicast ma con risultanze di crescita comunque inferiore a quelli ottenuti in altre sperimentazioni basate su matrici differenti da quella dei rifiuti organici municipali.

È possibile, infine, che la crescita e la necessità di "adattamento iniziale" sia stata influenzata dal bioaccumulo di metalli pesanti nel tessuto degli stessi, come confermano gli studi di Suthar e Singh (2008) e Song et al., (2014), o la specifica fisiologia del metallo (Lukkari et al., 2006).

In particolare, il lombrico può potenzialmente accumulare una certa quantità di sostanze tossiche quali metalli nei loro tessuti, e inevitabilmente introdurre metalli nelle catene alimentari terrestri. Tale aspetto è approfondito nel paragrafo successivo.

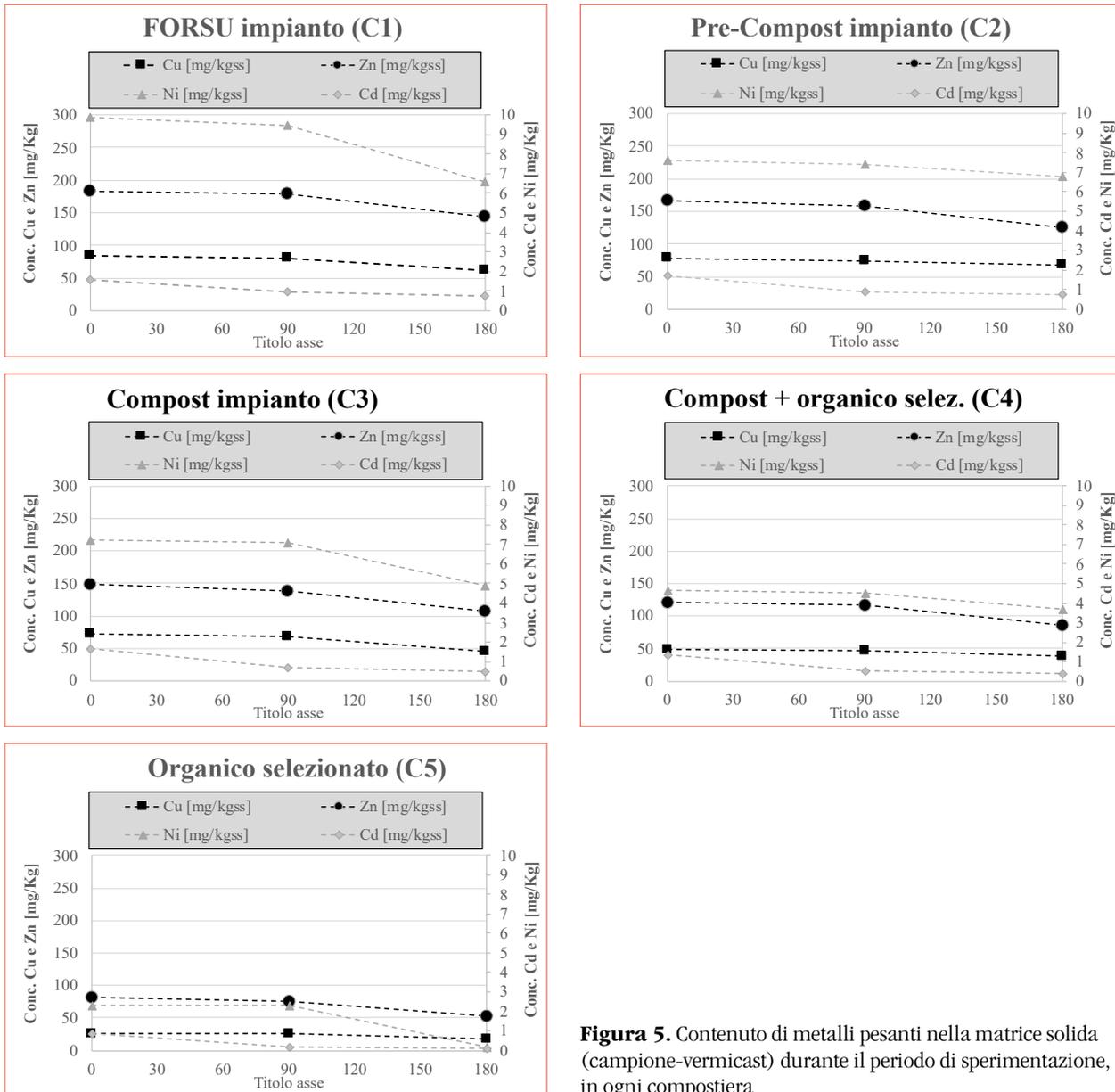
### 3.4. Biodisponibilità di metalli pesanti

Innanzitutto, occorre evidenziare che l'effettivo bioaccumulo dei metalli nel tessuto dei lombrichi è risultato molto inferiore a quello osservato da altri ricercatori (Song et al., 2014). Probabilmente, questo è stato dovuto al fatto che i lombrichi hanno richiesto un tempo di adattamento significativo alle condizioni di lavoro, con tassi di mortalità iniziali abbastanza significativi: inoltre, la crescita netta registrata, alla fine dei sei mesi di osservazioni, è stata inferiore a quelle osservate nella trasformazione di letame animale.

Per questo motivo, parte dei metalli pesanti è stata "concentrata" nel vermicast e nel liquido eluito (e in parte prodotto dalla biomassa), piuttosto che nei lombrichi. In questo contesto la Figura 5, riporta il contenuto di 4 metalli di interesse (Cu, Zn, Ni, Cd) nel vermicast e nel percolato dei 5 test.

La scelta dei metalli investigati, è stata fatta sulla base della caratterizzazione delle matrici iniziali che, a causa della loro origine (rifiuti solidi urbani), contenevano rilevanti concentrazioni di alcuni metalli pesanti rispetto ad altri: questa circostanza era in parte addebitabile alle importanti impurità della matrice di partenza (batterie, plastiche e microplastiche, lattine etc.).

Innanzitutto, occorre evidenziare che la concentrazione di metalli pesanti nelle matrici iniziali erano maggiori nella matrice grezza non lavorata (FORSU, C1), rispetto alle matrici lavorate (pre-compost, C2 e Compost C3). Il contenuto minore è stato registrato nelle matrici che contenevano la materia selezionata pura (C5) o combinata (C4). In ogni caso, in tutti i test, e per tutti i metalli analizzati, i valori di partenza



**Figura 5.** Contenuto di metalli pesanti nella matrice solida (campione-vermicast) durante il periodo di sperimentazione, in ogni compostiera

sono stati ridotti durante il processo di vermicompostaggio. Nel seguito, alcune interessanti osservazioni rilevabili dalla Figura 5. In nessuna matrice, di partenza o finale, si sono registrati valori superiori ai limiti imposti dal D.Lgv 75/2010.

Il Cd ha evidenziato la riduzione più significativa della concentrazione nel vermicast finale, superiore al 50% per C1 e C2, quasi del 70% per C3, e superiore al 70% per C4. La matrice di riferimento relativa a C5, materia organica selezionata, ha evidenziato una riduzione del Cd di circa il 90%.

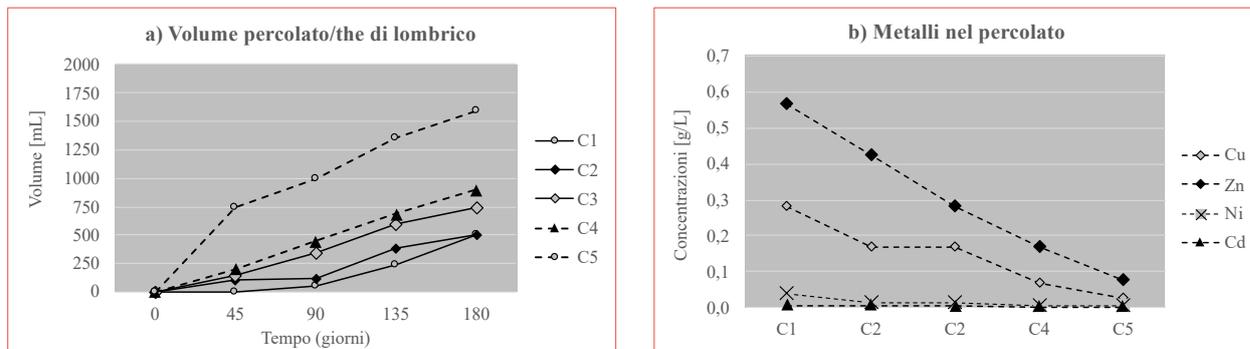
Ad eccezione del Cd, tutti gli altri metalli pesanti hanno evidenziato una cinetica generale di riduzione prevalentemente concentrata nel secondo periodo del test (tra il giorno 90 e 180).

Come era prevedibile, le concentrazioni di metalli pesanti nel vermicast ottenuto da matrice organica “pura (C5) sono state trascurabili.

Quanto osservato nella matrice solida, è stato confermato dalle concentrazioni di metalli ottenute nel liquido raccolto da ogni compostiera. In Figura 6 sono riportati i volumi e le concentrazioni di metalli nei campioni liquidi di ogni test.

Si osserva che il volume di “percolato” prodotto dalle matrici organiche “domestiche” è risultato nettamente maggiore a quello prelevato dai test condotti con matrici grezze (FORSU in C1) e semilavorate (pre-compost e compost, C2 e C3). Questo è dovuto probabilmente alla differente consistenza/densità delle matrici analizzate e del vermicast sviluppato (Figura 7): in particolare, questo aspetto influenzava il valore di partenza di CIC (capacità idrica di campo) e quindi la percolazione. Dall’altro lato, anche i valori di differente umidità iniziale, discussi in precedenza, avvalorano le differenze volumetriche di raccolta.

In ogni caso, come riportato in Figura 6b le concen-

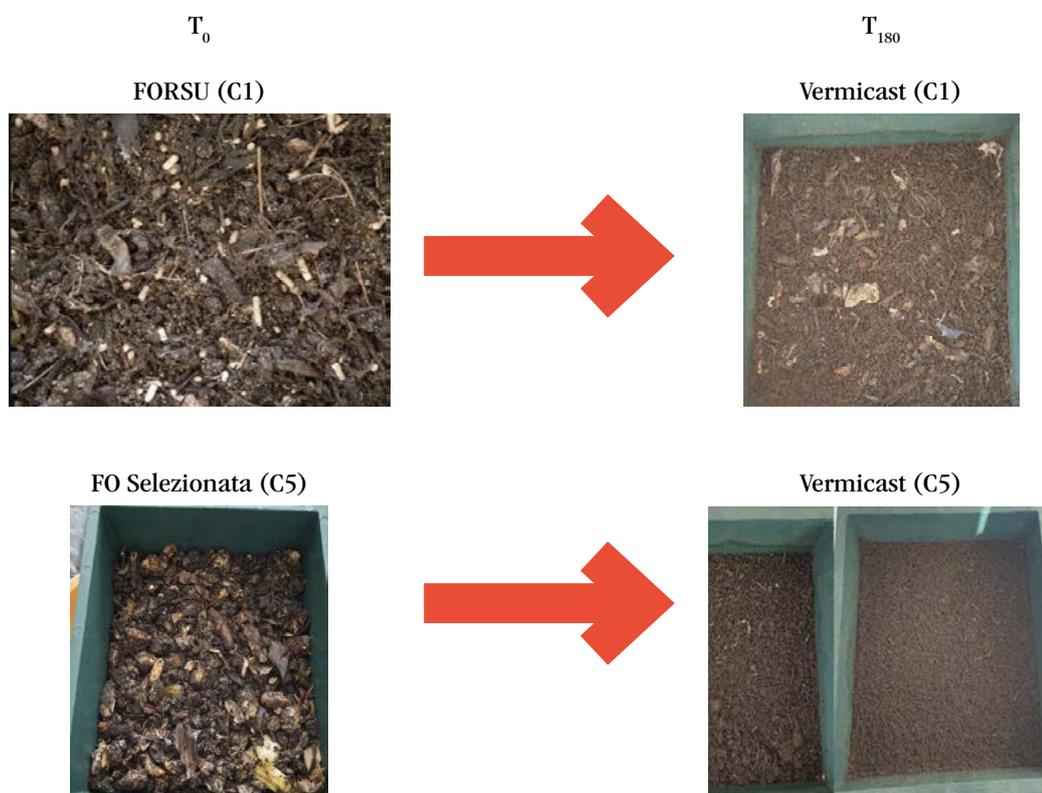


**Figura 6.** Volume (a) e contenuto di metalli (b) del percolato (the di lombrico) prodotto in ogni test.

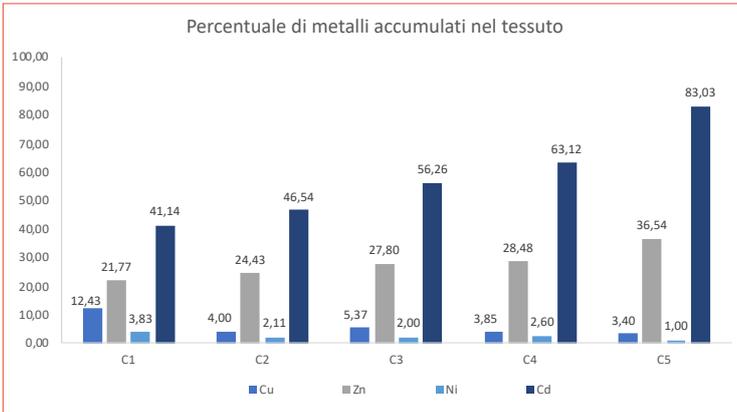
trazioni di metalli sono significativamente alte in C1, C2 e C3; risultano nettamente inferiori in C4, e trascurabili in C5. Questo risultato suggerisce che l'eventuale utilizzo di "the di lombrico", come fertilizzante ottenuto da matrici della FORSU (grezze o lavorate) deve essere seriamente valutato/attenzionato se la purezza delle matrici viene inficiata da una raccolta differenziata non ottimale. D'altronde, per lo stesso motivo, nel caso studiato si è preferito definire in "percolato" il liquido raccolto nella vaschetta delle vermicompostiere, in quanto il processo di formazione dominante coinvolge prevalentemente processi di eluizione piuttosto che quelli biologici di formazione dovuti al metabolismo dei lombrichi. Al contrario, il liquido raccolto dai test condotti con Materiale organico selezionato da ambiente domestico, miscelato (C4) o puro (C5), sono

risultati essere in linea con le ricerche condotte in letteratura (Abbassi et al., 2015; Furlong et al., 2017; Gomez-Brand et al., 2021; Hu et al., 2021).

Infine, occorre ribadire che in questa esperienza, il bioaccumulo nel tessuto dei lombrichi è risultato essere secondario rispetto ai processi di eluizione sopra descritti. In generale, si è osservato (Figura 8) che il metallo più bioaccumulabile è risultato essere il Cd, seguito dallo Zn. Al contrario Cu e Ni, sono stati rinvenuti prevalentemente nel liquido eluito piuttosto che nei tessuti dei lombrichi. In generale, i test hanno comunque confermato quanto osservato da Song et al. (2014), per cui i lombrichi contribuiscono a diminuire le concentrazioni di metalli pesanti per mezzo del bioaccumulo di quantità più o meno elevate nei loro tessuti, specialmente per Cu e Zn.



**Figura 7.** Aspetto delle matrici non trattate e trattate, relative alla FORSU (C1) e all'organico selezionato (C5).



**Figura 8.** Percentuali di metalli accumulati nei tessuti dei lombrichi nei diversi test.

### 3.5. Aspetti di approfondimento futuri: prove di fito-accrescimento in ambiente controllato

Le concentrazioni totali di metalli pesanti sono importanti per valutare i potenziali rischi per l'ambiente: in particolare la frazione ancora disponibile nel vermicast ed ancora potenzialmente estraibile rappresenta un potenziale aspetto fitotossico per piante (Zheng et al., 2007). Come osservato in precedenza, rispetto al compost e pre-compostato iniziale, le concentrazioni di metalli estraibili nel prodotto finale sono diminuite significativamente. In generale, le proporzioni delle frazioni disponibili al totale coincidevano quasi "a specchio" con gli andamenti delle concentrazioni dei metalli contenuti nella fase liquida raccolta. La frazione residua può essere considerata come "indisponibile" in quanto concentrata nel tessuto del lombrico, seguito dalla sua stessa attività. Anche altri studi hanno trovato differenti disponibilità di metallo, che comunque diminuisce sempre durante il periodo di vermicompostaggio e maturazione (Walter et al., 2006; Singh e Kalamdhad, 2012, 2013; Song et al., 2014).

La diminuzione della disponibilità di metalli nel vermicompost si verifica per almeno due ragioni. In primo luogo, il vermicompost elaborato dai lombrichi ha generalmente i livelli più elevati di frazione di acido umico, che favorisce l'effetto di assorbimento più forte sulla formazione di metallo-humus, con formazione di stabili complessi specialmente per Cu e Zn (Kang et al., 2011). In secondo luogo, coerentemente con il bioaccumulo nei tessuti dei lombrichi, lo strato epiteliale e il fluido corporeo del lombrico potrebbero assorbire i metalli durante il transito tra i rifiuti organici (Walter et al., 2006; Suthar e Singh, 2008).

In ultima analisi, al fine di valutare il potenziale rischio di trasferimento di metalli pesanti residui dal vermicast alla pianta, una serie di test di "germinazione" dovrebbe essere predisposta per lo studio di questo aspetto specifico. L'argomento non è annoverato tra gli obiettivi della presente memoria: tuttavia, è stata già predisposta una installazione sperimentale che, in futu-

ro, mirerà a testare il vermicast ottenuto dai test C1-C5, sulla base dell'osservazione dei ritmi di crescita e del bio-accumulo di specifici metalli sulle radici, sulle foglie o frutto di differenti specie. Le specie analizzate saranno differenziate per la loro capacità di accumulare metalli a livello radicale (per esempio ricino) o sul frutto/foglie (per esempio tabacco).

## 4. Conclusioni

Lo studio ha confermato che è possibile ottenere vermicompost da differenti frazioni organiche di rifiuti municipali, grezze o pretrattate.

In generale, il vermicompost ottenibile potrebbe risultare migliore al compost e alle miscele iniziali in termini di proprietà nutritive e attraverso la mineralizzazione rafforzata e umificazione. Sicuramente risulta fondamentale in tal senso, la fase iniziale di adattamento dei lombrichi in contesti di crescita tendenzialmente più ostili, che possono comportare la mortalità degli stessi.

Di contro, le matrici trasformate devono essere opportunamente caratterizzate, di volta in volta, per il contenuto di metalli. Sebbene le concentrazioni più alte di metalli pesanti siano comunque risultate inferiori al di sotto dei valori soglia consentiti per il compost, questo aspetto non è "scontato" per il percolato/the di lombrico ottenuto.

In particolare, la disponibilità di metalli pesanti nel vermicompost risulta essere inferiore rispetto alle matrici di partenza e al compost ottenuto da impianto: il lombrico facilita la loro trasformazione in frazione indisponibile attraverso il bioaccumulo e la stabilizzazione associata all'humus.

Quindi, la tecnologia di vermicompostaggio potrebbe amplificare la qualità dei nutrienti rispetto al compost tradizionale (e dunque il prodotto finale potrebbe essere considerato un ammendante più efficace) e può potenzialmente mitigare il rischio ambientale dei metalli pesanti per lo smaltimento dei rifiuti organici solidi. In ogni caso, la ricerca futura dovrebbe valutare gli impatti a lungo termine dell'applicazione sul terreno. ■

## Riferimenti bibliografici

- Abbasi S.A., Nayeem-Shah M., Abbasi T. (2015). Vermicomposting of phytomass: limitations of the past approaches and the emerging directions. *Journal of Cleaner Production* 93 (2015), 103-114.
- Adhikary S. (2012). Vermicompost, the story of organic gold: a review. *Agric. Sci.* 3, 905-917.
- Adi A. e Noor, Z. (2009). Waste recycling: utilization of coffee grounds and kitchen waste in vermicomposting. *Bioresour. Technol.* 100, 1027-1030.
- Arancon N.Q., Edwards C.A. (2011). The use of vermicomposts as soil amendments for production of field crops. In: Edwards, C.A., Arancon, N.Q., Sherman, R.L. (Eds.), *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management*. CRC Press, Boca Raton, 129-151.
- Corsino S.F., Torregrossa M., Viviani G. (2021). Biomethane production from anaerobic co-digestion of selected organic fraction of municipal solid waste (Ofmsw) with sewage sludge: Effect of the inoculum to substrate ratio (ISR) and mixture composition on process performances. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Volume 18, Issue 24, Article number 13048.
- Ebrahimi A., Hashemi H., Eslami H., Fallahzadeh R.A., Khosravi R., Askari R., Ghahramani E. (2018). Kinetics of biogas production and chemical oxygen demand removal from compost leachate in an anaerobic migrating blanket reactor. *J. Environ. Manag.* 206, 707-714.
- Edwards C.A., Norman Q.A., Sherman R. (2011). *Vermiculture Technology, Earthworms, Organic Waste and Environmental Management*. CRC Press, 17-19.
- Eslami H., Ehrampoush M.H., Esmaeili A., Ebrahimi A.A., Salmani M.H., Ghaneian M.T., Falahzadeh H. (2018). Efficient photocatalytic oxidation of arsenite from contaminated water by Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite under UVA radiation and process optimization with experimental design. *Chemosphere* 207, 303-312.
- Feller C., Brown G.G., Blanchart E., Deleporte P., Cheryyanskii S.S. (2003). Charles Darwin, earthworms and natural sciences: various lessons from past to future. *Agric. Ecosyst. Environ.* 99, 29-49.
- Furlong C., Rajapaksha N.S., Butt K.R., Gibson W.T. (2017). Is composting worm availability the main barrier to large-scale adoption of worm-based organic waste processing technologies? *Journal of Cleaner Production* 164, 1026-1033.
- García-Sánchez M., Tausnerova H., Hanc A., Tlustos P. (2017). Stabilization of different starting materials through vermicomposting in a continuous-feeding system: changes in chemical and biological parameters. *Waste Manag.* 62, 33-42.
- Gomez-Brand M., Martínez-Cordeiro H., Domínguez J. (2021). Changes in the nutrient dynamics and microbiological properties of grape marc in a continuous-feeding vermicomposting system. *Waste Management* 135, 1-10.
- Gupta R., Garg V. (2008). Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting. *J. Hazard. Mater.* 153, 1023-1030.
- Hait S., Tare V. (2012). Transformation and availability of nutrients and heavy metals during integrated composting-vermicomposting of sewage sludges. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 79, 214-224.
- Hu X., Zhang T., Tian G., Zhang L., Bian B. (2021). Pilot-scale vermicomposting of sewage sludge mixed with mature vermicompost using earthworm reactor of frame composite structure. *Science of the Total Environment* 767 (2021) 144217.
- Kang J., Zhang Z., Wang J.J. (2011). Influence of humic substances on bioavailability of Cu and Zn during sewage sludge composting. *Bioresour. Technol.* 102, 8022-8026.
- Khwairakpam M. e Bhargava R. (2009). Vermitechnology for sewage sludge recycling. *J. Hazard. Mater.* 161, 948-954.
- Kumar V.V., Shanmugaprasanth M., Aravind J., Namasivayam S.K.R. (2012). Pilot scale study of efficient vermicomposting of agro-industrial wastes. *Environ. Technol.* 33, 975-981.
- Lazcano C., Gomez-Brand M., Domínguez J. (2008). Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere* 72, 1013-1019.
- Lim S.L., Lee L.H., Wu T.Y. (2016). Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *J. Clean. Prod.* 111, 262-278.
- Lukkari T., Teno S., Väisänen A., Haimi J. (2006). Effects of earthworms on decomposition and metal availability in contaminated soil: microcosm studies of populations with different exposure histories. *Soil Biol. Biochem.* 38, 359-370.
- Ngo P.T., Rumpel C., Dignac M.F., Billou D., Duc T.T., Jouquet P. (2011). Transformation of buffalo manure

- by composting or vermicomposting to rehabilitate degraded tropical soils. *Ecol. Eng.* 37, 269–276.
- Oluseyi E.E., Ewemoje T., Adedeji A. (2016). Comparative analysis of pit composting and vermicomposting in a tropical environment. *Agric. Biosyst. Eng.* 731, 39757.
  - Padmavathiamma P.K., Li L.Y., Kumari U.R. (2008). An experimental study of vermibowaste composting for agricultural soil improvement. *Bioresour. Technol.* 99, 1672–1681.
  - Pigatin L.B.F., Atoloye I.A., Obikoya O.A., Borsato A.V., Rezende M.O.O. (2016). Chemical study of vermicomposted agroindustrial wastes. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agric.* 5, 55–63.
  - Pramanik P. e Chung, Y.R. (2011). Changes in fungal population of fly ash and vinasse mixture during vermicomposting by *Eudrilus eugeniae* and *Eisenia fetida*: documentation of cellulase isozymes in vermicompost. *Waste Manag.* 31, 1169–1175.
  - Qian X., Shen G., Wang Z., Guo C., Liu Y., Lei Z., Zhang Z. (2014). Co-composting of livestock manure with rice straw: characterization and establishment of maturity evaluation system. *Waste Manag.* 34, 530–535.
  - Rupani P.F., Embrandiri A., Ibrahim M.H., Shahadat M., Hansen S.B., Mansor N.N.A. (2017). Bioremediation of palm industry wastes using vermicomposting technology: its environmental application as green fertilizer. *3 Biotech* 7, 155.
  - Sanchez-Monedero M.A., Serrami N., Civantos C.G.-O., Fernandez-Hernandez A., Roig A. (2010). Greenhouse gas emissions during composting of two-phase olive mill wastes with different agroindustrial by-products. *Chemosphere* 81, 18–25.
  - Singh J., Kalamdhad A.S. (2012). Concentration and speciation of heavy metals during water hyacinth composting. *Bioresour. Technol.* 124, 169–179.
  - Singh J., Kalamdhad A.S. (2012). Concentration and speciation of heavy metals during water hyacinth composting. *Bioresour. Technol.* 124, 169–179.
  - Singh J., Kalamdhad A.S. (2013). Assessment of bioavailability and leachability of heavy metals during rotary drum composting of green waste (Water hyacinth). *Ecol. Eng.* 52, 59–69.
  - Song X., Liu N., Wu D., Qi L., Ye C., Jiao J., Hu F. (2014). Heavy metal and nutrient changes during vermicomposting animal manure spiked with mushroom residues. *Waste Management* 34 (2014) 1977–1983.
  - Suthar S., 2010. Recycling of agro-industrial sludge through vermitechnology. *Ecol. Eng.* 36, 1028–1036.
  - Suthar S., Singh S. (2008). Feasibility of vermicomposting in biostabilization of sludge from a distillery industry. *Sci. Total. Environ.* 394, 237–243.
  - Suthar S. e Singh S. (2008). Feasibility of vermicomposting in biostabilization of sludge from a distillery industry. *Sci. Total. Environ.* 394, 237–243.
  - Tauseef S.M., Abbasi T., Banupriya D., Vaishnavi V., Abbasi S.A. (2013). HEVSPAR: a novel vermireactor system for treating paper waste. *Off. J. Pat. Off.* 24, 12726.
  - Thiruneelakandan R. e Subbulakshmi G. (2014). Vermicomposting: a superlative for soil, plant, and environment. *Int J Innov Res Sci Engg Technol* 3, 930e938. Available online at: <http://www.rroij.com/peer-reviewed/vermicomposting-a-superlative-for-soil-plantand-environment-51236.html>
  - Violante P. (2000). *Metodi di analisi chimica del suolo*. Editore: Franco Angeli Collana: Metodi analitici per l'agricoltura Data di Pubblicazione: 1 luglio 2000 ISBN: 8846422406.
  - Walter I., Martinez F., Cala V. (2006). Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses. *Environ. Pollut.* 139, 507–514.
  - Wong J. e Selvam A. (2006). Speciation of heavy metals during co-composting of sewage sludge with lime. *Chemosphere* 63, 980–986.
  - Yadav A. e Garg, V., 2011. Recycling of organic wastes by employing *Eisenia fetida*. *Bioresour. Technol.* 102, 2874–2880.
  - Yadav K.D., Tare V., Ahammed M.M. (2010). Vermicomposting of source-separated human faeces for nutrient recycling. *Waste Manag.* 30, 50–56.
  - Zheng G.D., Gao D., Chen T.B., Luo W. (2007). Stabilization of nickel and chromium in sewage sludge during aerobic composting. *J. Hazard. Mater.* 142, 216–221.

## Ringraziamenti

Gli autori vogliono ringraziare l'azienda CONITALO (CONSORZIO ITALIANO ALLEVATORI DI LOMBRICHI) per il continuo supporto e i suggerimenti nella gestione delle vermicompostiere e dei lombrichi inoculati.

# IL RIUTILIZZO DELLE ACQUE REFLUE AFFINATE: L'ITALIA È PRONTA A RECEPIRE IL REGOLAMENTO (UE) 2020/741?

**Geneve Farabegoli**

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), Dipartimento per la valutazione, i controlli e la sostenibilità ambientale, Roma, Italia.

## Sommario

L'articolo si pone l'obiettivo di analizzare lo stato del riutilizzo delle acque reflue in Italia, considerando l'ormai prossimo recepimento del nuovo Regolamento (UE) 2020/741 che definisce le prescrizioni minime per il riutilizzo dell'acqua ai fini irrigui in agricoltura e che è fondamentalmente basato sull'analisi di gestione del rischio.

Partendo dall'analisi della normativa vigente e dalle forti limitazioni al riutilizzo dell'acqua ad oggi ancora esistenti, nonostante le sue enormi potenzialità, si illustrano i principali punti del Regolamento e ci si pone l'interrogativo se il paese sia o meno pronto per una sua piena attuazione.

Si evidenziano quindi gli ostacoli ancora presenti al riutilizzo sia dal punto di vista tecnico ma anche economico-finanziario, di governance e di diffidenza dei distributori e consumatori.

Si conclude con alcuni spunti di riflessione sull'enorme opportunità da non perdere per poter contribuire concretamente al risparmio della risorsa idrica, alla salvaguardia dell'ambiente e per tendere efficacemente verso l'economia circolare.

**Parole chiave:** *economia circolare, gestione del rischio, irrigazione agricola, risorsa idrica, riutilizzo.*

## THE REUSE OF TREATED WASTEWATER: IS ITALY READY TO ADOPT THE REGULATION (EU) 2020/741?

### Abstract

This paper aims to examine the state of the art of the wastewater reuse in Italy, taking into account the imminent adoption of the new Regulation (EU) 2020/741 which defines the minimum requirements for water reuse for agricultural irrigation and that is basically based on a risk management approach. The paper describes the key points of the Regulation starting with the analysis of the legislation in force and the strong limitations on reuse still existing today despite its enormous potential and raises the question whether the country is ready for its full implementation. Several obstacles to be overcome for an effective water reuse are highlighted: technical, economic and financial issues as well as governance problems and mistrust from water distributors and product consumers. The conclusions are focused on the enormous opportunity not to be missed to effectively contribute to water resource saving, to the environment protection and to move towards to the circular economy.

**Keyword:** *agriculture irrigation, circular economy, reuse, risk management, water resource.*

## 1. Introduzione

Negli ultimi anni le pressioni sulle risorse idriche hanno comportato una maggiore attenzione verso l'utilizzo di fonti idriche alternative come opzione strategica per integrare le risorse presenti e proteggere quelle naturali. Le sempre più imprevedibili condizioni meteorologiche e la crisi idrica hanno messo in luce la gravità di una situazione ancora lontana dall'essere risolta, inserita nella più ampia questione dei cambiamenti climatici (Nazioni Unite, 2023).

In questo contesto si capisce quanto sia importante, anzi decisivo, preservare il più possibile la risorsa acqua. Una sfida che passa anche dal recupero e dal riutilizzo delle acque reflue.

Il riutilizzo dell'acque reflue affinate, come fonte idrica alternativa, infatti può fornire significativi benefici economici, sociali e ambientali, fattori chiave per l'attuazione dei programmi di riutilizzo (EPA, 2012).

Questi benefici includono una maggiore disponibilità di acqua con un uso integrato e sostenibile delle

IdA



Per contatti: Via Vitaliano Brancati 48, 00144 Roma, Italia.  
Tel 06.50072166. geneve.farabegoli@isprambiente.it

Ricevuto il 28-2-2023; Correzioni richieste il 28-3-2023;  
accettazione finale il 30-3-2023

risorse idriche, la riduzione dell'eccessivo prelievo di acque superficiali e sotterranee e conseguentemente anche un consumo energetico ridotto rispetto all'utilizzo di risorse idriche convenzionali.

Inoltre, il riutilizzo comporta un minor carico di nutrienti verso i corpi idrici ricettori e la riduzione dell'applicazione di fertilizzanti, l'aumento della produzione agricola, una maggiore protezione ambientale mediante il ripristino di corsi d'acqua, zone umide, stagni ed in generale aumento dell'occupazione e dell'economia locale.

### 1.1. Riutilizzo delle acque reflue affinate in Europa

In Europa i sistemi di affinamento dell'acqua, in grado di trattare le acque reflue per un loro riutilizzo finale, si trovano più che altro nelle aree costiere e nelle isole (nei paesi meridionali) e nelle aree densamente popolate (nei paesi del nord Europa). L'acqua affinata viene principalmente utilizzata per l'irrigazione agricola e per usi urbani e industriali.

L'irrigazione agricola rappresenta di gran lunga l'ambito maggiore di utilizzo dell'acqua a livello mondiale ed a livello europeo, ove rappresenta, nel complesso, circa un quarto del totale dell'acqua dolce prelevata (UN Report, 2017; Rebelo *et al.*, 2018). Il potenziale di riutilizzo dell'acqua reflua affinata in agricoltura è molto alto e potrebbe contribuire ad alleviare la scarsità d'acqua in Europa (Voulvoulis, 2018).

Dalle stime effettuate da Bixio e Wintgens (2006), la Spagna mostra il potenziale di riutilizzo di gran lunga più alto (1.200 Mm<sup>3</sup>/anno) seguita dall'Italia e dalla Bulgaria (ognuna con 500 Mm<sup>3</sup>/anno), dalla Turchia (287 Mm<sup>3</sup>/anno), la Germania (144 Mm<sup>3</sup>/anno), la Francia (112 Mm<sup>3</sup>/anno), il Portogallo (67 Mm<sup>3</sup>/anno) e la Grecia (57 Mm<sup>3</sup>/anno) solo per citare i primi paesi.

Complessivamente, i dati suggeriscono un potenziale di riutilizzo dell'acqua al 2025 pari a 6.000 Mm<sup>3</sup>/anno (Deloitte, 2015; Jeffrey *et al.*, 2018).

Diversi Stati membri e regioni autonome hanno elaborato un proprio quadro legislativo, regolamenti o linee guida per le applicazioni del riutilizzo delle acque reflue affinate. In particolare, Cipro, Grecia, Spagna, Francia, Italia e Portogallo hanno prodotto gli standard più completi sviluppati specificamente per le pratiche di riutilizzo dell'acqua.

### 1.2. Ostacoli al riutilizzo delle acque reflue affinate

Nonostante le applicazioni di riutilizzo delle acque già sviluppate in molti paesi, un certo numero di ostacoli impedisce ancora una sua diffusa applicazione su scala globale (Rebelo *et al.*, 2018). I principali impedimenti individuati sono:

- regolamenti/linee guida sul riutilizzo dell'acqua incoerenti o inadeguati, con conseguenti ritardi ed errori di valutazione;
- ostacoli commerciali nell'Unione Europea per prodotti agricoli irrigati con acqua affinata, dal momento che una volta sul mercato comune il livello di sicurezza adottato nei paesi produttori può non essere considerato sufficiente nei paesi importatori;
- metodi incoerenti e inaffidabili per identificare e ottimizzare le tecnologie di affinamento appropriate delle acque reflue che siano in grado di bilanciare le contemporanee esigenze di uso sostenibile dei processi;
- basso costo delle risorse idriche convenzionali se comparato a quello dell'acqua affinata in particolare e, secondariamente, alto costo del trattamento per la produzione di acqua adatta al riutilizzo;
- distanza tra gli impianti di trattamento delle acque e i siti nei quali l'acqua viene utilizzata;
- difficoltà di definizione e selezione di tecniche efficaci di monitoraggio e di tecnologie per l'intero sistema di produzione, stoccaggio, distribuzione e utilizzo;
- problematiche nel definire una valutazione attendibile dei rischi/benefici per la salute pubblica e ambientale del riutilizzo, su diverse scale geografiche;
- *business model* per sistemi di riutilizzo dell'acqua e mercati per l'acqua affinata poco sviluppati;
- scarsa propensione a livello pubblico e di governance verso il riutilizzo dell'acqua;
- limitata capacità delle istituzioni di formulare e riconoscere giuridicamente idonee misure per il riutilizzo;
- mancanza di incentivi finanziari per i sistemi di riutilizzo.

A questi si aggiungono ulteriori limiti all'applicazione individuati in Italia dall'ANBI, l'Associazione nazionale che rappresenta e tutela gli interessi dei Consorzi di bonifica e di miglioramento fondiario, quali:

- necessità di adeguamento tecnologico degli impianti e presenza di contaminanti emergenti;
- necessità di adeguamento infrastrutturale dovuto alla produzione continua delle acque reflue da affinare e gli usi discontinui delle acque affinate (specialmente in agricoltura);
- necessità di definire lo schema di riutilizzo gestendo la notevole complessità;
- *capacity building* per le autorità di controllo abitate finora a confrontarsi solo con valori soglia;
- strutturare una gestione partecipata;
- efficace campagna di educazione, informazione e *capacity building* per tutti gli attori coinvolti nella filiera, compresi i consumatori ed i brokers dell'agroalimentare;

- offerta potenzialmente insufficiente ed in competizione con altri settori, non premiante sul mercato, incentivi e finanziamenti pubblici per gli adeguamenti infrastrutturali largamente insufficienti;
- eccessiva burocratizzazione;
- insufficiente coinvolgimento dei portatori di interesse;
- non accettazione del rischio tollerabile e ritorno alla massima precauzione.

## 2. Normativa in Italia

In Italia, ad oggi, vige il Decreto Ministeriale n.185 del 12 giugno 2003 (DM 185/03) secondo il quale le destinazioni d'uso ammissibili delle acque reflue trattate sono irriguo, civile e industriale.

Le acque reflue destinate al riutilizzo irriguo o civile devono possedere, all'uscita dell'impianto di affinamento, requisiti di qualità chimico-fisici e microbiologici almeno pari a valori riportati nella tabella dell'allegato al DM 185/03. In caso di riutilizzo per destinazione d'uso industriale le parti interessate, invece, concordano limiti specifici in relazione alle esigenze dei cicli produttivi nei quali avviene il riutilizzo, nel rispetto comunque dei valori previsti per lo scarico in acque superficiali dalla tabella 3 dell'allegato 5 del D. Lgs n. 152/06.

In generale, il riutilizzo è previsto nei diversi Piani di Tutela delle Acque, tuttavia, una sua regolamentazione specifica è ancora oggi poco presente a livello regionale (ad eccezione di alcuni esempi virtuosi in regioni come la Lombardia, l'Emilia-Romagna, la Toscana, la Puglia e la Sardegna).

L'uso diretto per irrigazione attraverso reti dedicate è ancora piuttosto scarso: secondo l'indagine condotta da Utilitalia (2022) solo 16 impianti su 79 sono dotati di reti di distribuzione e solo 10 impianti usano tali reti per l'irrigazione. In 37 impianti dotati di sezione di affinamento, l'acqua prodotta è scaricata in corsi d'acqua quasi prevalentemente utilizzati a scopi irrigui nella forma, cioè, di irrigazione indiretta.

Gli impianti di affinamento presentano potenzialità molto variabili, evidenziando come siano disponibili tecnologie affidabili per tutte le esigenze. Ma a fronte di un quadro tecnologico ed innovativo confortante, il livello di effettiva diffusione di percorsi circolari nel settore idrico è scarso, sia per quanto riguarda il riutilizzo delle acque reflue che dei fanghi, spesso per la mancanza di normative, regolamenti e politiche incentivanti adeguate (Fatone, 2019).

A distanza di venti anni dalla sua emanazione, infatti, si può affermare che il DM 185/03 invece di incentivare il riutilizzo è stato fortemente penalizzante in quanto basato su un approccio *fit for all* con l'esclusiva applicazione dei valori limite contenuti in

una rigida tabella indipendentemente dalla tipologia di acque reflue da trattare e soprattutto degli utilizzatori finali delle acque trattate.

In pratica non viene effettuata un'analisi di gestione del rischio nel suo complesso.

## 3. Regolamento Europeo (UE) 2020/741

Il Regolamento (UE) 2020/741 del Parlamento europeo e del Consiglio, applicabile dal 26 giugno 2023, mira ad agevolare e incoraggiare la pratica del riutilizzo dell'acqua a fini irrigui in agricoltura rendendo il sistema alimentare dell'UE più sostenibile e resiliente e tutelando allo stesso tempo la salute pubblica e l'ambiente.

Esso stabilisce le prescrizioni minime per il riutilizzo dell'acqua ai fini irrigui in agricoltura, definendo una nuova filiera di gestione delle acque urbane depurate ed individuando gli attori coinvolti e le responsabilità al fine di garantire un utilizzo sicuro della risorsa. A tale scopo, viene sancito l'obbligo di adottare un piano di gestione dei rischi e un idoneo piano di monitoraggio tenendo conto delle realtà sito-specifiche in cui insistono l'impianto di affinamento, lo stoccaggio, la rete di distribuzione e l'utilizzatore finale.

Il Regolamento fornisce un'articolata definizione di uso irriguo in agricoltura, inoltre, prevede che gli Stati membri possano utilizzare le acque reflue affinate per ulteriori scopi quali il riutilizzo a fini civili, ambientali e industriali.

Le classi di qualità delle acque affinate nonché gli utilizzi e le tecniche di irrigazione consentiti per ciascuna classe sono elencati nella Tabella 1.

Le prescrizioni minime di qualità delle acque affinate destinate a fini irrigui in agricoltura sono indicate nella Tabella 2.

Vera novità del Regolamento è però l'approccio *fit for purpose* che per la prima volta viene applicato in una norma Europea. Sino ad oggi ci si era sempre attenuti al principio *fit for all* di massima precauzione senza tener conto della sua effettiva utilità e sostenibilità economica.

Si tratta di un concetto completamente nuovo e rivoluzionario, basato sulla valutazione del rischio il cui scopo è stimare e ridurre il rischio di possibili effetti negativi sulla salute pubblica e sull'ambiente.

Nella Comunicazione della Commissione Europea "Orientamenti a sostegno dell'applicazione del Regolamento (UE) 2020/741 recante prescrizioni minime per il riutilizzo dell'acqua" sono stati individuati 11 elementi principali, cosiddetti *Key elements of Risk Management* (KRM), che costituiscono la base dell'approccio proposto per un piano di gestione dei rischi (Figura 1).

**Tabella 1.** Classi di qualità delle acque affinate e tecniche di irrigazione e utilizzi agricoli consentiti

Classe minima di qualità delle acque affinate	Categoria di coltura (*)	Tecniche di irrigazione
A	Tutte le colture alimentari da consumare crude la cui parte commestibile è a diretto contatto con le acque affinate e le piante da radice da consumare crude	Tutte
B	Colture alimentari da consumare crude la cui parte commestibile è prodotta al di sopra del livello del terreno e non è a diretto contatto con le acque affinate, colture alimentari trasformate e colture non alimentari, comprese le colture utilizzate per l'alimentazione di animali da latte o da carne	Tutte
C	Colture alimentari da consumare crude la cui parte commestibile è prodotta al di sopra del livello del terreno e non è a diretto contatto con le acque affinate, colture alimentari trasformate e colture non alimentari, comprese le colture utilizzate per l'alimentazione di animali da latte o da carne	Irrigazione a goccia (**) o altra tecnica di irrigazione che eviti il contatto diretto con la parte commestibile della coltura
D	Colture industriali, da energia e da sementi	Tutte le tecniche di irrigazione (***)

(\*) Se lo stesso tipo di coltura irrigata rientra in più categorie della tabella 1, si applicano le prescrizioni della categoria più rigorosa.  
(\*\*) L'irrigazione a goccia (o irrigazione localizzata) è un sistema di microirrigazione capace di somministrare acqua alle piante sotto forma di gocce o di sottili flussi d'acqua. L'acqua viene erogata a bassissima portata (2-20 litri/ora) sul terreno o direttamente al di sotto della sua superficie da un sistema di tubi di plastica di piccolo diametro dotati di ugelli denominati "emettitori" o "gocciolatori".  
(\*\*\*) Nel caso di tecniche di irrigazione che imitano la pioggia, occorre prestare particolare attenzione alla protezione della salute dei lavoratori e degli astanti. A tal fine si devono porre in essere le adeguate misure preventive.

**Tabella 2.** Prescrizioni di qualità delle acque affinate a fini irrigui in agricoltura

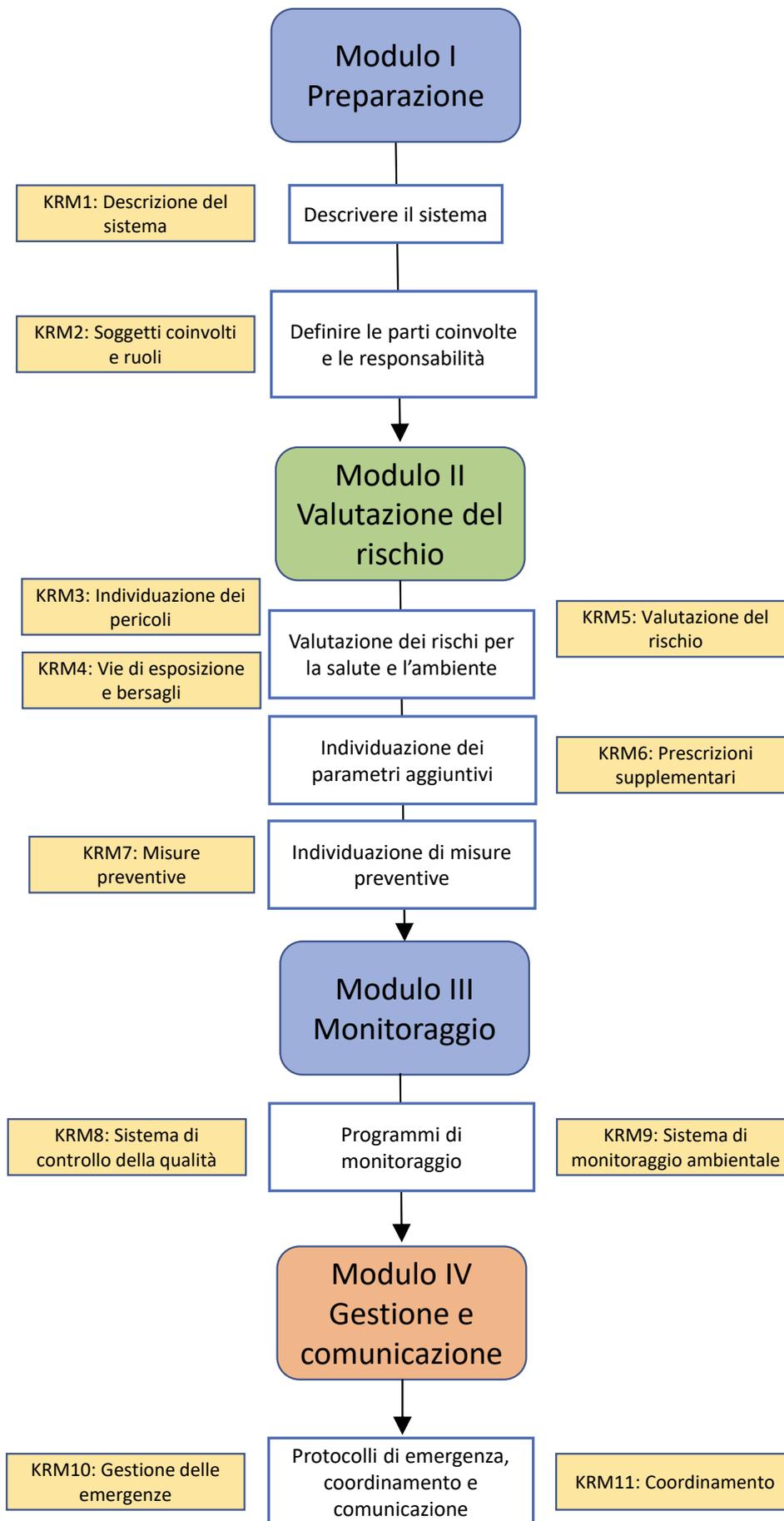
Classe di qualità delle acque affinate	Obiettivo tecnologico indicativo	Prescrizioni di qualità				
		E.coli (numero/100 ml)	BOD <sub>5</sub> (mg/l)	TSS (mg/l)	Torbidità (NTU)	Altro
A	Trattamento secondario, filtrazione e disinfezione	≤ 10	≤ 10	≤ 10	≤ 5	Legionella spp: < 1000 ufc/l se vi è rischio di diffusione per via aerea Nematodi intestinali (uova di elminti): ≤ 1 uovo/l per irrigazione di pascoli o colture da foraggio
B	Trattamento secondario e disinfezione	≤ 100	In conformità della direttiva 91/271/CEE (allegato I, tabella 1)	In conformità della direttiva 91/271/CEE (allegato I, tabella 1)	-	
C	Trattamento secondario e disinfezione	≤ 1000			-	
D	Trattamento secondario e disinfezione	≤ 10000			-	

Nello specifico il Regolamento definisce i seguenti aspetti: gli obblighi del gestore degli impianti di affinamento; i criteri di gestione dei rischi connessi al riutilizzo dell'acqua; gli obblighi concernenti il permesso per quanto riguarda le acque affinate; le modalità di verifica della conformità rispetto alle condizioni indicate nel permesso; le informazioni al pubblico e quelle relative al controllo dell'attuazione; le sanzioni.

La filiera, quindi, coinvolge sia il gestore dell'impianto di depurazione, che il gestore dell'impianto di affinamento (che possono essere coincidenti), che il gestore dello stoccaggio e della distribuzione e l'utente finale, ognuno con specifici obblighi da rispettare in termini di verifiche al punto di conformità, ovvero

al punto di cessione della risorsa dalla fase di propria competenza alla fase di gestione successiva.

Elemento chiave del Regolamento è l'analisi di rischio quale strumento necessario a definire le attività ordinarie di monitoraggio per verificare che le acque affinate siano conformi alle prescrizioni minime di qualità delle acque. L'analisi è finalizzata anche ad integrare, eventualmente, l'elenco dei parametri tabellati (quali E. coli, BOD<sub>5</sub>, TSS, torbidità, Legionella, Nematodi intestinali) includendone ulteriori sulla base delle specificità locali, delle caratteristiche della filiera di gestione delle acque reflue e dell'utilizzo finale previsto. Tra questi, ad esempio, sono da considerare anche metalli pesanti, sottoprodotti di disinfezione ed inquinanti emergenti, tra cui le microplastiche.



**Figura 1.** Principali elementi della gestione dei rischi connessi al riutilizzo dell'acqua (KRM), organizzati in quattro moduli per agevolare la formulazione di un piano di gestione dei rischi. Fonte: Comunicazione della Commissione Europea. Orientamenti a sostegno dell'applicazione del regolamento (UE) 2020/741 recante prescrizioni minime per il riutilizzo dell'acqua.

#### 4. Recepimento del Regolamento UE in Italia. Siamo pronti?

Dal punto di vista normativo, considerando le differenze tra il DM 185/2003 ed il Regolamento europeo, il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) ha recentemente elaborato la bozza di un nuovo Decreto del Presidente della Repubblica (DPR) al fine di superare la disciplina attualmente vigente e di rivedere l'intero impianto normativo di settore alla luce dell'introduzione del nuovo metodo della gestione del rischio sito specifico. Lo schema di DPR, infatti, da un lato recepisce e implementa la normativa europea e dall'altro definisce le regole per il riutilizzo delle acque reflue per scopi non solo irrigui ma anche civili e industriali. Una volta in vigore abrogherà quindi il citato DM 185/2003.

In particolare, il nuovo DPR si applica al trattamento e riutilizzo delle acque reflue urbane, domestiche e industriali (queste ultime con limiti ed esclusioni). Non è consentito, infatti, il riutilizzo per fini irrigui, civili e ambientali per le seguenti categorie di attività industriali, anche qualora presenti in consorzi industriali che afferiscono ad un unico depuratore/impianto di affinamento: a) Attività industriali che prevedono l'utilizzo nel proprio ciclo produttivo delle sostanze di cui alla Tab 3/A allegato V parte III del decreto legislativo n. 152 del 2006; b) Attività industriali che prevedono la produzione o l'utilizzo nel proprio ciclo produttivo di sostanze appartenenti agli elenchi di priorità di cui alla Tabella 1/A del decreto legislativo n. 172 del 2015, in particolare i gruppi riconducibili a IPA, PFAS e alofenoli; c) Attività industriali che prevedono la produzione o l'utilizzo nel proprio ciclo produttivo delle sostanze di cui al par. 2.1 allegato V, Parte III, del decreto legislativo n. 152 del 2006: composti organo alogenati; composti organo fosforici; composti organo stannici; sostanze che hanno potere cancerogeno, mutageno e teratogeno in ambiente idrico; mercurio e i suoi composti; cadmio e i suoi composti; oli minerali persistenti e idrocarburi di origine petrolifera persistenti; cianuri.

Il provvedimento definisce, inoltre, le modalità di richiesta dell'autorizzazione a produrre e consegnare acque affinate, le modalità di elaborazione del Piano di gestione del rischio (secondo l'approccio previsto dal Regolamento) che è condizione per l'autorizzazione, gli obblighi dei gestori degli impianti di affinamento e i loro rapporti con i gestori della distribuzione. Sono indicati anche i parametri fisico-chimici di qualità da rispettare in relazione ai diversi usi e i controlli di conformità a carico del gestore e dell'Autorità competente.

Dal punto di vista infrastrutturale, affinché il Regolamento possa essere correttamente applicato in Italia,

sarà necessario un adeguamento non solo delle reti di distribuzione delle acque affinate, ma anche dei sistemi di accumulo per i quali saranno da individuare adeguati sistemi di stoccaggio con capacità idonea in funzione del fabbisogno dell'area irrigua asservita. Risulta quindi evidente che la fattibilità tecnica e la sostenibilità economica del sistema sono da considerare non solo in base alle caratteristiche fisiche del territorio ma anche della tipologia impiantistica e della produttività delle colture da servire.

Un recente dossier (Beccari *et al.*, 2021) ha evidenziato come il riutilizzo diretto di acque reflue depurate e affinate potrà potenzialmente confliggere con altri usi, attualmente in essere soprattutto in alcune aree del Paese. Si cambierà la destinazione a correnti che al momento confluiscono prevalentemente in corpi idrici superficiali, contribuendo al mantenimento del deflusso minimo vitale o delle condizioni ottimali di alcune zone umide. Sarà, quindi, fondamentale considerare anche questi aspetti nella redazione del piano di gestione dei rischi.

Il Regolamento, infatti, si applica all'utilizzo diretto di acque reflue affinate e non prende in considerazione, al momento, quello indiretto cosiddetto *de facto reuse* o *unplanned reuse*, pratica che, purtroppo, risulta ampiamente esercitata in molte zone d'Italia nei luoghi dove i depuratori scaricano in canali o corpi idrici utilizzati a valle come derivazioni idriche per l'agricoltura e che certamente non può essere un modello da perseguire. A tal proposito il Regolamento stabilisce che, entro il 26 giugno 2028, la Commissione debba valutare la fattibilità di estendere le prescrizioni del Regolamento anche all'utilizzo indiretto di acque reflue trattate.

Infine, oltre all'aspetto quali-quantitativo della risorsa idrica, occorrerà garantire la sostenibilità economica della pratica di riutilizzo, limitando gli effetti dell'aumento dei costi per il comparto irriguo, legati ai maggiori fabbisogni infrastrutturali ed ai maggiori oneri in termini di gestione e controllo. E sarà necessario superare la diffidenza dei distributori e consumatori verso il consumo di prodotti irrigati con delle acque reflue non convenzionali. A tal fine efficaci campagne di sensibilizzazione saranno imprescindibili per sostenere il riutilizzo sicuro dell'acqua affinata in agricoltura.

#### 5. Conclusioni

L'applicazione del Regolamento (UE) 2020/741 ci impone un cambio di paradigma: dal principio *fit for all* di massima precauzione all'approccio *fit for purpose* basato sulla valutazione del rischio. E sarà proprio questo il perno della filiera del riutilizzo.

Nonostante gli sforzi che sono in essere e che saranno dedicati alla redazione e all'implementazione

di un nuovo DPR in grado di recepire il Regolamento europeo e allargarne il contesto anche alle altre tipologie di acque reflue da affinare per molteplici usi, rimane comunque la necessità di idonee linee guida atte a definire in maniera dettagliata e univoca delle metodologie da seguire per la conduzione delle analisi di rischio.

In particolare, sarà fondamentale la definizione di meccanismi condivisi in grado di garantire la sostenibilità economica delle iniziative di riutilizzo, l'attivazione di sistemi incentivanti a livello nazionale oltre che alla possibilità di accesso a risorse finanziarie comunitarie.

Altrettanto essenziale sarà la partecipazione di tutti gli *stakeholders* alla predisposizione e diffusione di buone pratiche e per la valutazione dell'effettivo potenziale di

riutilizzo delle acque reflue affinate su base territoriale, anche attraverso valutazioni incrociate relative alla disponibilità quali-quantitativa di acque reflue depurate e del relativo fabbisogno da parte degli utilizzatori finali, in particolare dei Consorzi di Bonifica.

Nonostante vi sia un interesse da parte delle imprese idriche a produrre acqua affinata ai fini irrigui, civili, ambientali e industriali, pare ancora presente una certa diffidenza, da parte di utenti potenziali, che dovrà progressivamente essere vinta anche attraverso l'attenta gestione del riutilizzo. Persiste un problema di governance ma i margini di crescita sono evidenti.

Il solo riutilizzo delle acque reflue non è sicuramente sufficiente a salvare l'ambiente ma il loro contributo è essenziale, a patto di mettere in atto un sistema virtuoso per la loro gestione. ■

## Riferimenti bibliografici

- Beccari M., Brunori C. Morabito R., Rolle E., Squitieri G., Toscano A., Trezzini F. (2021). Dossier ciclo dell'acqua ed economia circolare.
- Bixio D., Wintgens T. (2006). Water reuse system management manual Aquarec. Brussels, Belgium: Office for Official Publications of the European Communities, European Commission.
- Comunicazione della Commissione Europea. Orientamenti a sostegno dell'applicazione del Regolamento (UE) 2020/741 recante prescrizioni minime per il riutilizzo dell'acqua (2022/C 298/01).
- Deloitte (2015). Optimising water reuse in the EU – Public consultation analysis report prepared for the European Commission (DG ENV).
- DM 185 del 12/06/2003. Regolamento recante norme tecniche per il riutilizzo delle acque reflue in attuazione dell'articolo 26, comma 2, del decreto legislativo 11 maggio 1999, n. 152.
- EPA Guidelines for water reuse. EPA/600/R-12/618. September 2012
- Fatone F. (2019). L'economia circolare nella gestione del servizio idrico. *Ingegneria dell'Ambiente* Vol. 6 n. 1/2019.
- Jeffrey P., Raffin M., Pollice A., Poussade Y., Van Houtte E., Bacardit J., Le Corre K. (2018). Water Reuse Europe review 2018. Water Reuse Europe. ISBN: 978-1-5272-2364-6.
- Nazioni Unite (2023). Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2023: Partenariati e cooperazione per l'acqua. UNESCO, Parigi.
- Rebelo A., Farabegoli G., Andreotti F., Balmer J., Vella M., Van Tunen R., Gunput S., Perikenti S., Ece P. (2018). Report on Urban Water Reuse. IMPEL Project on Integrated Water Approach and Urban Water Reuse. Report adopted at IMPEL General Assembly on December 2018, Austria.
- Regolamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 maggio 2020 recante prescrizioni minime per il riutilizzo dell'acqua.
- UN (2017). The United Nations world water development Report 2017 – Wastewater, the Untapped Resource.
- Utilitalia (2022). Il Riuso in Italia: presentazione dell'indagine Utilitalia. Atti del Convegno Climate change e servizio idrico: la sfida del PNRR per un sistema efficiente e resiliente, Napoli, 11 luglio 2022.
- Voulvoulis N. (2018). Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 2018, 2:32-45.

## Ringraziamenti

Si ringrazia la dott.ssa Elena D'Iseppi per il lavoro di raccolta delle informazioni effettuato durante il tirocinio presso l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

# ACQUE AD USO UMANO E CONTAMINANTI UBIQUITARI: PFAS E BISFENOLO A, DAL TESTO DELLA NUOVA DIRETTIVA AI TEST DI LABORATORIO

Paola Verza<sup>1,\*</sup>, Francesca Faraon<sup>1</sup>, Alessio Mattiazzo<sup>1</sup>, Barbara Scantamburlo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mérieux NutriSciences Italia, Dipartimento Ambientale

## Sommario

I contaminanti emergenti presenti nelle acque ad uso umano costituiscono una sfida legislativa e analitica che ha come obiettivo primario la difesa della salute pubblica. In mancanza di metodi ufficiali condivisi il laboratorio si pone come osservatorio privilegiato e luogo di sperimentazione di nuovi metodi che forniscano risultati rappresentativi e comparabili.

**Parole chiave:** *contaminanti emergenti, acqua potabile, interferenti endocrini.*

## WATER FOR HUMAN USE: PFAS AND BISPHENOL A, FROM THE NEW DIRECTIVE (UE) 2020/2184 TO LAB TESTS

### Abstract

Emerging contaminants that can be found in water for human consumption pose a legislative and analytical challenge with the primary goal of defending public health. In the absence of shared official methods, the laboratory stands as a privileged observatory and a place for testing new methods that provide representative and comparable results.

**Keyword:** *emerging contaminants, drinking water, endocrine disruptors.*

## 1. Introduzione

La nuova Direttiva europea sulle acque ad uso umano 2020/2184 propone un approccio alla sicurezza dell'acqua potabile basato sul rischio, attraverso la caratterizzazione chimica, idrografica e geografica dei vari bacini idrografici, sia nei punti di estrazione che nel sistema distributivo.

La Direttiva, inoltre, affronta la questione dei contaminanti emergenti, sostanze scarsamente o per nulla normate in maniera armonizzata in Europa, ma che pongono serie preoccupazioni in termini di sicurezza a causa della loro presenza ubiquitaria e degli studi che ne confermano la pericolosità per la salute.

Tra questi vi sono i PFAS e il Bisfenolo A, entrambi precedentemente non normati e che pongono sfide impegnative sotto il profilo analitico, soprattutto per i nuovi limiti di rilevabilità imposti dalla Direttiva.

Non si tratta degli unici contaminanti emergenti posti sotto la lente di ingrandimento: la Decisione di esecuzione (UE) 2022/679 integra il controllo di altri composti che destano preoccupazione (già citate nella suddetta Direttiva Europea), quali il 17-betaestradiolo e nonilfenolo, determinando una ulteriore chiara evoluzione della normativa riguardante le acque destinate al consumo umano.

## 2. PFAS e Bisfenolo A

Riguardo i PFAS, la concentrazione attualmente prevista è: PFAS totali < 0,50 µg/l. La Commissione Europea stessa si dà il termine del 12 gennaio 2024 per stabilire le linee guida tecniche sui metodi analitici per quanto riguarda il monitoraggio delle sostanze per- e poli-fluoro-alchiliche comprese nei parametri «PFAS – totale» e «somma di PFAS», compresi i limiti di rilevabilità, i valori di parametro e la frequenza di campionamento. Nella Direttiva viene citato: “Per «PFAS – totale» si intende la totalità delle sostanze per- e po-

\* Via Castellana 118 A, 31023 Resana (TV) Italia.  
paola.verza@mxns.com

Ricevuto il 17-4-2023; Correzioni richieste il 2-5-2023;  
Accettazione finale il 4-5-2023.



li-fluoro alchiliche. Tale valore di parametro si applica esclusivamente dopo l'elaborazione di orientamenti tecnici per il monitoraggio di tale parametro in conformità dell'articolo 13, paragrafo 7. Gli Stati membri possono quindi decidere di utilizzare uno o entrambi i parametri «PFAS – totale» o «Somma di PFAS».

Ad oggi, infatti, esistono diverse tecniche di approccio all'analisi e, in caso di screening su molecole target definite, non c'è uniformità rispetto alla scelta delle stesse. In una famiglia di migliaia di molecole, si pone il problema di quali ricercare nell'acqua ad uso umano. Le liste utilizzate e proposte dai vari laboratori possono fare riferimento alle normative regionali, piuttosto che alle molecole che hanno destato maggiore preoccupazione nei siti oggetto di contaminazione; la stessa direttiva listando la "somma di PFAS" nell'allegato 3 indica che tali sostanze sono controllate quando la valutazione e gestione del rischio dei bacini idrografici conclude che vi è la probabilità che tali sostanze siano presenti in una determinata fornitura d'acqua.

Di fatto la nuova Direttiva del 2020 è il primo atto ufficiale europeo con il quale i PFAS vengono regolamentati fissando valori limite uguali per tutti gli stati membri; essi sono chiamati a recepirla nella legge nazionale, infatti in Italia il recente Decreto Legislativo

n° 18 del 23/02/2023 include la lista di PFAS indicata dalla Direttiva e inoltre amplia lo screening con alcuni dei PFAS di nuova generazione citati nella Legge Regionale Piemontese 25/2021 per gli scarichi in acque superficiali.

Riguardo il Bisfenolo A, questo è il primo ad essere incluso dalla Direttiva tra quelli appartenenti a un gruppo individuato di interferenti endocrini. Il valore di parametro basato sul rischio per la salute è pari a 2,5 µg/L. Si tratta di una sostanza chimica usata e ammessa per fabbricare plastiche e resine epossidiche. In particolare, tra i materiali a contatto con gli alimenti, è bandito nei biberon ma è ammesso dal Regolamento EU per la plastica a contatto alimentare 10/2011 con un limite di migrazione specifica di 0,05 mg di BPA per kg di prodotto alimentare.

Parliamo quindi di due categorie di composti considerati "utili" dall'industria per le loro proprietà, prodotti e utilizzati intenzionalmente per la fabbricazione di beni, che possono in maniera incontrollata e non intenzionale essere presenti in diversi comparti alimentari e ambientali, primo fra tutti l'acqua ad uso umano.

Si tratta per questi composti di un problema di ubiquità che potremmo meglio identificare con il termine "chemical mobility": la mobilità delle sostanze chimiche rilasciate nell'ambiente governa la loro



**Figura 1.** LC-MS/MS e HPLC MS/MS Orbitrap nei laboratori veneti di Mérieux NutriSciences Italia.

biodisponibilità per gli organismi e la loro ripartizione tra i comparti ambientali e rappresenta quindi un legame diretto tra inquinamento ambientale ed ecotossicità. Ciò che preoccupa inoltre, è anche l'effetto cumulativo dell'impatto di queste sostanze.

### 3. L'approccio all'analisi

Il laboratorio è un osservatorio privilegiato, soprattutto quando può valutare la presenza di questi contaminanti nei campioni di acqua provenienti da diverse parti d'Italia e da molti diversificati clienti. Lo è an-

cora di più se, vista l'estrema ubiquitarità e mobilità chimica di questi contaminanti, è in grado di testare la loro presenza anche negli alimenti e nei materiali a contatto con gli alimenti.

Nel settore alimentare sarà possibile, per esempio, concentrarsi sui PFAS indicati tra i più problematici secondo il recente emendamento della Direttiva EU 1881/2006, il Regolamento (UE) 2022/2388, valutando dati analitici sia in acqua che negli alimenti. Similmente il paragone potrà essere fatto su acque e alimenti per il bisfenolo A.

Attualmente non esiste una legislazione armonizzata che regolamenti la presenza nei PFAS nel packaging alimentare. Esistono due differenti regolamenti per gli alimenti e per le acque ad uso umano. Nell'attuale draft sugli alimenti i limiti arrivano anche a 0,1 mg/kg. È quindi lecito pensare che in tutti i comparti (alimentare, acque, packaging) sarà indispensabile ragionare su limiti e molecole, visto che l'origine stessa dei PFAS non intenzionalmente aggiunti in un comparto potrebbe derivare da un altro, quali, ad esempio, negli alimenti e nel packaging dall'acqua, o, al contrario, negli alimenti dal packaging e dall'acqua, e così via.

#### 4. Le metodiche analitiche in mancanza di un metodo condiviso

Lo standard è un riferimento che consente di basarsi su elementi comuni, che rende comparabile l'analisi, che garantisce dei punti fermi. In mancanza di questo, ci possono essere svantaggi e vantaggi legati alla scelta dei metodi, si devono fare magari, compromessi tra selettività e inclusività.

Per i PFAS, l'approccio con il metodo della cromatografia liquida con doppia spettrofotometria di massa (LC-MS/MS, Figura 1), può dare un vantaggio in termini di sensibilità e selettività, in quanto può aiutare a rilevare e quantificare con precisione i livelli di PFAS a bassa concentrazione. Si pone tuttavia il problema di quali molecole identificare in un panorama di contaminazione così ampio.

Altre tecniche danno un'indicazione della quantità totale di specie perfluorurate in un campione, ma non del tipo, e possono non tenere conto di alcuni precursori.

In alcuni casi le autorità locali hanno dato indicazioni sui metodi analitici da adottare. Ad esempio, in Veneto viene indicato il metodo ISO 25101:2009, con tecnica della cromatografia liquida ad alte prestazioni seguita da doppia spettrofotometria di massa (HPLC-MS/MS, Figura 1), che consente di rilevare concentrazioni fino a 1 ng/kg.

Il laboratorio è un osservatorio privilegiato di fronte a contaminazioni dell'acqua che possono influenzare anche altri comparti, come quello alimentare. È anche luogo di sperimentazione di metodi e può investire

sulla migliore delle tecnologie esistenti per arrivare a limiti di concentrazioni molto basse. Di fronte a contaminanti che pongono una sfida in termini di metodo di analisi, in cui l'Europa stessa nel legiferare si pone l'obiettivo futuro di condividere un metodo unitario idoneo (es. per il monitoraggio dei contaminanti ubiquitari in acqua), il laboratorio non può che cercare la strada che ritiene più affidabile e, appena individuato il metodo condiviso, orientarsi su quello, al fine di ottenere risultati rappresentativi e comparabili. ■

#### Riferimenti bibliografici

- Direttiva (UE) 2020/2184 del Parlamento europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2020 concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano.
- Decisione di esecuzione (UE) 2022/679 della Commissione del 19 gennaio 2022 che istituisce un elenco di controllo delle sostanze e dei composti che destano preoccupazione per le acque destinate al consumo umano a norma della direttiva (UE) 2020/2184 del Parlamento europeo e del Consiglio.
- McDonough Carrie A., Guelfo Jennifer L., Higgins Christopher P., 2019. Measuring total PFASs in water: The tradeoff between selectivity and inclusivity. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 7: 13-18.
- Schema di decreto legislativo recante attuazione della direttiva (UE) 2020/2184 concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano (Parere ai sensi degli articoli 1 e 21 della legge 4 agosto 2022, n. 127).
- Regolamento (UE) 2022/2388 della Commissione del 7 dicembre 2022 che modifica il regolamento (CE) n. 1881/2006 per quanto riguarda i tenori massimi di sostanze perfluoroalchiliche in alcuni prodotti alimentari.
- Regione Piemonte, Legge regionale 25/2021 e Deliberazione della Giunta Regionale del 14 giugno 2022, n. 60-5220.
- Regolamento (UE) n. 10/2011 della commissione del 14 gennaio 2011 riguardante i materiali e gli oggetti di materia plastica destinati a venire a contatto con i prodotti alimentari.

#### Ringraziamenti

Questo articolo è stato redatto a partire dal contributo presentato a Remtech Europe 2022, che si è svolto il 19-23 settembre 2022 a Ferrara. L'edizione 2023 del convegno si terrà il 18-22 settembre 2023 a Ferrara. Per maggiori informazioni e dettagli <https://www.remtechexpo.com/en/remtech-europe>

## SONDE E APPARECCHIATURE DA CAMPO CID PER RILEVARE: COD, SST, TENSIOATTIVI, VOLUME E VELOCITÀ DI SEDIMENTAZIONE DEI FANGHI

Ing. Arcangelo Ventura<sup>1</sup>, Ing. Davide Ventura<sup>2</sup>, Ing. Carlo Ventura<sup>3</sup>

<sup>1</sup> A.D. CID

<sup>2</sup> Responsabile R&D

<sup>3</sup> Responsabile tecnico

Il Cid Ing Ventura Srl opera nel settore della depurazione delle acque reflue da oltre 40 anni attraverso la progettazione e fornitura chiavi in mano di impianti di depurazione e i servizi di gestione degli impianti, grazie alle sonde e ai sistemi di telecontrollo di propria produzione. L'esperienza maturata nel campo della depurazione ha permesso di realizzare sistemi di rilevazione da campo CID, coperti da Brevetto Europeo, costituiti dalle sonde e apparecchiature per la rilevazione in continuo di diversi parametri: [ppm] COD, Solidi Sospesi, Tensioattivi, e il misuratore del Volume [cc/l] e Velocità di sedimentazione dei fanghi [m/h].

Nel presente articolo presentiamo più in dettaglio i nostri sistemi che sono particolarmente indicati nella gestione e nel telecontrollo degli impianti per la versatilità, robustezza e assenza di manutenzio-

ne, dovuta ai componenti utilizzati, alla struttura delle sonde in acciaio inox, e al sistema di pulizia pneumatica automatica particolarmente efficiente.

Le Sonde CID funzionano collegandole alle apparecchiature CID nei modelli Mini, che produciamo da oltre 20 anni e nel nuovo sistema **smartCID**.

### SONDA inoxCID mod. TE

Per rilevazione in continuo ogni 2 sec. nell'acqua tal quale della concentrazione dei Tensioattivi Totali nel range: 0,5- 70 ppm.

Il funzionamento prevede il collegamento alla apparecchiatura CID nei modelli Mini (prodotto da oltre 20 anni) e nel nuovo sistema smartCID.

### Principio di misurazione

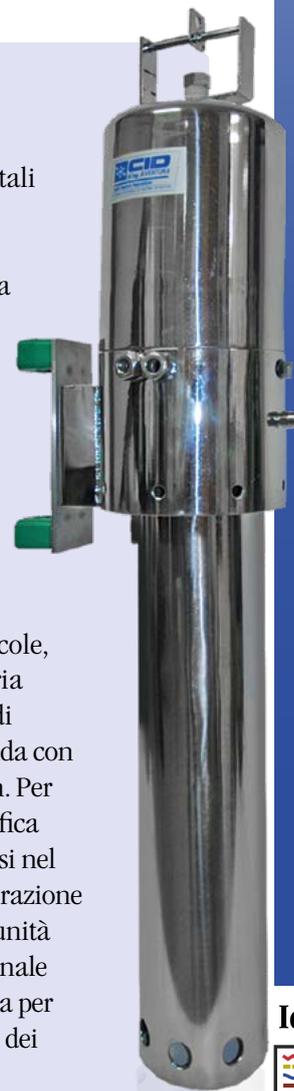
La sonda CID mod. TE è indicata per rilevare i tensioattivi con potere schiumogeno che diminuiscono la tensione superficiale delle molecole, per cui si formano bolle piene d'aria cioè schiuma. La concentrazione di tensioattivi totali rilevata dalla sonda con la curva di default va da 0,5 a 8ppm. Per valori superiori è necessaria la verifica preliminare. La schiuma formata nel reattore passa nel vetrino di misurazione attraversato dall'infrarosso dell'unità analogica che ne trasmette il segnale al programma CID che lo elabora per fornire la concentrazione in ppm dei tensioattivi.

### SONDA inoxCID mod. CODout

È particolarmente indicata per il controllo dell'acqua depurata in uscita da impianti di depurazione con trattamento biologico.

La sonda immersa nell'acqua rileva in continuo i seguenti parametri: COD, SST (Solidi sospesi totali), BOD5.

Il funzionamento prevede il collegamento alla apparecchiatura CID nei modelli Mini (prodotto da oltre 20 anni) e nel nuovo sistema smartCID.



## Sistema smartCID



Sonda  
CODout



Apparecchiatura  
smartCID  
per Sonde CID



Sonda TE  
Tensioattivi



Misuratore fanghi  
Vf30

### Caratteristiche sistema smartCID

Il nuovo sistema smartCID, composto da apparecchiature e sonde, è stato ideato come sistema di controllo sviluppato sulla nuova piattaforma CID open-source che permette di integrare tecnologie eterogenee come sonde, sensori, dispositivi di automazione industriale, telecamere e il Web per la condivisione dei dati.

### Misuratore fanghi smartCID Vf30

*per rilevare in automatico  
la quantità di fango [cc/l]  
e la velocità di sedimentazione [m/h]*

#### Generalità

Nella gestione degli impianti di depurazione biologica uno dei parametri rilevato saltuariamente e manualmente dagli addetti alla gestione è il **Vf30** [cc/l] cioè la quantità di fango prelevato in ossidazione che sedimenta dopo 30min in cilindro o cono da 1lt. Il dato permette di stabilire quando inviare i fanghi di supero in eccesso nel processo depurativo e di indicarne la quantità più probabile da smaltire.

L'importanza del Vf30 oltre che processuale è economica poiché il trattamento e smaltimento dei fanghi di supero rappresenta mediamente il 35% dei costi gestionali dell'impianto.

A tale scopo il CID ING VENTURA SRL di Brescia ha messo a punto e brevettato la nuova apparecchiatura **smartCID Vf30** per la rilevazione automatica della quantità e velocità di sedimentazione dei fanghi basata su una complessa elaborazione delle immagini scattate dalla telecamera sul cilindro da 1.000cc, riempito con la miscela di fango che giunge in sedimentazione, eseguita sulla media di tre linee di pixel definite da 0cc a 1.000cc.

Il misuratore fanghi smartCID Vf30 è indicato sia nei processi biologici che chimico-fisici di flocculazione poiché i tempi per Vf, Vsed1, Vsed2 sono impostabili dall'utente nella tabella di configurazione.

È composto da due armadi in termoresina IP65 assemblati e provvisti dei componenti necessari. Alimentando a 220V si avvia automaticamente il ciclo composto dalle fasi: carico, intervalli Vsed1 e Vsed2 per

# Sonde da campo per rilevazione in continuo

Interfaccia SmartCID per l'invio automatico dei dati registrati e visualizzati su pc, smartphone e tablet.

## SONDA TENSIOATTIVI

Per la rilevazione automatica in continuo di ppm Tensioattivi



SONDA TENSIOATTIVI

## SONDA COD OUT

Per rilevazione automatica in continuo di:  
ppm Solidi sospeso totali  
ppm BOD5, COD, Torbidità



SONDA COD OUT

## VF30 FANGHI

Misura automatica del volume dei fanghi [cc/1] e velocità di sedimentazione [m/h]

Brevetto 2021 n. 102021000028064

**NOVITA'**



VF30 FANGHI

dal 1979

 **CID**  
Ing. VENTURA srl

la velocità di sedimentazione [m/h], l'intervallo per determinare il Vf30 [cc/l], scarico. Al termine del ciclo i dati vengono visualizzati sul display e con gli allarmi salvati sulla memoria microSD e inviati sia sul **database** del server che su **Telegram** impostati dal cliente, per renderli disponibili su **pc, smartphone, tablet** in modo semplice e immediato.

L'immagine del fango sedimentato nel cilindro risulta importantissima poiché con i dati Vf30[cc/l] e Vsed [m/h] indica la qualità del fango (se ben sedimentato o rotto a zone) determinante nel caso di disfunzioni tipo bulking, permettendo di intervenire subito sui parametri di processo.

Aperto Telegram e cliccando sul gruppo impostato si visualizzano l'immagine del cilindro graduato col fango sedimentato, data e ora della rilevazione, i valori del volume di fango Vf30 [cc/l] e della velocità di sedimentazione [m/h], potendo inoltre scorrere lo storico delle immagini e dei dati rilevati. Telegram è stato scelto per smartCID perché grazie ai bot (programmi automatizzati che svolgono funzioni definite) permette di ricevere i dati e le immagini su qualsiasi dispositivo; è una delle app di messaggistica istantanea tra le più utilizzate al mondo grazie alla sua stabilità, sicurezza e facilità di utilizzo, è disponibile sia per iOS che per Android oltre ad avere una componente web molto utile che permette di utilizzarlo da desktop.

### Apparecchiatura CID mod. MINI

L'apparecchiatura CID mod. Mini, che produciamo da oltre 20 anni, permette il collegamento sia delle sonde inoxCID CODout e TE che qualsiasi altro sensore oltre alle macchine presenti nell'impianto, consentendone il telecontrollo completo. È composta da armadio in termoresina per posizionamento a parete completo di PC industriale con Lcd 10" TFT con funzione touch-screen, barra alimentazione, moduli I/O.

Le sonde sono collegate alla morsettiera con il cavo speciale CID.

Alimentando a 220V. e collegando le sonde e le macchine la MINI inizia subito la rilevazione in continuo ogni 2 sec. dei parametri, registrando ad intervalli di tempo prefissati a piacere il dato rappresentativo di ogni intervallo, e ad ogni ora lo stato macchine.

Il programma Depura web permette di rilevare in continuo i parametri e lo stato delle macchine collegate e permette il telecontrollo via rete Ethernet o protocollo ftp per internet. Via ftp invia al server i files di dati grafici ed allarmi registrati; tali dati saranno acquisiti ogni minuto automaticamente dai pc di sorveglianza abilitati dotati del programma Accentra web.

L'utente può impostare a piacere le soglie di allarme, scaricare i dati e i grafici in Excel o sfruttare le potenzialità del telecontrollo. ■



**CID Ing. Ventura Srl**  
 BRESCIA, Tel. 0303730699  
 E-mail: [info@venturacid.it](mailto:info@venturacid.it)  
 Web: [www.venturacid.it](http://www.venturacid.it)

## IL TRATTAMENTO E RECUPERO DI SOLVENTI IDROCARBURICI NELLE ACQUE REFLUE INDUSTRIALI FARMACEUTICHE CON ESTRAZIONE A POLIMERI MACRO POROSI (MPPE)

**Luca Pigat**

Business Developer & Sales per il mercato farmaceutico



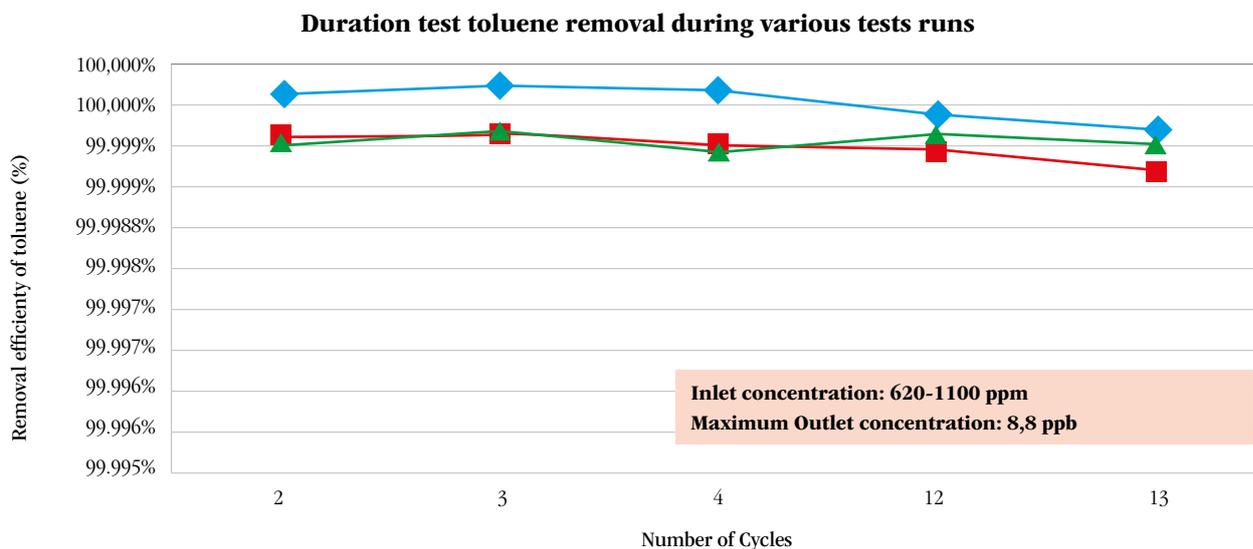
*MPPE (Macro porous polymer extraction) è la tecnologia di Veolia Water Technologies per la rimozione di idrocarburi dalle acque reflue delle industrie farmaceutiche.*

Per i Manager HSE, gli **impianti di trattamento delle acque reflue (WWTP) delle industrie farmaceutiche** sono oggi sempre più considerati una **nuova risorsa di utilities e sottoprodotti**; non sono più solo impianti end-pipe di trattamento di scarti di produzione prima dello smaltimento, ai quali prestare attenzione solo per attività di manutenzione

finalizzate alla conformità ai limiti di scarico. Le acque reflue farmaceutiche sono complesse e diverse da produzione a produzione, in termini **quantitativi** e di **frequenza** (possono essere prodotte in modo continuativo o in batch) e **qualitativi** (più o meno degradabili). Spesso viene proposto anche un **audit** del



**Figura 1.** MPPE MicroUnit per prove pilota in scala in laboratorio.



solo WWTP, per sezionare l'impianto, a scopo di indagine delle sorgenti di tossicità, ed infine per identificare in quali sezioni intervenire con azioni di miglioramento del trattamento già esistente; ad integrazione, si eseguono **prove di laboratorio su campioni compositi o impianti pilota** in scala ridotta per verificare poi che la filiera di trattamento identificata sia quella più ottimizzata ed efficiente.

Ad esempio, per la tossicità dei reflui dovuta ad alcuni composti, a residui di API, o di solventi usati in produzione e nella sintesi, i responsabili di impianti sono sempre alla ricerca di **tecnologie migliorative per upgrade dell'impianto esistente**, per evitare fuori limiti, o per il recupero delle acque, e quindi il minor consumo di ulteriore acqua da pozzo o fornitura da acquedotto. Chiaramente, gli spazi sono spesso ridotti, ed i consumi energetici anche devono essere contenuti, meglio se minori degli attuali.

La presenza di idrocarburi in produzione dipende dalle caratteristiche del processo, mentre ne è certamente più diffuso il loro uso nei laboratori R&D, nel Biotech, e nei processi di produzione di API per sintesi chimica. In generale, nell'industria farmaceutica sono almeno più di 30 i solventi usati regolarmente, quali solventi clorurati, diclorometano per l'estrazione di vitamine ed antibiotici, etanolo e metanolo, solventi polari come l'acetone, IPA GMP usato per la preparazione di solidi orali o come nei disinfettanti e creme per la pelle, nonché componenti aromatici come i BTEX fra i quali il toluene, con cui **MPPE ha vari impianti con risultati di rimozione al 99,9%**. I limiti allo scarico di queste sostanze sono stringenti, e in futuro ne verrà data sempre maggiore attenzione. Inoltre, guardando agli obiettivi ed ai principi di sostenibilità aziendale, gli idrocarburi sono tra le prime sostanze delle acque reflue alle quali dedicarsi.

Come soluzione di trattamento reflui con idrocarburi, si pensa comunemente alla distillazione in colonne, ma questo porta ad impianti con OpEx alti per consumo di energia, e le colonne richiedono attività periodica di pulizia che ne interrompe la continuità di servizio. Nasce quindi l'esigenza di soluzioni alternative più efficienti e sostenibili.

### MPPE ed il processo di estrazione

La tecnologia **Macro Porous Polymer Extraction (MPPE)** di *Veolia Water Technologies* è una soluzione ad **alta efficienza per la rimozione di idrocarburi disciolti e dispersi nelle acque reflue**. È un **processo automatico**, con **minimo impegno di risorse operative, senza uso di prodotti chimici**, e che **non produce né fanghi né gas di scarto**. Si tratta di un **liquido** con forte affinità con gli **idrocarburi**, fissato all'interno di un letto di perline di polimeri porosi. Quando le acque reflue passano attraverso questo letto, gli idrocarburi migrano dalla fase acquosa al liquido di estrazione. **L'acqua così purificata può essere ulteriormente trattata, riutilizzata o convogliata a scarico**.

Quando il liquido di estrazione è saturo di idrocarburi, viene periodicamente rigenerato riscaldandolo con vapore a bassa pressione a 112°C. Gli idrocarburi contenuti nel liquido di estrazione vengono poi condensati e rimossi in fase liquida in un separatore. **Quasi il 100% degli idrocarburi vengono rimossi**. L'impianto è costituito da due colonne di processo MPPE, per garantire un **funzionamento in parallelo e in continuo tra estrazione e rigenerazione**. Il flusso di acqua reflua viene convogliato al secondo letto di estrazione durante la rigenerazione della prima colonna, e viceversa, garantendo così **continuità al processo di trattamento**.



**WATER TECHNOLOGIES**

## Macro Porous Polymer Extraction (MPPE)

Tecnologia di rimozione degli idrocarburi dispersi e disciolti, mediante l'estrazione liquido-liquido, in un unico passaggio.

[www.veoliawatertechnologies.it](http://www.veoliawatertechnologies.it)

Resourcing the world



Nella tecnologia di estrazione MPPE si può controllare anche **l'efficienza di rimozione**, variando la quantità di media filtrante nelle colonne.

Per composti polari, come Acetona, IPA, MEK, MTBE, THF, Fenoli, viene usato un tipo più specifico di media filtrante, mantenendo comunque lo stesso principio di funzionamento, e permettendo così anche la rimozione di una quantità più ampia di idrocarburi.

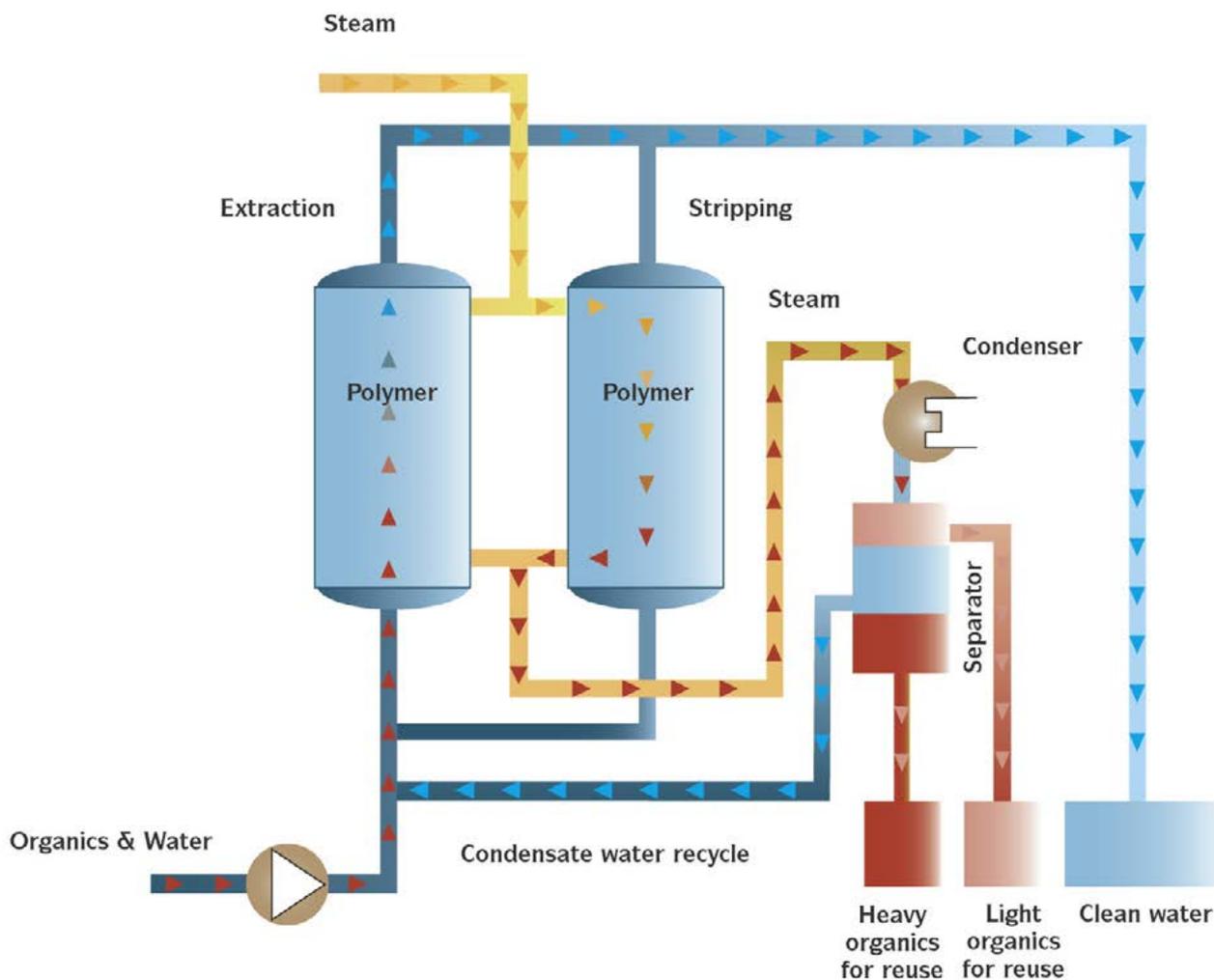
**Fattori chiave per le applicazioni MPPE**

Il fattore di successo della tecnologia MPPE è la **rimozione delle sostanze più complesse dalle acque reflue industriali**. Ci riferiamo alle sostanze più tossiche che non vengono assorbite nelle sezioni convenzionali di trattamento biologico. **La rimozione di queste sostanze permette il trattamento biologico a valle, o ulteriori sezioni di trattamento per il riuso delle acque all'interno del sito. Inoltre, rimuovere e concentrare le sostanze più tossiche, anche con fattore 200, abbatte significativamente lo smaltimento e il costo di trattamenti terzi esterni.**

Riguardo i consumi energetici, **un impianto MPPE consuma il 10-20% della stessa energia necessaria in un sistema convenzionale di distillazione**. Ma vediamo di seguito quali sono gli ulteriori vantaggi.

Sebbene in genere la tecnologia MPPE venga utilizzata per rimuovere tracce di solventi idrocarburi, con la sua alta efficienza di recupero **può essere adatto per estrarre dalle acque reflue anche altri composti ad alto valore, che con trattamenti successivi possono essere riutilizzati nel processo farmaceutico**. Ci sono stati casi in cui i solventi recuperati sono stati riutilizzati tal quale come estratti direttamente dall'impianto MPPE.

Ma ci sono anche altri aspetti da considerare. Le colonne di distillazione possono subire incrostazioni e, quando ciò si verifica, la colonna deve essere pulita utilizzando solventi. In questa situazione la colonna di distillazione rimane fuori servizio, perdendo di efficienza di processo, cosa che non succede con un impianto MPPE. Come approfondimento, su richiesta possiamo portare un caso di impianto nella regione scandinava, in





cui l'industria farmaceutica usava una colonna di distillazione convenzionale nel suo WWTP. Il trattamento delle acque reflue era spesso interrotto per il **fouling** che si creava nelle torri di distillazione. Anche il consumo di energia era molto elevato e l'azienda era alla ricerca di alternative migliorative. In fase di ampliamento dell'impianto è stata presa in considerazione la tecnologia MPPE di Veolia Water Technologies. Attraverso dei **test pilota in laboratorio**, ai quali il cliente ha assistito, Veolia Water Technologies è stata in grado di dimostrare che **la tecnologia MPPE permetteva miglioramenti di processo e maggiore efficienza energetica**. L'impianto è stato quindi realizzato con una soluzione modulare a container, permettendo di ridurre gli spazi necessari vicino al loro parco serbatoi.

### **Il recupero degli idrocarburi**

MPPE non è solo una soluzione che riduce i consumi energetici per il trattamento di residui di idrocarburi nelle acque reflue delle industrie farmaceutiche. **L'efficienza corre di pari passo con la rimozione di quasi il 100% dei solventi idrocarburi in uso nel settore farmaceutico. L'acqua trattata con MPPE può quindi essere ulteriormente purificata con altre sezioni a valle, per le quali è tipicamente richiesto un basso valore di idrocarburi.**



In questo modo si aiuta le aziende farmaceutiche ad ottenere **importanti risparmi idrici** sui loro processi, e si supporta anche il **recupero delle risorse di materiali** come solventi e persino prodotti specifici di alto valore all'interno del flusso di acque reflue. Spesso, trattando efficacemente anche solo un elemento inquinante nel flusso delle acque reflue, MPPE può risolvere una parte importante dei problemi delle acque reflue dal settore farmaceutico.

In definitiva, il processo MPPE consente alle aziende farmaceutiche di **garantire la propria continuità aziendale garantendo che processi e progetti rientrino nei limiti normativi ambientali** sia ora che in futuro. ■



**Veolia Water Technologies Italia spa**

[www.veoliawatertechnologies.it](http://www.veoliawatertechnologies.it)



**IdA**



# Informazioni DALLE AZIENDE

## PNRR, un acceleratore per installare sette nuovi bioessicatori nei depuratori di Padova

**I**l PNRR premia AcegasApsAmga nella missione “Rivoluzione verde e transizione ecologica”.

Il progetto di installazione di 7 nuovi bioessicatori negli impianti di depurazione di Padova, presentato dal Consiglio di Bacino Bacchiglione e dal gestore AcegasApsAmga, si è aggiudicato un finanziamento nell’ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), missione 2 “Rivoluzione verde e transizione ecologica”, per un importo complessivo di quasi 5 milioni di euro. Un atteso e importante risultato per AcegasApsAmga, dato che si tratta di un impor-

ante acceleratore dell’intervento che era già previsto dalla multiutility nell’ambito del Piano degli Interventi approvato dal Consiglio di Bacino Bacchiglione, attraverso il quale AcegasApsAmga gestisce il ciclo idrico integrato di Padova, Abano Terme e 10 comuni del Piovese. Tale intervento permetterà di proseguire il percorso già intrapreso con l’installazione di due bioessicatori per fanghi di questo tipo all’interno dell’impianto di Ca’ Nordio. Strumenti che porteranno vari vantaggi alla collettività, come il minor impatto ambientale e il contenimento dei costi di gestione.

### Le caratteristiche tecniche della nuova tecnologia

I bioessicatori sono una tecnologia moderna e innovativa, a basso impac-

to ambientale e consumo energetico, che permetteranno di essiccare i fanghi che provengono dalla decantazione dei liquami delle fognie cittadine, riducendone notevolmente il volume (circa del 50%) e consumando molta meno energia rispetto ad altri sistemi di essiccamento tradizionali. I nuovi impianti, infatti, sfruttano il calore generato da reazioni biologiche che avvengono all’interno della massa da essiccare convogliata in uno specifico reattore, anziché quello generato dai processi di combustione, consumando decisamente meno energia per il processo di essiccamento. Oltre ai risparmi energetici con questa tecnologia si otterranno anche notevoli benefici legati all’importante riduzione dei volumi di fanghi da avviare a recupero, con conseguente riduzione degli spostamenti di mezzi pesanti e quindi riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> emessa in atmosfera. AcegasApsAmga è una delle prime multiutility in Italia a dotarsi di questi bioessicatori, nati negli Stati Uniti e che a oggi rappresentano la scelta più sostenibile per l’essiccamento dei fanghi derivanti dagli impianti fognari cittadini destinandoli a recupero.

### I vantaggi per l’ambiente e per la collettività

Per capire i vantaggi della nuova tecnologia, basti pensare che a oggi, con i metodi tradizionali dopo la disidratazione meccanica, una tonnellata di fango contiene circa 300kg di sostanza secca e 700 kg di acqua. Grazie ai nuovi bioessicatori la proporzione si inverte: circa 300kg saranno composti da acqua, mentre 700kg di residuo secco, utile a concimare i campi agricoli o da usare negli impianti di compostaggio. Un vantaggio in termini di volumi, che si concretizza in minori trasporti e minor traffico, minori emissioni di CO<sub>2</sub> e minori costi per la collettività. Costi che si abbassano anche grazie al minor sfruttamento di energia per il processo di essiccamento, che non avverrà più tramite processi di combustione, ma dal calore che si genera dalle reazioni biologiche che avvengono spontaneamente nei fanghi da essiccare.

“Grazie a questa tecnologia, la cui adozione era già in previsione ed è



# TBF FINALMENTE SBARCA a MILANO



**TBF, società d'ingegneria svizzera con 30 anni di esperienza nel mercato italiano, è lieta di annunciare l'apertura del suo primo ufficio in Italia.**

Oltre a sviluppare progetti complessi nei settori energia, ambiente, infrastrutture e mobilità, in TBF siamo attivi a tutto tondo anche nella sostenibilità, consulenza aziendale, comunicazione e ricerca di finanziamenti.

Il nostro Lucas Preatoni vi aspetta con piacere nella nuova sede di Via Pola 11, Milano, oppure all'indirizzo [tbfmi@tbf.ch](mailto:tbfmi@tbf.ch), per capire insieme in cosa TBF può essere di supporto alla vostra realtà. Per altre informazioni su di noi [www.tbf.ch/it](http://www.tbf.ch/it) o link al nostro Rapporto di gestione 2022 tramite il seguente QR-Code.



stata accelerata dall'ottenimento del finanziamento del PNRR, sarà ottimizzata la gestione degli impianti di depurazione di Padova e si miglioreranno aspetti come la logistica e i trasporti, che impatteranno positivamente su ambiente e collettività – spiega Paolo Jerkic, responsabile Impianti di Depurazione e Sollevamenti di AcegasApsAmga –. Il recupero e il riuso dei fanghi per l'agricoltura e il compostaggio è infatti una tematica sempre più sentita a livello europeo in chiave di economia circolare e AcegasApsAmga si è fatta trovare pronta adottando una tecnologia innovativa e che aumenta la sostenibilità di ogni processo”.

#### Le fasi di realizzazione

Le tempistiche di installazione sono quelle previste dalle norme per concretizzare l'ottenimento del finanzia-

mento del PNRR: entro la fine dell'anno si deve procedere alla conclusione delle autorizzazioni, alla chiusura del progetto e all'aggiudicazione della gara d'appalto, mentre il collaudo e la messa in esercizio dei macchinari deve avvenire entro marzo 2026. ■

**AcegasApsAmga**  
Caterina Zanirato  
Ufficio stampa AcegasApsAmga  
**Caterina.zanirato@**  
**acegasapsamga.it**



### Dall'unione di materie termoplastiche e di gomma riciclata da Pneumatici Fuori Uso (PFU) nasce Tyreplast

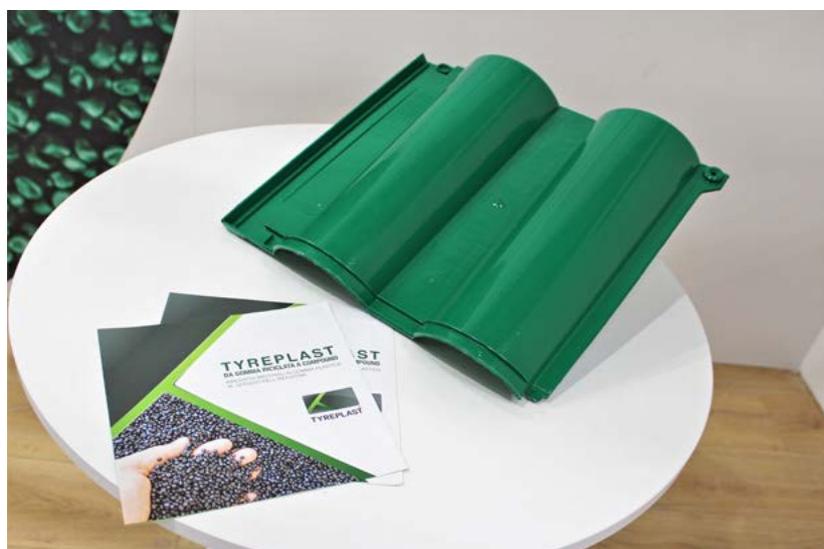
Ogni anno in Italia arrivano a fine vita nel mercato del ricambio circa 350.000 tonnellate di pneumatici. Dal 2006 una direttiva dell'Unione Europea vieta l'invio in discarica dei Pneumatici Fuori Uso (PFU), riconoscendo alla gomma riciclata qualità e valore tali da renderne obbligatorio il

recupero. In base all'art. 228 del Decreto Legislativo 152/2006, produttori e importatori di pneumatici sono obbligati a provvedere – in forma individuale o associata, come nel caso di Ecopneus – alla gestione di un quantitativo di PFU pari a quelli dai medesimi immessi sul mercato e destinati alla vendita sul territorio nazionale, assecondando il principio della Responsabilità estesa del produttore (Extended Producer Responsibility), un modello organizzativo adottato dalla maggioranza dei Paesi Europei. Ecop-

neus opera quindi con la responsabilità di rintracciare, raccogliere e recuperare una quota di PFU corrispondente in peso alla quota di pneumatici nuovi immessi nel mercato del ricambio dalle aziende socie l'anno solare precedente, mediamente 200.000 tonnellate/anno.

Quando uno pneumatico non ha più le caratteristiche indispensabili per una prestazione sicura ed efficiente sul veicolo, neanche attraverso la ricostruzione, diventa “fuori uso” – ovvero un rifiuto – e deve essere raccolto per il recupero e riciclo in appositi impianti. La gomma di cui è costituito lo pneumatico è infatti una miscela di polimeri di altissima qualità con eccezionali caratteristiche chimico-fisiche che restano inalterate anche nella gomma riciclata che se ne ottiene.

Il PFU può essere avviato verso due strade alternative: il riciclo, da cui si ottengono nuovi materiali come gomma, acciaio e fibre tessili, oppure recuperato come energia in impianti ad hoc, principalmente cementifici. Per il riciclo di materia il PFU viene avviato in appositi impianti che attraverso una macinazione meccanica a temperatura ambiente lo riducono in frammenti sempre più piccoli, fino ad ar-





rivare alla separazione della gomma riciclata da acciaio e fibra tessile.

La gomma riciclata da Pneumatici Fuori Uso si presenta sotto forma di granuli e polverini contenenti più del 50% di elastomeri di alta qualità, in particolare gomma naturale (NR) e gomma sintetica di tipo SBR (Styrene Butadiene Rubber) e BR (Polybutadiene Rubber).

La gomma riciclata è pronta per essere utilizzata nella realizzazione di prodotti ecosostenibili, che trovano applicazione in settori anche molto diversi tra loro: dai prodotti per l'edilizia come gli isolanti acustici e antivibranti, allo sport, con playground per parco giochi, campi da calcio, pavimentazioni sportive polivalenti e prodotti per il benessere animale. C'è anche il settore delle strade e infrastrutture dove accanto agli asfalti "modificati" silenziosi e duraturi troviamo piste ciclabili, arredi urbani ed elementi per sicurezza stradale. Completano il pa-

norama i prodotti di design, l'oggettistica e anche nuovi compound realizzati unendo gomma riciclata e polimeri termoplastici.

### Materiali tyreplast: da gomma riciclata a compound

Al giorno d'oggi, siamo fortemente in contatto e dipendenti da materiali polimerici che hanno sostituito un gran numero di materiali convenzionali come legno e metallo in vaste aree di applicazione. L'inserimento di gomma riciclata da PFU all'interno di compound polimerici può portare ad enormi vantaggi:

- **Sostenibilità:** l'utilizzo della gomma riciclata può aiutare a ridurre l'impatto ambientale della produzione di compound e articoli in gomma-plastica
- **Riduzione nell'utilizzo di materie prime vergini e Critical Raw Materials (CRMs):** la gomma riciclata può esse-

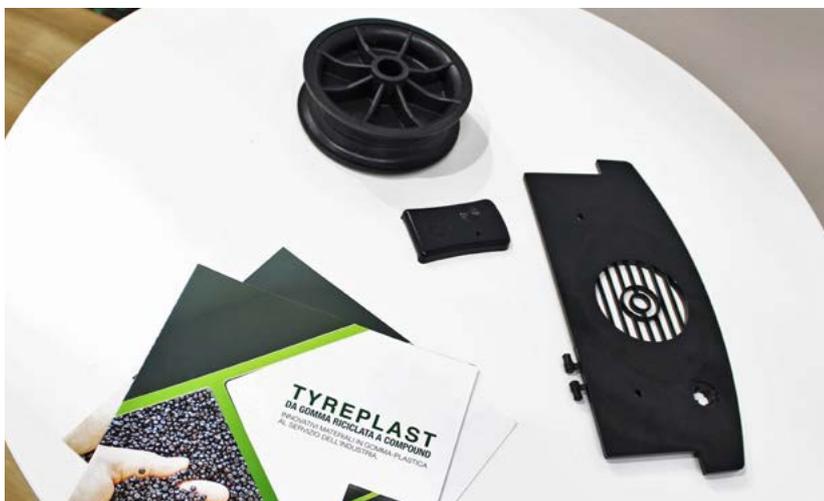
re utilizzata nella produzione di compound in gomma-plastica per sostituire parzialmente o completamente la gomma naturale, identificata come una materia prima critica dall'Unione Europea (UE).

- **Riduzione dei costi:** la gomma riciclata è spesso meno costosa rispetto ai polimeri vergini solitamente utilizzati per la produzione dei compound
- **Miglioramento delle prestazioni:** il blend consente un migliore equilibrio di proprietà rispetto a quello ottenibile con un singolo polimero. La presenza di gomma riciclata in compound di gomma-plastica può migliorare alcune proprietà come, ad esempio, lo smorzamento delle vibrazioni, le proprietà acustiche, l'elasticità ed il grip dei manufatti.

In generale, l'utilizzo di gomma riciclata in compound di gomma-plastica può essere una scelta vantaggiosa per le imprese che cercano di migliorare la sostenibilità ambientale e ridurre i costi, ma richiede un'attenta valutazione delle proprietà dei materiali e un'adeguata gestione dei processi di produzione.

Affinché la gomma riciclata possa essere inserita all'interno di compound polimerici, la granulometria della stessa dovrà essere adeguata tenendo conto delle proprietà meccaniche desiderate e del processo di produzione del compound stesso e del successivo manufatto. Più la granulometria della gomma riciclata risulterà fine, meglio questa si disperderà nella matrice termoplastica creando una massa più omogenea con migliori proprietà meccaniche.

Tyreplast è un compound polimerico che nasce dall'unione di materie termoplastiche e di gomma riciclata da Pneumatici Fuori Uso (PFU). Sviluppati da Ecopneus, con il supporto tecnico di Idea Plast, i materiali Tyreplast sono innovativi, performanti e sostenibili, al servizio delle imprese e dell'industria della trasformazione. Fin dall'inizio della collaborazione, l'obiettivo è stato quello di realizzare nuove famiglie di prodotti in cui l'unione del polverino di gomma riciclata con polimeri termoplastici generasse dei blend "ecofriendly", con caratteristiche specifiche. Questi pro-





dotti sono stati inoltre ideati e progettati per essere lavorati e trasformati con le tecnologie in questo momento in uso (calandratura, estrusione, stampaggio) senza richiedere tecnologie specifiche.

Il polverino di gomma, adeguatamente amalgamato a diverse tipologie di materie plastiche attraverso l'uso di specifici compatibilizzanti, trasferisce infatti alla matrice polimerica alcune delle caratteristiche tipiche della gomma, come l'assorbimento delle vibrazioni e le proprietà fonoisolanti, in modo tale da aumentarne e migliorarne le caratteristiche funzionali.

È possibile realizzare compound Tyreplast utilizzando diversi polimeri termoplastici e non solo, creando blend con caratteristiche diverse per i vari possibili utilizzi finali. Per mantenere alto il valore di sostenibilità ambientale dei prodotti, oltre che i polimeri termoplastici vergini sono stati indagati, come matrici polimeriche di base da impiegare, i materiali ottenuti da post consumo e da scarti industriali:

- Poliolefine vergini e riciclate (LD-LPE, HDPE, PP, ...)
- Poliammidi (PA6, ...)
- PET vergine e riciclato
- TPU: Poliuretano Termoplastico
- Elastomeri Termoplastici (SEBS, ...)

Ciascuna delle matrici è stata caricata con diverse percentuali di polverino di gomma riciclata con range che vanno dal 10% fino al 50%, a seconda della tipologia di applicazione finale.

Gli impieghi dei Tyreplast sono una concreta risposta per differenti settori di utilizzo che ricerchino le prestazioni fornite dalla gomma, quali ad

esempio una maggiore resistenza agli urti, migliorate caratteristiche insonorizzanti ed una migliore dissipazione delle vibrazioni.

### Testing

Nella prima fase è stata eseguita una breve ricerca brevettuale per valutare le implicazioni che i risultati di questo progetto avrebbero potuto avere sui brevetti esistenti. In parallelo è stata effettuata un'analisi delle caratteristiche del prodotto, in particolare si è creato un capitolato per l'analisi di compatibilità tra carica e matrice che comprende:

- DSC
- TGA
- PROVE MECCANICHE
- ANALISI SEM

Con questi test si è analizzato l'impatto che il polverino di gomma riciclata ha sulla matrice termoplastica.

Al termine della prima fase si sono analizzati i compatibilizzanti più adatti per ogni matrice, definendo le diverse formulazioni per ogni miscela. Le formulazioni più interessanti sono state caratterizzate e testate per creare una serie di schede tecniche.

Il polverino di gomma riciclata utilizzato nelle prove è caratterizzato da una granulometria di circa 600 micron, anche se non si esclude l'utilizzo di polverini più fini per aumentare l'omogeneizzazione e la dispersione nella matrice termoplastica ed il conseguente aumento delle proprietà meccaniche del compound, a discapito dell'aumento del prezzo del materiale dovuto agli step aggiuntivi di polverizzazione. Allo stesso mo-

do è possibile utilizzare polverini più grossolani fino ad arrivare a granuli di gomma riciclata di dimensioni tra 1 e 2 mm per tecnologie diverse dallo stampaggio ad iniezione.

I compound sono stati ottenuti mediante un estrusore bivate corotante ed i materiali di input sono stati dosati tramite dosatori gravimetrici. Ogni base polimerica e il compatibilizzante sono stati introdotti nell'estrusore dalla tramoggia principale. Il polverino è stato invece introdotto da un side-feeder ad un terzo della lunghezza della vite. Il profilo vite utilizzato è denominato "gentle" in quanto in grado di fornire una buona dispersione delle cariche senza essere troppo aggressivo nei confronti del polimero.

### Caratterizzazione meccanica

Presso IIP si sono svolte le seguenti prove di caratterizzazione:

- Prova di trazione (Modulo elastico e carico di rottura): la prova a trazione serve per determinare la resistenza di un materiale. Si registra la curva carico-deformazione dei provini sottoposti a trazione lungo il loro asse longitudinale da uno strumento chiamato Dinamometro. In particolare, consente di determinare il Modulo Elastico (rapporto tra sforzo e deformazione al di sotto del carico di snervamento, ove il materiale ha una risposta puramente elastica, ritornando nella formazione iniziale una volta tolto il carico), il carico di snervamento (il valore di tensione che fa deformare plasticamente il materiale), il carico di rottura e l'allungamento a rottura (il carico in cui il provino si spezza e la percentuale di allungamento fino alla rottura).
- DSC: ISO 1183-1:2012, la DSC misura le variazioni di entalpia nei campioni, dovute alle alterazioni delle loro proprietà fisiche e chimiche in funzione della temperatura e del tempo.
- MFI: il MFI (Melt Flow Index detto anche MFR – Melt Flow Rate) identifica la facilità di un polimero fuso a fluire; la sua misura si effettua caricando il polimero e fondendolo ad una determinata temperatura in un cilindro riscaldato con un ugello finale e si esercita una forza costante e facendo fluire il polimero se ne calcola la mas-



## Il nuovo significato di efficienza energetica.

Migliorare l'utilizzo dell'energia è la sfida più importante che l'uomo dovrà affrontare nei prossimi anni. Il miglior modo per ridurre i consumi energetici è la loro ottimizzazione.

In Ecogenerazione integriamo al meglio sistemi di produzione energetica combinata come COGENERAZIONE o TRIGENERAZIONE, con tecnologie di TRATTAMENTO E RECUPERO ACQUE INDUSTRIALI.

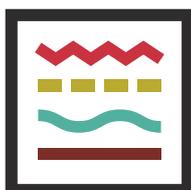
Risparmiare migliorando le performance. Oggi si può.

[www.ecogenerazione.it](http://www.ecogenerazione.it)

**ECO**  
**GENERAZIONE**  
Tecnologie Energetiche e Ambientali



Seguiteci anche su:



## LA RIVISTA TECNICO-SCIENTIFICA PER IL SETTORE DELL'INGEGNERIA SANITARIA AMBIENTALE

**Ingegneria dell'Ambiente (IDA)** è una rivista scientifica ad accesso aperto (open access) nata nel 2014 da un'iniziativa della Sezione Ambientale del *Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale del Politecnico di Milano*. La rivista è **gratuita** per autori e lettori (open access) ed è dotata di un sistema di revisione paritaria (peer-review).

**Ingegneria dell'Ambiente** pubblica articoli riguardanti la ricerca tecnico-scientifica nei campi di interesse dell'Ingegneria Sanitaria-Ambientale e si propone come strumento in lingua italiana per raggiungere e dialogare con tecnici ambientali, liberi professionisti, funzionari della pubblica amministrazione, formatori ed Enti di controllo.

La rivista ospita contributi in lingua italiana; ma sono richiesti anche un titolo e un abstract in inglese.

I temi di interesse della rivista sono: *Tecnologie per acque di approvvigionamento e di rifiuto; Riutilizzo e recupero di energia e materia; Inquinamento dell'aria e depurazione delle emissioni in atmosfera; Inquinamento delle acque; Bonifiche dei suoli contaminati; Trattamento e gestione dei rifiuti; Valutazione di impatto ambientale; Cambiamenti climatici; Analisi del ciclo di vita; Energia e ambiente; Sistemi di gestione ambientale; Caratterizzazione, monitoraggio e modellistica dei fenomeni di inquinamento ambientale.*

**Ingegneria dell'Ambiente** pubblica Articoli di ricerca, che illustrano risultati di ricerche tecnico-scientifiche; Articoli di review, che illustrano lo stato dell'arte; Comunicazioni tecnico-scientifiche, che illustrano risultati di progetti dimostrativi o soluzioni applicative innovative; Brevi resoconti di convegni o mostre; Recensioni di volumi, italiani e stranieri, di interesse per i campi dell'Ingegneria Sanitaria Ambientale; Editoriali o testi generali di inquadramento di temi di particolare rilevanza dell'Ingegneria Sanitaria Ambientale, scritti con un linguaggio divulgativo (su invito della Direzione Scientifica o del Comitato Scientifico).

Per l'invio di proposte utilizzare la piattaforma all'indirizzo: [www.ingegneriadellambiente.net](http://www.ingegneriadellambiente.net)

**Ingegneria dell'Ambiente** ha il patrocinio di  
**GITISA** (Gruppo Italiano di Ingegneria Sanitaria, [www.gitisa.it](http://www.gitisa.it));  
**AIAT** (Ass. Ingegneri per l'Ambiente e il Territorio, [www.ingegneriambientali.it](http://www.ingegneriambientali.it)).  
*Ingegneria dell'ambiente* è la rivista di riferimento per AIAT.

Ingegneria dell'Ambiente è riconosciuta da **ANVUR** come rivista a dell'Area 08, i suoi articoli sono riconosciuti ai fini dell'ottenimento di crediti per la formazione informale prevista degli Ordini Professionali.



sa fuoriuscita in un determinato tempo; se si considera il peso che fuoriesce in 10 minuti si ha il MFI, invece se consideriamo il volume in  $\text{cm}^3$  abbiamo MVR ( Melt Volume Rate). Questo valore fornisce un dato indicativo dei parametri di fluidità di un materiale e viene analizzato sia per fare dei controlli qualitativi sulla materia, sia, come per il nostro caso, per valutare lo scorrimento del materiale per le fasi di lavorazione, in particolare lo stampaggio ad iniezione.

- Modulo a compressione: nella compressione semplice il solido si accorcia, contemporaneamente, si rigonfia in senso trasversale; operativamente, il provino si pone fra due piastre fissate al dinamometro e si ottiene in grafico sforzo-deformazione dal quale è possibile ricavare il carico di rottura e/o una determinata percentuale di deformazione, la deformazione stessa e il modulo elastico.
- Charpy: la resilienza, resistenza all'urto, viene data dal rapporto tra l'energia assorbita dal provino e la sua sezione resistente e viene espressa in  $\text{kJ/m}^2$ .

### I settori di impiego del compound tyreplast

L'unione della gomma riciclata e delle materie termoplastiche consente di migliorare le caratteristiche fisiche e tecniche dei due materiali, ottenendo miscele dalle prestazioni superiori, oltre che, naturalmente, ad elevato valore ambientale. Tanti i settori applicativi nei quali questi compound

trovano spazio: nell'automotive, ad esempio, come componentistica e nelle finiture dei veicoli; nell'edilizia, invece, per realizzare elementi altamente performanti per l'isolamento acustico e lo smorzamento delle vibrazioni, come camminamenti e superfici. Nella zootecnia, invece, è possibile realizzare rivestimenti e protesi per gli zoccoli delle mucche, mentre nell'arredo urbano le innovative miscele possono essere utilizzate per la realizzazione di manufatti come, ad esempio, panchine e fioriere. Ma non solo. I prodotti Tyreplast trovano infatti applicazione anche nel mondo dello sport, per la realizzazione di innovativi campi da gioco temporanei o removibili per la pratica del basket  $3 \times 3$ , garantendo prestazioni ai massimi livelli. Non da ultimo, il settore della nautica e della vela, che rappresenta un settore dal grande potenziale di sviluppo, un recente esempio in questo senso è il prototipo di parabordo realizzato in Tyreplast, esempio di economia circolare applicata alla nautica che, posizionato sulle banchine, protegge le imbarcazioni in fase di approdo da urti accidentali. ■

**Ecopneus**  
Via Messina 38, 20154 Milano  
[www.ecopneus.it](http://www.ecopneus.it)  
[info@ecopneus.it](mailto:info@ecopneus.it)



## A Orvieto inizia una nuova "Hera" per illuminazione pubblica: si risparmia il 65%

Verranno riqualficati oltre 3.100 corpi illuminanti con tecnologia a led, che garantiranno un risparmio energetico pari al 65% ovvero 1.109.526 Kwh all'anno, pari a 447 tonnellate di  $\text{CO}_2$  che non saranno emesse nell'atmosfera ogni anno. Un grandissimo taglio ai consumi per l'illuminazione pubblica di Orvieto, che corrisponde al consumo medio annuo di circa 410 famiglie. Inoltre, l'energia elettrica fornita sarà certificata verde al 100%. Sono questi alcuni dati del progetto di riqualificazione dell'illuminazione pubblica offerta da Hera Luce per il Comune di Orvieto, attivato tramite la convenzione Consip – servizio luce 4, valido per tutto il territorio dell'Umbria e della Toscana: un completo restyling che coinvolgerà tutto il sistema di illuminazione pubblica del territorio comunale, per illuminare in modo più "green" e più efficace le strade e i monumenti della città. Oltre alla sostituzione dei punti luce si procederà con la riqualificazione e sostituzione di 150 sostegni, con l'adeguamento di 44 quadri elettrici, con l'installazione di 100 sistemi di telecontrollo e monitoraggio dell'illuminazione. Saranno infine sostituiti oltre 6km di linea elettrica.

### I vantaggi della nuova illuminazione

Grazie all'accordo stretto tra Hera Luce e il Comune di Orvieto, oltre 3.100 corpi illuminanti esistenti saranno ottimizzati con tecnologia led di ultima generazione, opportunamente dimensionati per soddisfare le diverse esigenze illuminotecniche imposte dalle normative vigenti. Saranno inoltre installati 100 sistemi di telecontrollo da quadro per permettere la gestione remotizzata degli impianti, e quindi un uso più efficace ed efficiente dell'energia in base alle reali necessità del territorio e le fasce orarie, e saranno sostituiti e riqualficati oltre 150 sostegni dei corpi illuminanti.

Le nuove luci permetteranno ogni anno di risparmiare il 65% di energia. La



# SARDINIA 2023

19° SIMPOSIO INTERNAZIONALE SULLA GESTIONE DEI RIFIUTI  
E SULLA DISCARICA SOSTENIBILE / 9-13 OTTOBRE 2023  
Forte Village Resort, S. Margherita di Pula, Cagliari

**organizzato da:** IWWG - International Waste Working Group

**con il supporto scientifico di:** Università di Padova • Boku University of Natural Resources and Life Sciences (AT) • Hamburg University of Technology (DE) • Luleå University of Technology (SE) • Tongji University (CN)

**segreteria e contatti:** Eurowaste srl / Via Beato Pellegrino 23 / 35137 Padova  
tel + 39 049 8726986 / [info@sardiniasymposium.it](mailto:info@sardiniasymposium.it) / [www.sardiniasymposium.it](http://www.sardiniasymposium.it)

## RITORNA IL SARDINIA SYMPOSIUM!

Dopo lo straordinario successo della precedente edizione, che ha visto la calorosa partecipazione di 354 delegati provenienti da 46 Paesi, torna il **SARDINIA 2023 – 19° Simposio Internazionale sulla gestione dei rifiuti e sulla discarica sostenibile** che si terrà in presenza dal 9 al 13 Ottobre 2023 nella tradizionale e magnifica cornice del Forte Village Resort, Santa Margherita di Pula, Cagliari. L'evento, che dal 1987 riunisce ogni due anni centinaia di partecipanti provenienti da tutto il mondo, con la presentazione di oltre 400 lavori, rappresenta a livello internazionale il convegno più importante sulla gestione dei rifiuti e costituisce il Forum di riferimento per tutta la comunità scientifica attiva nel settore. Il segreto di questo successo? Presto detto:

sempre più giovani scienziati partecipano a questo evento riconoscendolo come importante **luogo di socializzazione scientifica** e di scambio di esperienze; la **partecipazione è largamente internazionale** con oltre 70 Paesi diversi, rappresentativa di tutti i continenti; partecipazione costante di affermati scienziati; alto livello scientifico sostenuto da **innovazione e creatività**; un luogo, un ambiente, una natura, una struttura alberghiera, un **programma extra lavori** che rendono piacevole ed unico al mondo la socializzazione e l'opportunità di **collaborazioni professionali e scientifiche**. Iscriviti ora!

## IL CALL FOR ABSTRACT E' ANCORA APERTO: Invia subito il tuo lavoro

Gli abstract (una o massimo due pagine) devono essere redatti secondo il template disponibile sul sito ed inviati alla segreteria organizzativa utilizzando l'apposito form online (<https://www.sardiniasymposium.it/abstract-form>).

Gli abstract possono essere inviati per presentazioni orali o poster. E' possibile inoltre inviare proposte di workshop.

La lingua ufficiale del Simposio è l'inglese. Sono previste sessioni anche in lingua italiana per facilitare la partecipazione di delegati locali. Gli autori italiani possono quindi inviare abstract redatti in ciascuna delle due lingue a seconda della sessione alla quale desiderano partecipare. Per ulteriori informazioni visitare: [www.sardiniasymposium.it/it/call-for-abstracts-2023](http://www.sardiniasymposium.it/it/call-for-abstracts-2023)

## TEMI: Approfondisci tutti gli argomenti del Simposio sul sito

Politiche di gestione dei rifiuti e legislazione / Strategie di gestione dei rifiuti / Partecipazione pubblica / Gestione dei rifiuti e strumenti di supporto alle decisioni / Caratterizzazione dei rifiuti per la definizione delle modalità di gestione / Nuovi concetti per la raccolta dei rifiuti / Minimizzazione dei rifiuti e riciclaggio / Trattamento biologico / Trattamenti termici e tecnologie avanzate di conversione / Pretrattamento meccanico-biologico prima del conferimento in discarica / Discarica controllata / Gestione integrata delle acque reflue e dei rifiuti solidi / Gestione dei rifiuti e cambiamenti climatici / Gestione dei rifiuti nei paesi in via di sviluppo / Environmental forensics / Waste Architecture / Rifiuti e salute / Tecnologie digitali per la gestione dei rifiuti / Altro.

Per ulteriori informazioni si prega di contattate la Segreteria all'indirizzo [info@sardiniasymposium.it](mailto:info@sardiniasymposium.it)



VISITA [WWW.SARDINIASYMPOSIUM.IT](http://WWW.SARDINIASYMPOSIUM.IT) **iwwg**  
international waste working group



**Servizio Consip:  
un'opportunità per i Comuni  
di Umbria e Toscana**

La convenzione Consip Servizio Luce 4 è riferita alla gestione e manutenzione degli impianti di pubblica illuminazione e semaforici. Il servizio include le seguenti attività: fornitura di energia elettrica, gestione e conduzione degli impianti, manutenzione ordinaria e straordinaria degli impianti, interventi di riqualificazione energetica, innovazione tecnologica e adeguamento normativo. Si tratta di un'opportunità per i Comuni di Umbria e Toscana, che possono richiedere l'attivazione del servizio con un semplice click: gli enti interessati possono convenzionarsi accedendo alla piattaforma Acquisti in RetePA messa a disposizione da Consip e seguendo le semplici istruzioni della "guida alla convenzione".

Link: [www.acquistinretepa.it](http://www.acquistinretepa.it)  
Per ulteriori informazioni o supporto nell'attivazione della convenzione, l'RTI ha messo a disposizione delle Amministrazioni Pubbliche un'apposita casella di posta elettronica: [consipHL@gruppohera.it](mailto:consipHL@gruppohera.it). ■

riqualificazione dell'illuminazione non è però solo positiva per l'ambiente: la diminuzione delle emissioni, infatti, non preclude l'efficienza luminosa degli impianti, anzi, la migliora nettamente. I corpi illuminanti a led permettono un miglioramento dell'illuminazione stradale sia in termini di uniformità che di confort visivo, incrementando la percezione dei colori: queste caratteristiche contribuiranno a garantire maggior si-

curezza e il corretto livello d'illuminamento, diminuendo l'inquinamento luminoso prodotto.

Il progetto rappresenta un'applicazione concreta dell'economia circolare e un contributo rilevante al raggiungimento degli obiettivi per il 2030 dell'agenda sostenibile delle Nazioni Unite, in piena armonia con le politiche europee del Green Deal e le politiche di carbon neutrality.

**Hera Luce**

Caterina Zanirato  
Mobile.: 347.6966821  
[caterina.zanirato@acegasapsamga.it](mailto:caterina.zanirato@acegasapsamga.it)  
[www.HeraLuce.it](http://www.HeraLuce.it)

**Sima Waste Solution:  
qualità, innovazione,  
ecosostenibilità.**

Sima Srl lavora e recupera ogni anno circa 100.000 tonnellate di rifiuti di legno provenienti da raccolta differenziata e/o imballaggi, destinati prevalentemente alla produzione di pannello truciolare, a completamento del ciclo del recupero. L'azienda collabora con Enti Pubblici e diversi Comuni, per il recupero degli scarti legnosi provenienti dalla raccolta differenziata e dalle piattaforme ecologiche e rappresenta un punto di riferimento, sia per le piccole medie imprese, sia per le grandi realtà industriali e commerciali. Da anni è una delle più



importanti piattaforme del Consorzio Rilegno, che tutela e promuove il riciclo del legno. Sima si occupa in senso più ampio della gestione di rifiuti speciali non pericolosi, derivanti principalmente dalle attività industriali, tramite una selezione meccanica che permette di recuperare l'80% dei rifiuti nelle filiere di carta, legno, ferro e plastica.

La frazione residua, grazie all'impiego delle più moderne attrezzature a marchio Lindner, di cui Sima è concessionaria, viene rilavorata, macinata, destinata agli impianti di recupero energetico e, solo in ultimo, alle discariche. Sima offre un servizio completo di recupero

degli scarti industriali e produttivi con soluzioni di gestione dei rifiuti customizzate e chiavi in mano. L'azienda ha inoltre implementato la propria capacità di lavorazione, utilizzando gli scarti boschivi e residui del taglio per produrre biomasse, destinate a centrali termiche, impianti di cogenerazione, teleriscaldamento e utilizzate per la produzione energetica, realizzando un cippato molto richiesto nella filiera della biomassa. Grazie alla qualità dei materiali e delle tecnologie impiegate per questa tipologia di prodotti, è sinonimo di garanzia per i propri clienti.

Sima è certificata ISO 14001 e ISO 9001

e convenzionata con i più importanti impianti di recupero e smaltimento rifiuti, in ambito nazionale, al fine di individuare la migliore soluzione di avvio a destino finale per qualsiasi tipologia di rifiuto.

Sostiene ogni giorno i valori dell'economia circolare, che vede i rifiuti come una risorsa, unendo il rispetto per l'ambiente alle esigenze di produttività. ■

**SIMA srl**  
<https://sima-srl.it/>



## tado° e Termo per la transizione energetica

tado° e Termo hanno annunciato la loro partnership per dare una spinta alla transizione energetica residenziale in Italia. L'azienda tedesca, leader di mercato nella gestione del clima domestico, e l'azienda italiana, la cui missione è ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>, uniscono le forze per offrire agli italiani soluzioni pratiche che possano aiutarli a risparmiare concretamente sulle bollette: utilizzando i prodotti offerti da Termo e le soluzioni smart di tado° gli utenti potranno risparmiare drasticamente sui costi del gas.

Il gas quest'anno aumenterà ulteriormente i suoi costi, portando gli utenti a spendere fino al 70%<sup>1</sup> in più, per questo sempre più italiani stanno cercando soluzioni pratiche e facilmente implementabili che possano efficientare i consumi legati alla bassa classe energetica della casa. Per questo motivo, è importante per gli utenti avere le migliori soluzioni in termini di impianti di riscaldamento.

Affrontare il caro energia è importante e bisogna trovare soluzioni pratiche, che abbiano poco impatto sul portafoglio e che si installino facilmente: un device che può rispondere a tutte queste neces-



sità è il termostato intelligente. Questo dispositivo consente agli utenti di beneficiare immediatamente di un elevato risparmio energetico. Infatti, con un termostato intelligente tado° è possibile risparmiare in media il 22%. Ciò è dovuto a diverse funzioni innovative: il Geofencing, che spegne automaticamente il riscaldamento quando la casa è vuota; o il rilevamento delle finestre aperte e l'adattamento alle condizioni atmosferiche e all'impostazione di orari, che riducono lo spreco di energia. Inoltre, grazie alla piattaforma SaaS tado° 360, le persone possono sempre contare su un partner come Termo che controlla lo stato della caldaia e anticipa soluzioni per eventuali anomalie. Questo consente agli utenti di ridurre lo spreco di tempo e denaro nella manutenzione dell'impianto di riscaldamento, alzando il livello di efficienza del proprio sistema. In aggiunta, la seconda soluzione è l'installazione di una caldaia di classe A che aiuterà gli italiani a risparmiare fino a un ulteriore 30% dei costi in bolletta, grazie al suo alto livello di efficienza.

Termo calcola che la soluzione che sta portando sul mercato, che combina una caldaia ad alta efficienza energetica e gli smart device di Tado, può portare un risparmio annuo in bolletta per famiglia fino a 1.220€

### Portare l'efficienza energetica a un livello superiore

Con la nuova partnership tra tado° e Termo, i clienti potranno beneficiare di una gamma di prodotti intelligenti in combinazione con i sistemi di riscaldamento, l'assistenza e la manutenzione, così da favorire la transizione energetica e cominciare un percorso di miglioramento della classe energetica della propria abitazione. La partnership tra tado° e Termo contribuisce alla creazione di un ecosistema che rappresenta un valido strumento per gli utenti, accompagnandoli nella transizione energetica verso la riduzione dei consumi e dei costi, una maggiore efficienza energetica e un minore impatto ambientale. ■

**Ufficio stampa Termo –**  
**Hotwire Public Relations**  
+39 02 3664 3650  
<https://termo.com/termoit@hotwireglobal.com>



Termo



IdA



1. Fonte: Nomisma 2022

Facile da installare, facile  
da gestire, facile da adattare  
Fino al **99%** di inquinanti acidi  
abbattuti



# SOLVAir<sup>®</sup>

Il nostro lavoro? Aiutare centinaia di operatori a gestire a costi contenuti le loro emissioni nel rispetto di normative sempre più severe, aumentando l'efficienza energetica dei loro impianti e migliorando i risultati industriali.

Come ci riusciamo? Offrendo soluzioni personalizzate a base di sodio per abbattere i gas acidi (HCl, SO<sub>x</sub>, HF...) nei fumi di ogni tipo di attività industriale, in tutto il mondo.

CLEAN AIR SOLUTIONS FOR HIGHER PERFORMANCE.  
[solvairsolutions.com](http://solvairsolutions.com)



# REMTECH EXPO

FERRARA FIERE

20 - 22  
SETTEMBRE  
2023

[www.remtechexpo.com](http://www.remtechexpo.com)



## REGISTRAZIONE ONLINE



trainline



ITCA  
ITALIAN TRADE AGENCY

Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale  
ICE - Agenzia per la promozione all'estero e l'internazionalizzazione delle imprese italiane



Un marchio di:



Società del gruppo:

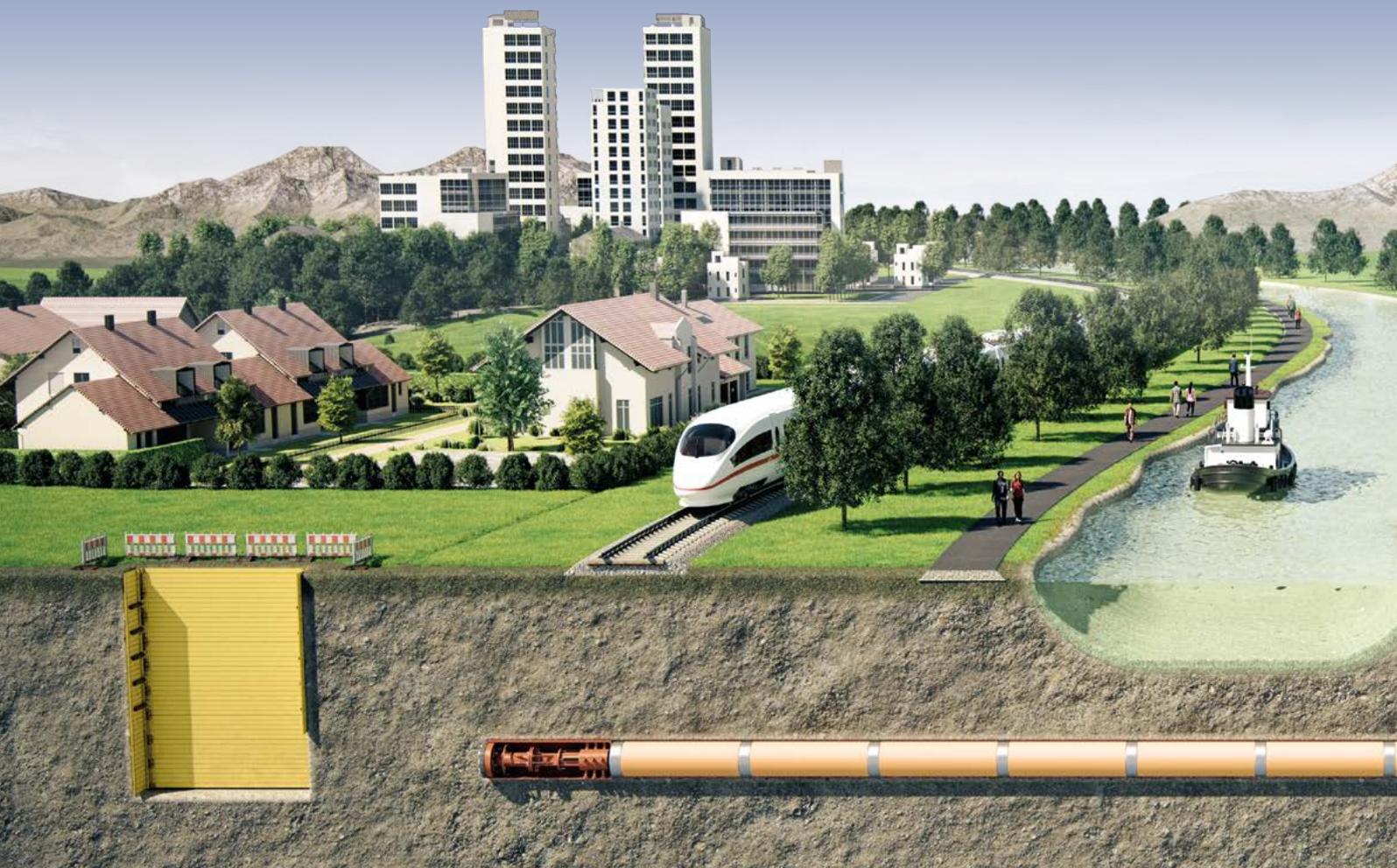


RemTech è certificato da:



# POSA SENZA SCAVO

NON SI NOTA, NON DISTURBA ED È ECOLOGICA



La posa in trincea chiusa offre numerosi vantaggi dal punto di vista economico, ambientale e sociale.

**Società del Gres S.p.A.**  
Via Martiri della libertà 22  
24010 Sorisole (BG) · Italia

T +39 035 199 110 55  
F +39 035 199 110 57

E [dac@gres.it](mailto:dac@gres.it)  
I [www.gres.it](http://www.gres.it)

Produciamo tubi, pozzetti, pezzi speciali e accessori di alta qualità e offriamo soluzioni di sistema – per un impiego sicuro, affidabile ed economico per le future generazioni.

Il nostro portafoglio di servizi è orientato alla gestione efficiente dei cantieri e soddisfa tutti i requisiti dei moderni sistemi di canalizzazione. L'utilizzo di materie prime naturali e l'impiego di tecnologie di processo innovative ci permettono di produrre materiali estremamente resistenti, la cui durata di vita supera i 150 anni, e che possono essere completamente riciclati.

**SOCIETÀ DEL GRES**  
**GRUPPO STEINZEUG-KERAMO**



# INDEX

  
VOL. 10  
NUM. 1  
2023

## In cover

Climate change and water drainage: latest evidence in Italy, design strategies and need for change

*Giacomo Galimberti, Alessandro Balbo*

## Editorial

Potable wastewater reuse, between utopia and reality

*Paolo Roccaro*

## Articles

Regeneration of Pfas-loaded GAC through microwave irradiation

*Erica Gagliano, Yeakub Zaker, Cemre Birben, Pietro Paolo Falciglia, Tanju Karanfil, Paolo Roccaro*

COVID-19 and medical waste management in low-income countries: proposals for an informal neighbourhood in Maputo

*Sofia De Giorgi, Mario Grosso, Francesca Villa*

Combination of composting and vermicomposting of OFMSW: a case study in Sicily

*Gaetano Di Bella, Enrico Licitra, Antonino Laudani, Sabrina Milano, Laura Cozzo, Graziella Rabbeni, Maria Gabriella Giustra, Marco Gentile, Roberto Palumbo, Santo Castagna*

## Technical-scientific communications

The reuse of treated wastewater: is Italy ready to adopt the regulation (EU) 2020/741?

*Geneve Farabegoli*

Water for human use: Pfas and Bisphenol A, from the new directive (UE) 2020/2184 to lab tests

*Paola Verza, Francesca Faraon, Alessio Mattiazzo, Barbara Scantamburlo*

Immagine  
in copertina  
di WISE  
Engineering srl

ISSN e e-ISSN 2420-8256

Ingegneria dell'Ambiente per il 2023 è sostenuta da:

