POLITECNICO MILANO 1863 | DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Contaminanti emergenti nelle acque: tecnologie avanzate, monitoraggio e costi per una gestione sostenibile

Manuela Antonelli



Contaminanti emergenti e ciclo idrico antropico

- Centinaia di contaminanti emergenti (MIE) in concentrazioni in tracce in una matrice complessa
- Incertezze su livelli di concentrazione: LOQ (limite di quantificazione)

Integrazione di approcci diversi per ottenere set di dati robusti e informazioni generalizzabili:

- Piani di monitoraggio efficaci
- Identificazione di azioni di prevenzione e riduzione per limitare la diffusione dei MIE
- Allocazione ottimale delle risorse economiche per il potenziamento degli impianti di trattamento)

L'analisi di rischio supporta:

- la prioritizzazione dei MIE e dei flussi da monitorare/normare
- l'identificazione delle strategie di mitigazione più efficaci

where and on what have we to act, to balance benefits and risks?

Quali trattamenti sono applicabili

Gli **impianti di potabilizzazione** e gli **impianti di depurazione** sono progettati per rimuovere i macro- e i micro-contaminanti convenzionali

La possibilità di rimuovere MIE dipende, oltre che dalla loro concentrazione e proprietà chimiche, da molteplici fattori:

- presenza di **processi di rimozione** appropriati
- congrui valori dei **parametri operativi** dei processi di rimozione
- **configurazione di processo** (combinazione di processi in serie, pre-trattamenti, …)



Quali trattamenti sono applicabili

Gli impianti di potabilizzazione e di depurazione hanno strutture diversificate per la diversa **tipologia di contaminanti** e il diverso **obiettivo di trattamento**

DEPURAZIONE	Trattamenti primari	Trattamento biologico	Trattamento terziario	Trattamento quaternario
POTABILIZZAZIONE (da acque superficiali)	Rimozione torbidità	Inattivazione microrganismi	Rimozione composti organici e DBPs	
POTABILIZZAZIONE (da acque sotterranee)	Filiere non standard			

Processi di rimozione appropriati

Processi ad oggi consolidati e applicabili a piena scala:

- **Adsorbimento** su (ad)sorbenti granulari e/o in polvere (carbone attivo, resine)
- **Ossidazione** con ozono e ossidazioni avanzate (AOPs)
- Processi di **separazione su membrana** in pressione, come nanofiltrazione (NF) e osmosi inversa (RO)

I fattori da considerare:

- Effetto matrice (pH, alcalinità, sostanza organica, metalli ridotti, etc.)
- Competizione tra MIE e altri microinquinanti
- Generazione di sottoprodotti
- Produzione di residui
- Consumi energetici

Processi di rimozione appropriati

Processi ad oggi consolidati e applicabili a piena scala:

- **Adsorbimento** su (ad)sorbenti granulari e/o in polvere (carbone attivo, resine)
- **Ossidazione** con ozono e ossidazioni avanzate (AOPs)
- Processi di **separazione su membrana** in pressione, come nanofiltrazione (NF) e osmosi inversa (RO)

I fattori da considerare:

- Effetto matrice (pH, alcalinità, sostanza
- Competizione tra MIE e altri microinquina
- Generazione di sottoprodotti
- Produzione di residui
- Consumi energetici

La conoscenza è consolidata?

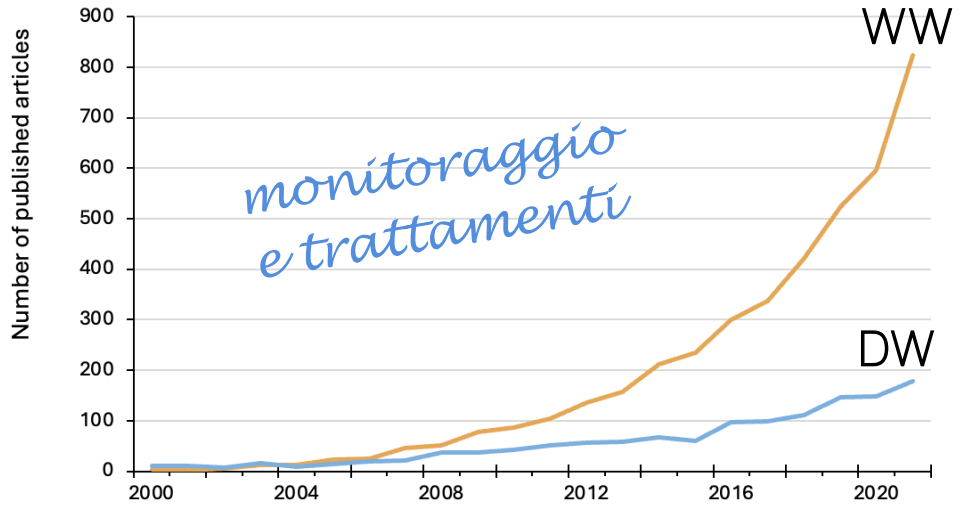
Bastano i dati di letteratura o serve integrarli con sperimentazioni ad hoc?

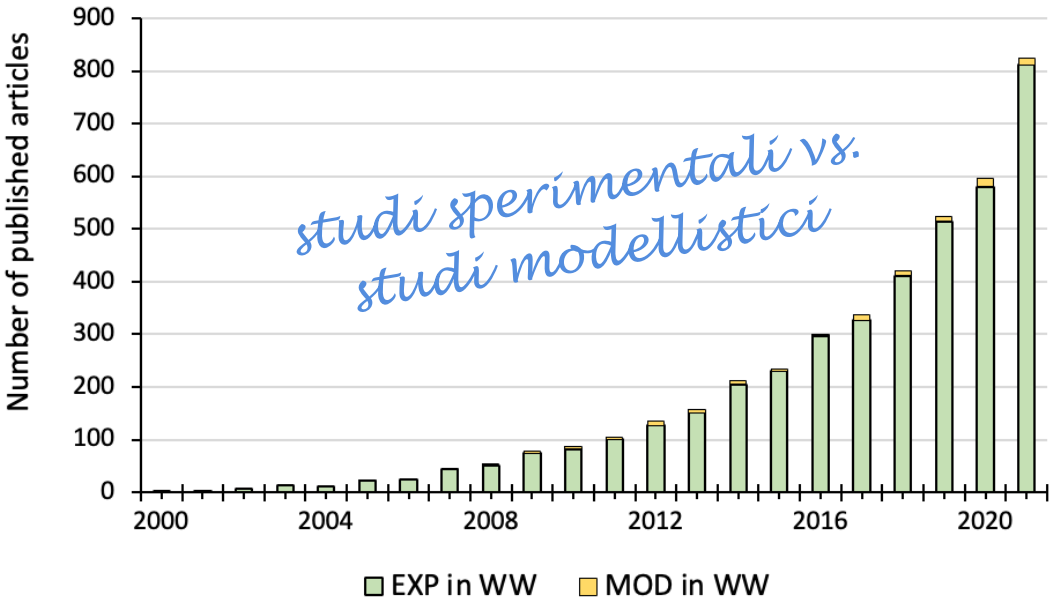
Ci sono criticità per la scalabilità e la trasferibilità dei risultati?

Cosa sappiamo

… numero crescente di studi ma:

- riguardano prevalentemente le **acque reflue**
- frequente non comparabilità per **molteplicità di condizioni** sperimentali
- condizioni sperimentali spesso **non rappresentative** delle condizioni reali
- studi con campagne di **monitoraggio** spesso non corredati dei parametri di processo





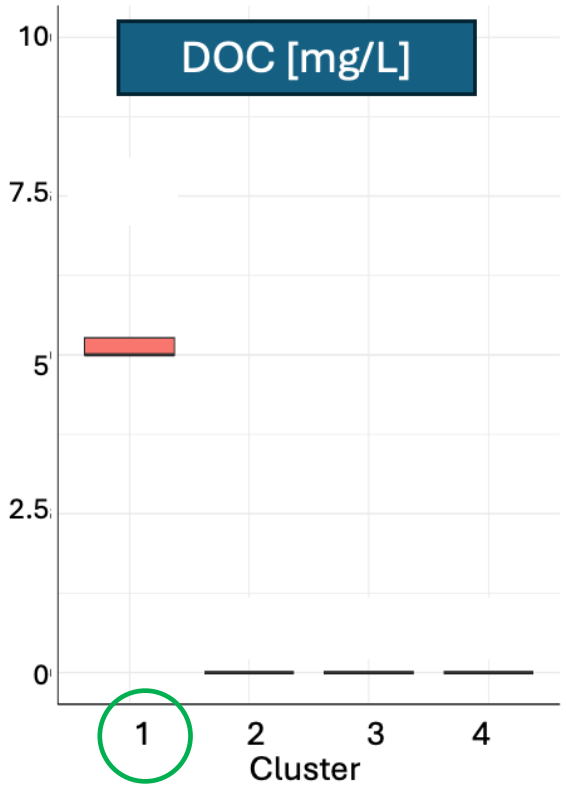
Un esempio: rimozione dei PFAS

cluster con condizioni di prova realistiche

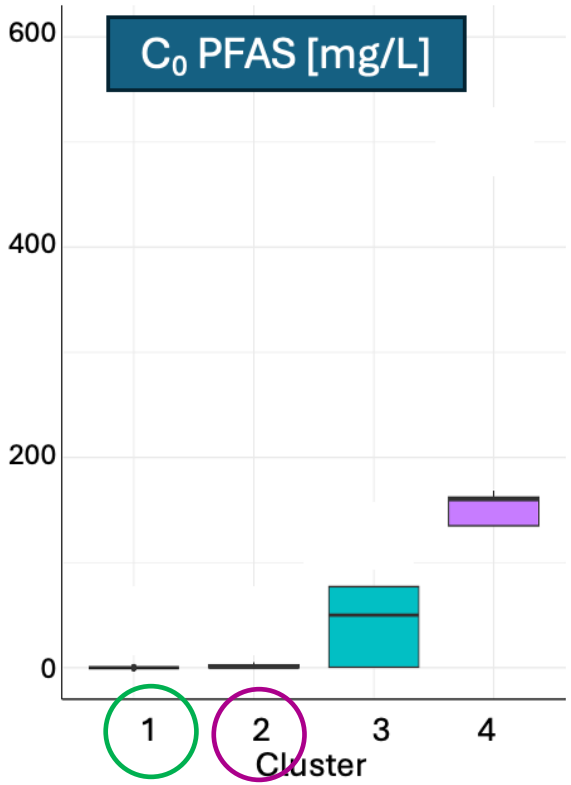
cluster con tutte le condizioni di prova realistiche

Isoterme di adsorbimento: dati di PFAS dal 2008 al 2024

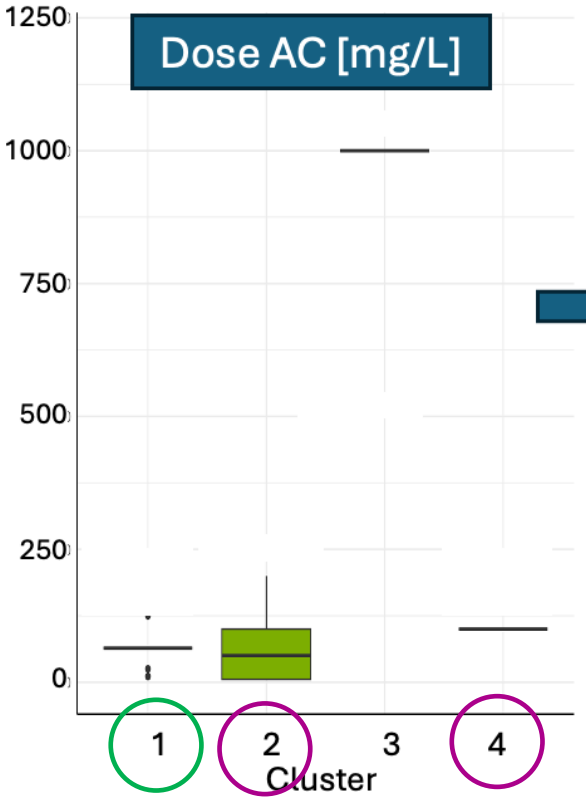
Capacità di adsorbimento vs. condizioni di prova



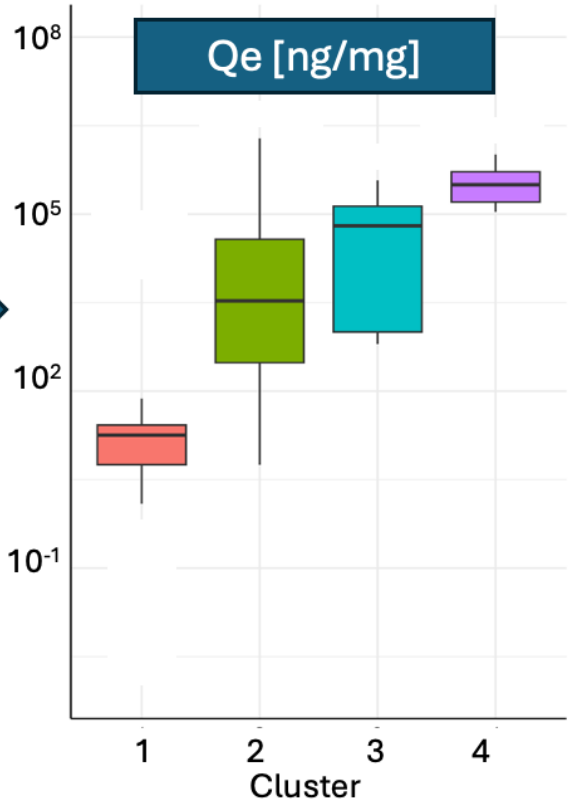
19,5% dati



38,3% dati



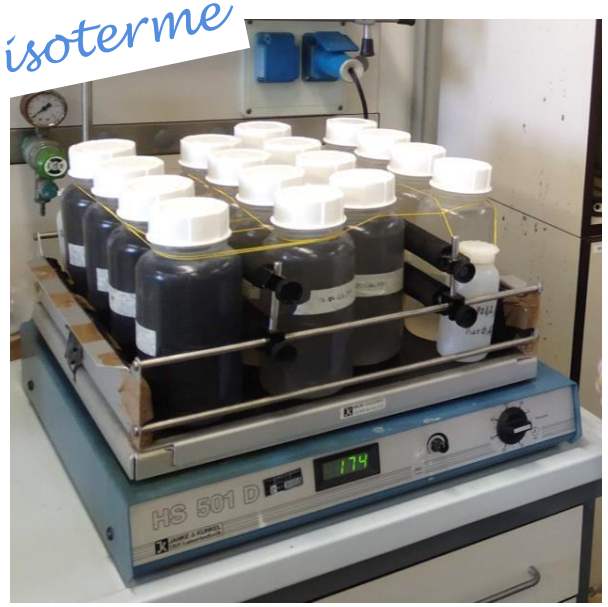
86% dati

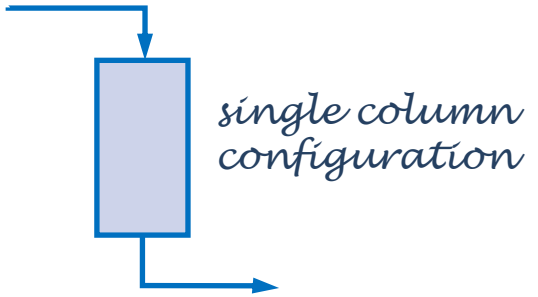


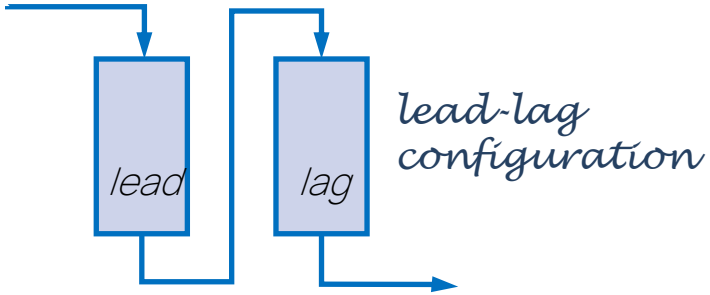
(Ad)sorbimento

- I MIE si concentrano sulla superficie (carbone attivo) o nel volume (resine) di un mezzo solido poroso in corrispondenza dei siti di adsorbimento o di scambio
- Il mezzo poroso può essere rigenerato o smaltito
- Sono possibili configurazioni flessibili in funzione della miscela di MIE

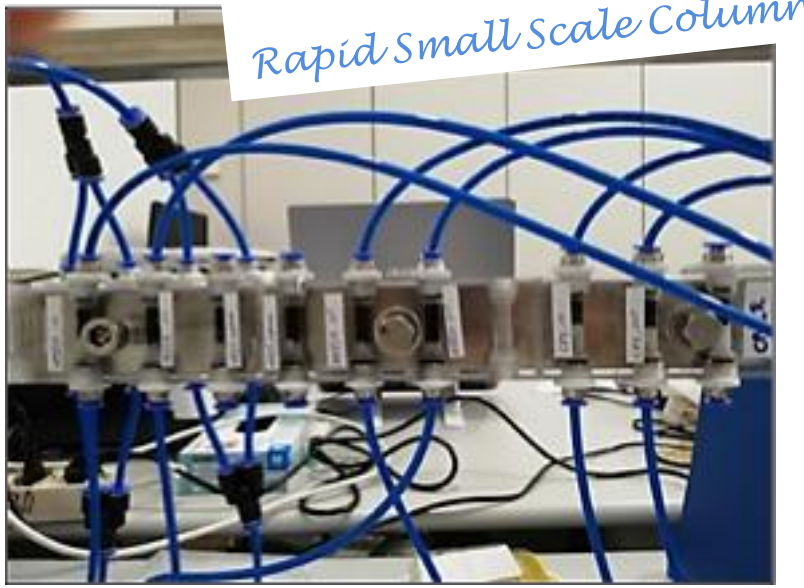
isoterme

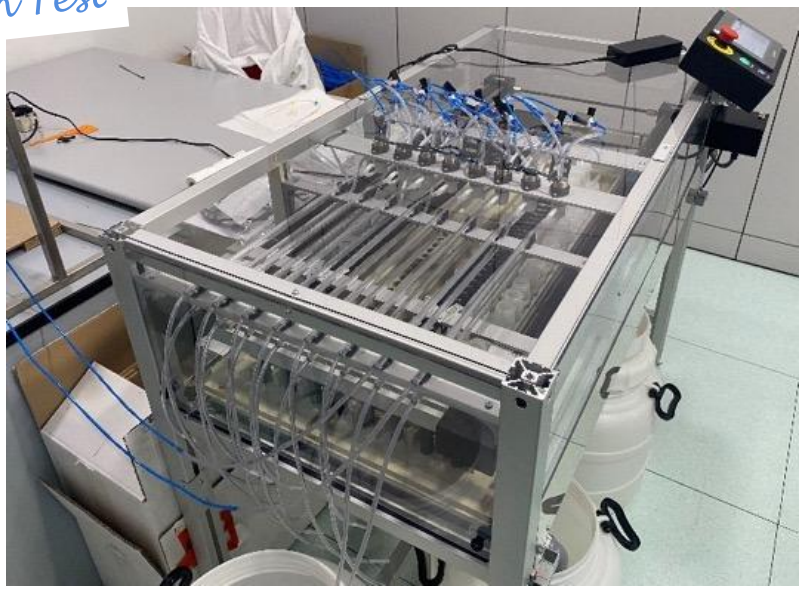






RSSCT
Rapid Small Scale Column Test





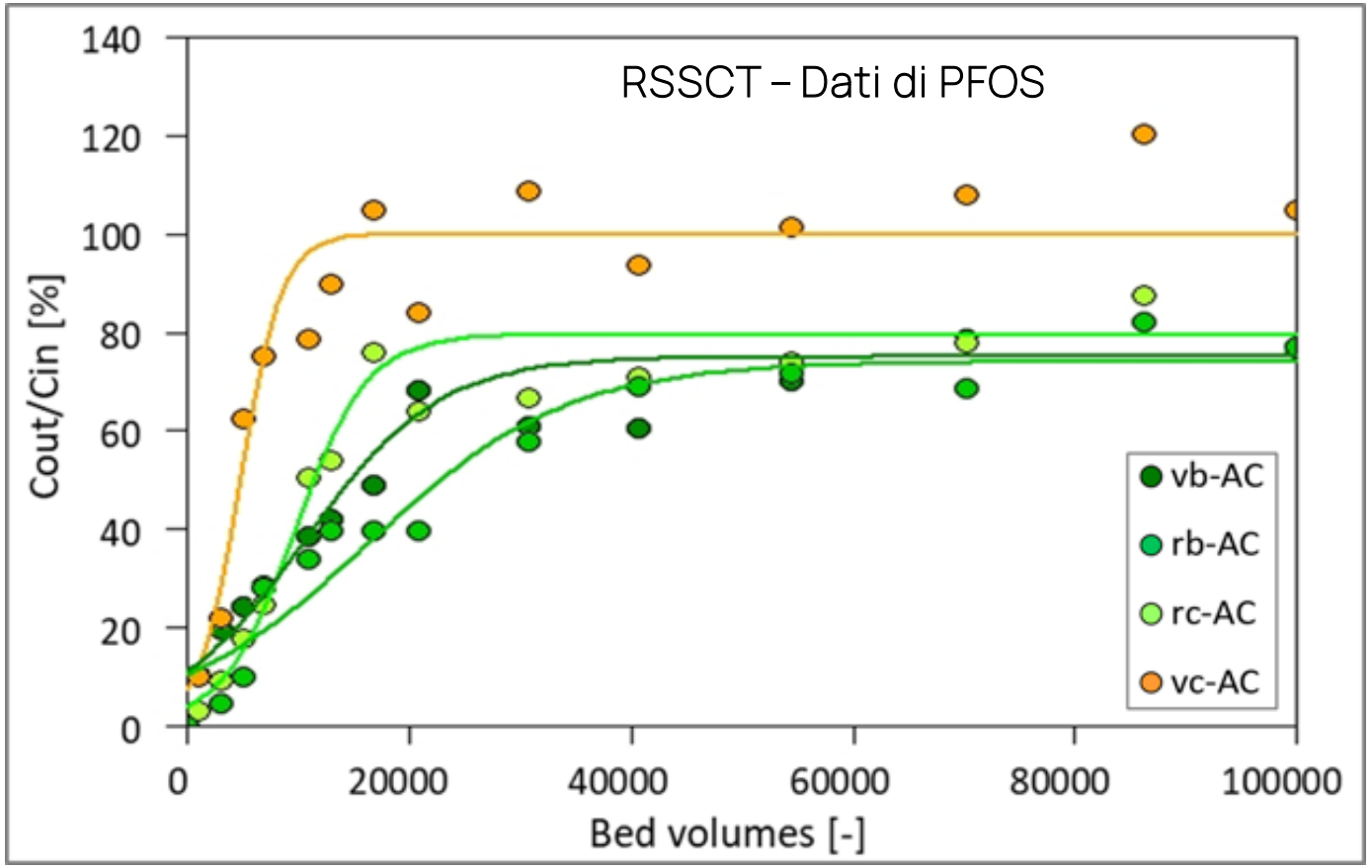
Un esempio: effetto carbone attivo

Acqua destinata al consumo umano

- miscela di 8 PFAS (1 ug/L)
- basso contenuto di sostanza organica (DOC: 5 mg/L)
- diverse tipologie di carbone attivo

Effetto di:

- **tipologia** di carbone attivo (vegetale «c», minerale «b»)
- **carica superficiale** (pH PZC)
- **rigenerazione** (vergine «v», riattivato «r»)



https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148821

Un esempio: effetto configurazione

Acque reflue municipali post-terziario

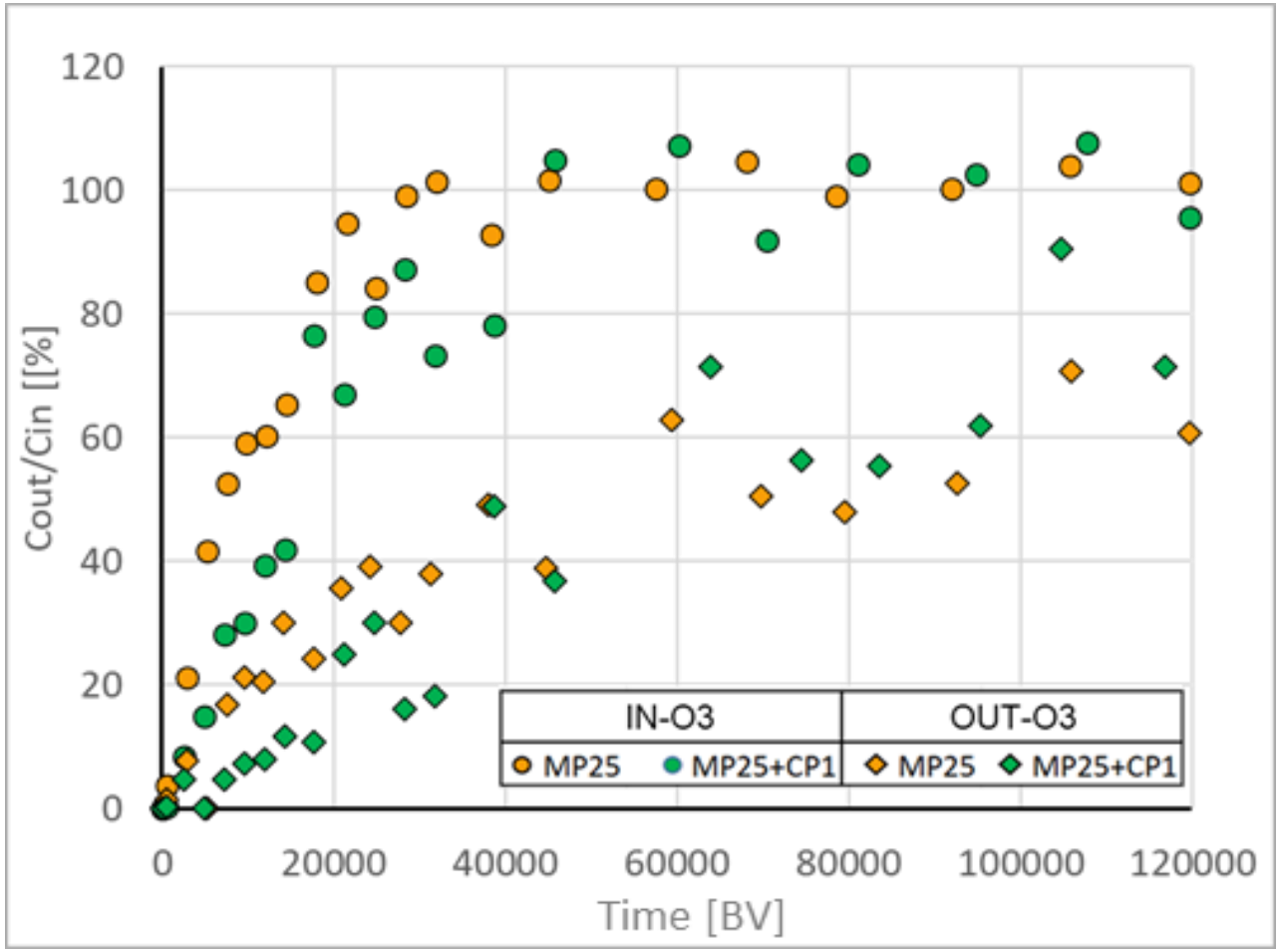
- miscela di 11 PFAS (4 ug/L)
- presenza di sostanza organica (COD: 30-36 mg/L)
- configurazione di processo

Effetto di:

- influenza dell'ozonizzazione come pre-trattamento è maggiore di quella della configurazione lead-lag
- estensione della vita utile del carbone attivo dipende dalla tipologia di PFAS

Allungamento vita utile GAC	
ozonizzazione	+ 50-100·10^3 BV
configurazione lead-lag	+ 10-25·10^3 BV

RSSCT – Dati di PFNA



FANGHILAB
HUB PER LO SVILUPPO DEL TERRITORIO

Il caso delle acque reflue: la UWWTD

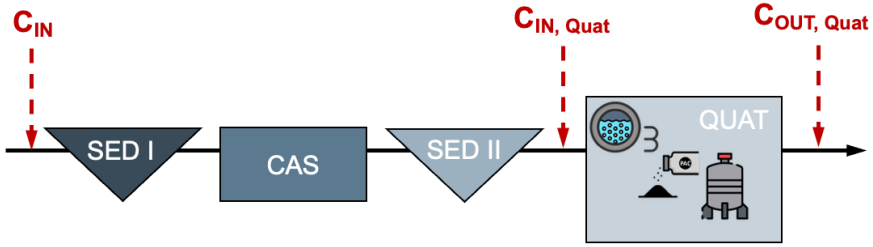
Come dare attuazione alla Direttiva Europea, dato che gli impianti (WWTP) sono principalmente basati sui processi biologici?

È possibile raggiungere il limite dell'80% di rimozione?

- Quali sono le efficienze di rimozione del processo biologico ?
- Quali sono le soluzioni di trattamento quaternario più efficienti e convenienti?

BASELINE

- Qual è il metodo di campionamento più adeguato, considerando anche la facilità di implementazione?

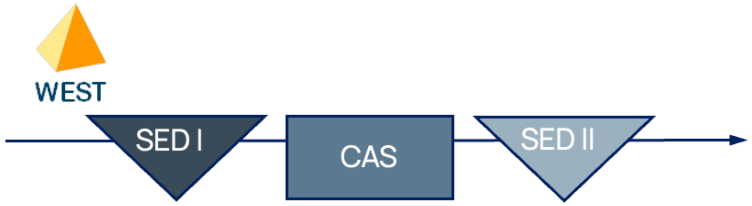


Category 1		Category 2	
Amisulpride	AMS	Benzotriazole	BTR
Carbamazepine	CBZ	Candesartan	CND
Citalopram	CTL	Irbesartan	IRB
Clarithromycin	CLR	Mixture of 4- and 5-Methylbenzotriazole	4MBT 5MBT
Diclofenac	DCF		
Hydrochlorothiazide	HDC		
Metoprolol	MTP		
Venlafaxine	VEN		

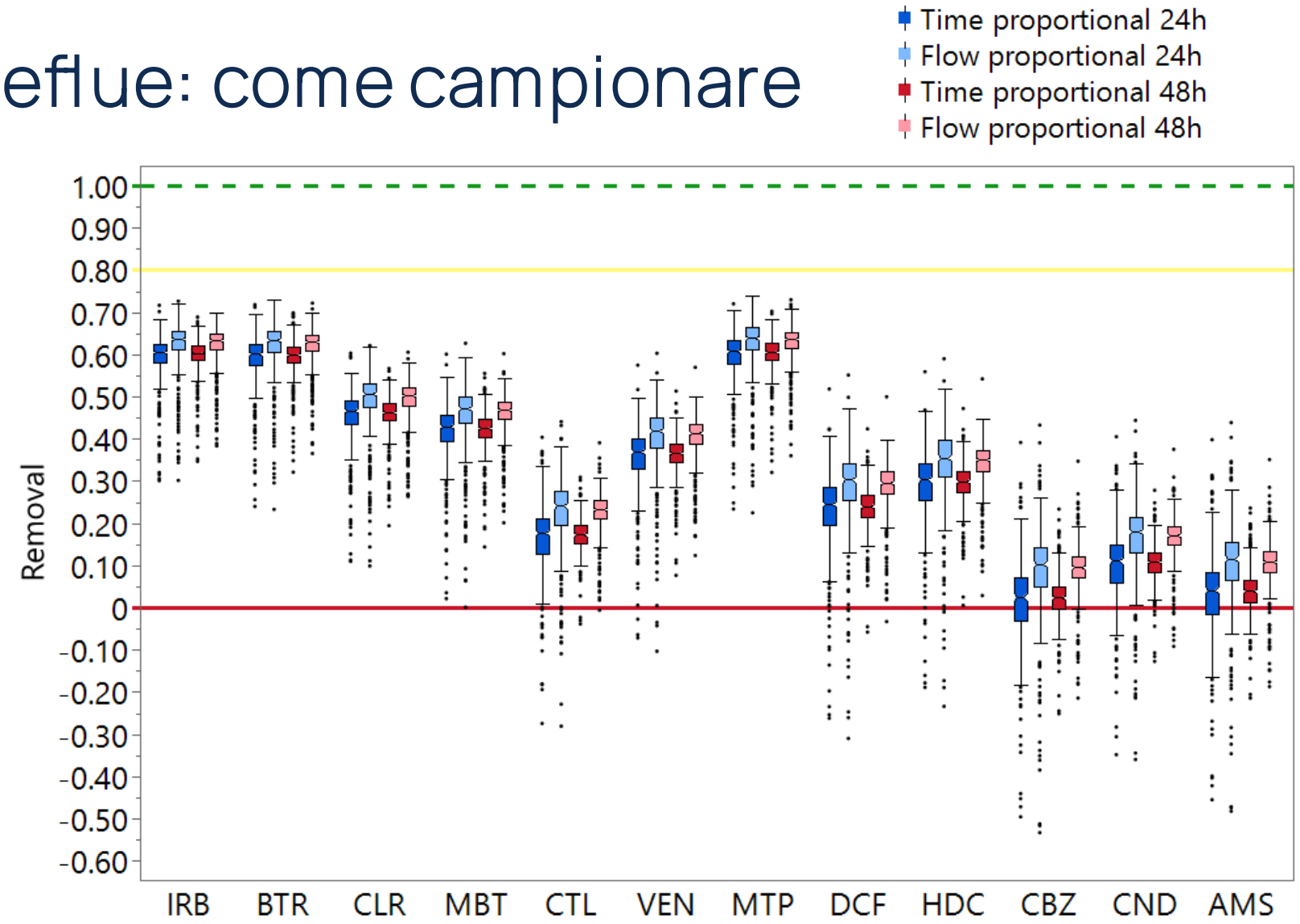
Il caso delle acque reflue: come campionare

Stime di rimozione inferiori con il **campionamento proporzionale al tempo**

Nessuna differenza rilevante tra campioni compositi di 24 h e 48 h



Benchmark Simulation Model 2 (BSM2)
80,000 AE



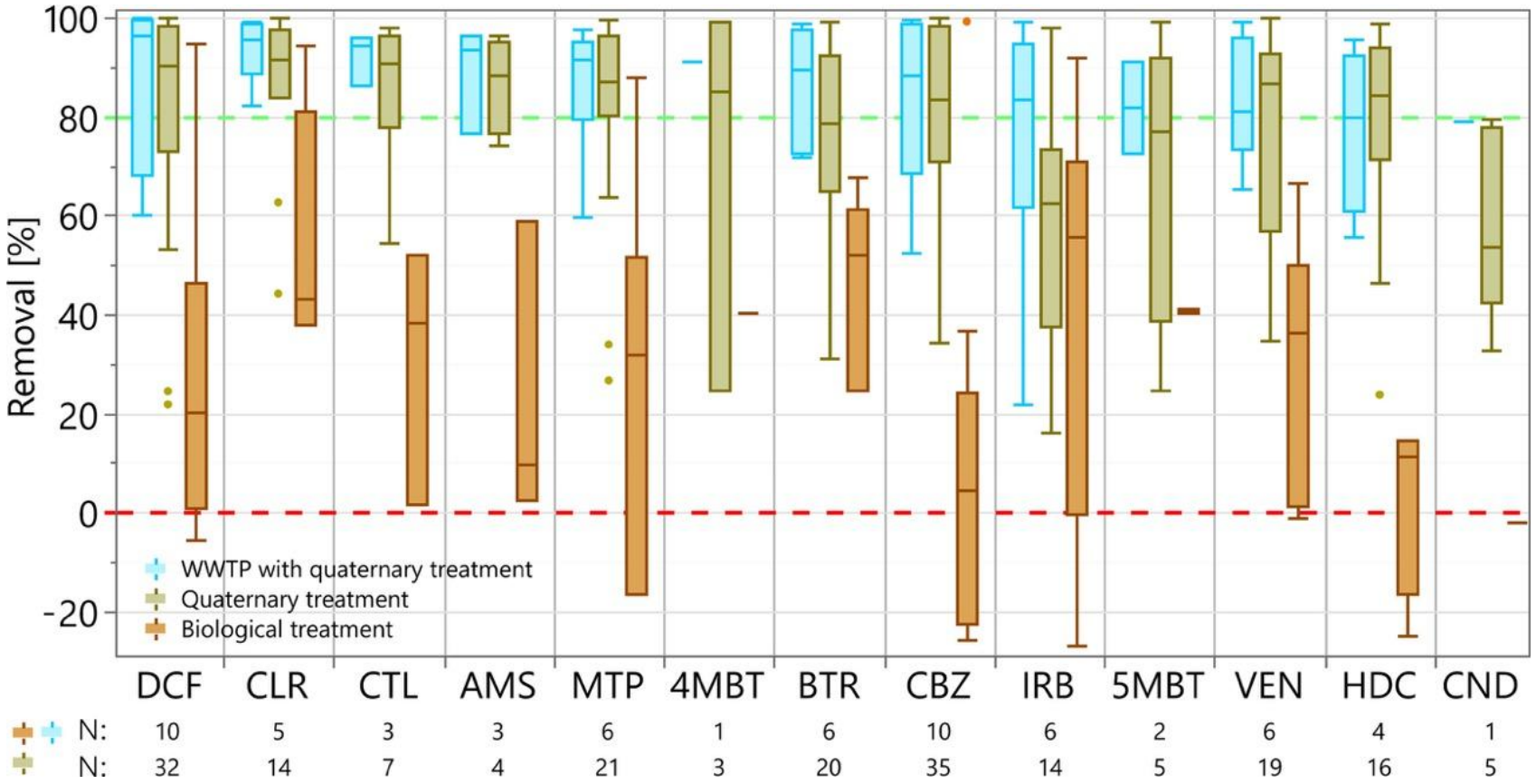
Ianes et al. (2025). Model-based techno-economic analysis of quaternary treatments under the framework of the Urban Wastewater Treatment Directive. PhD thesis, Politecnico di Milano

Il caso delle acque reflue: rimozioni ottenibili

Il processo biologico è adeguato solo per alcuni contaminanti (CLR)

CND e IRB sono i più "refrattari" ai trattamenti quaternari

L'80% di rimozione può essere raggiunto solo in presenza di trattamenti quaternari

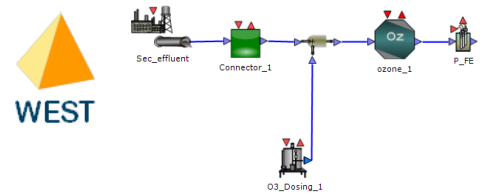


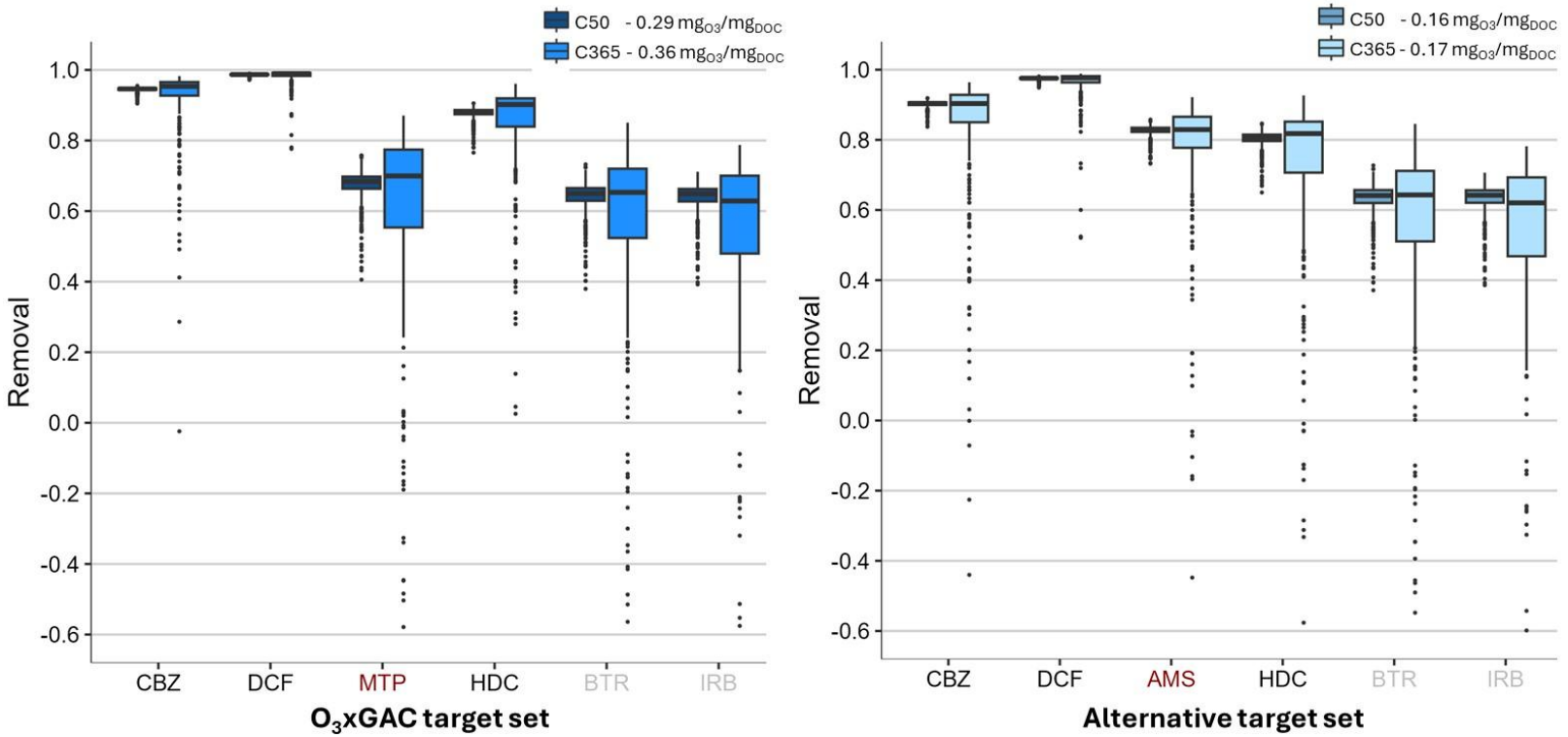
52 studies on full-scale WWTPs (2011-2024)

https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100334

Il caso delle acque reflue: effetto del mix

- La **miscela di MIE** è rilevante per individuare i parametri operativi ottimali e i relativi costi
- La **dose specifica di ozono** (mg O_3/mg DOC) si riduce del 56% sostituendo MTP con AMS

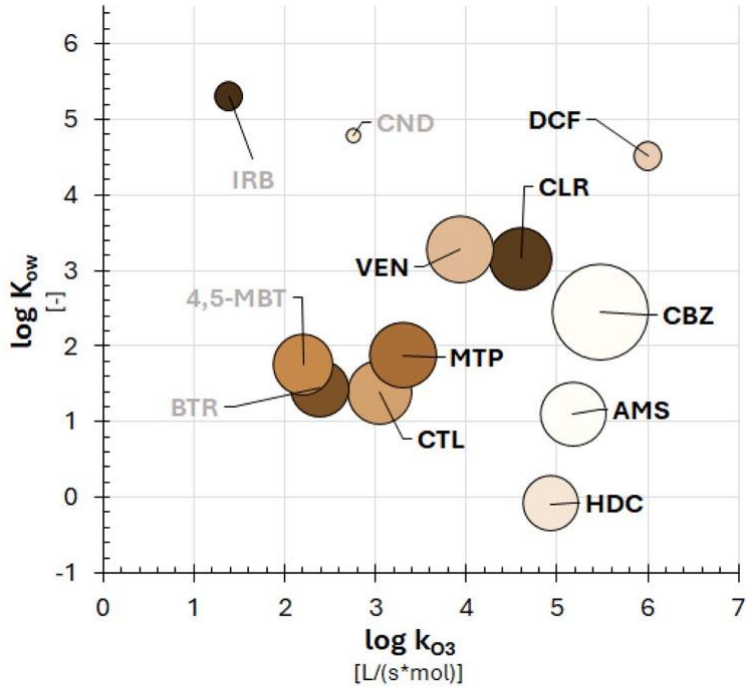


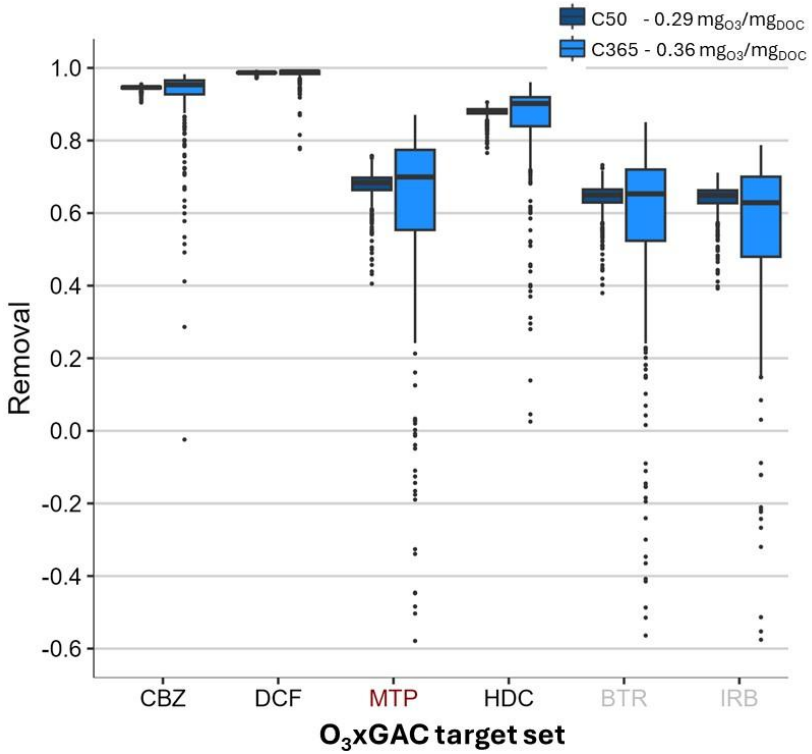


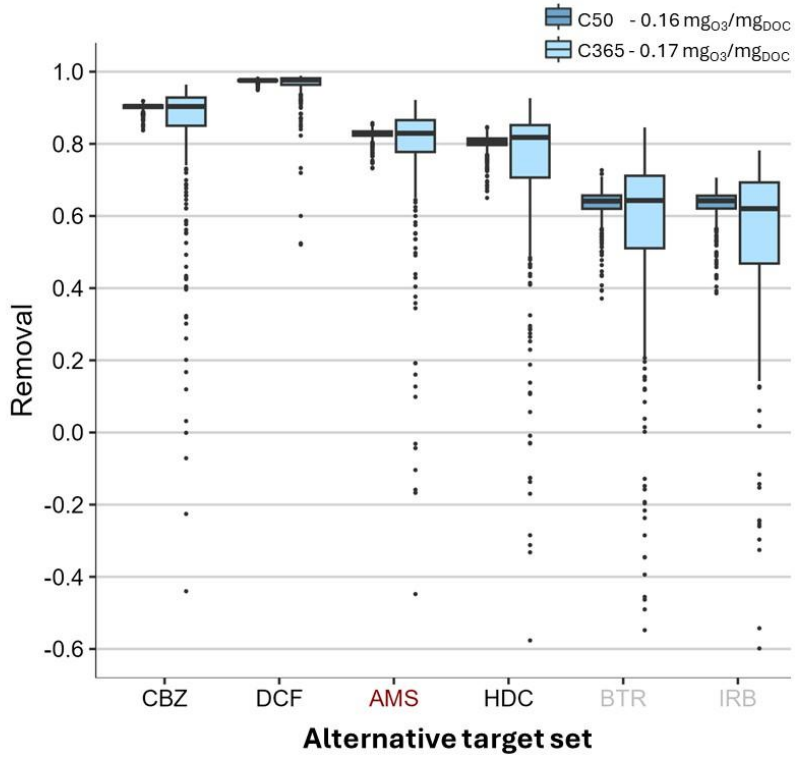
Ianes et al. (2025). Model-based techno-economic analysis of quaternary treatments under the framework of the Urban Wastewater Treatment Directive. PhD thesis, Politecnico di Milano

Il caso delle acque reflue: effetto del mix

- La **miscela di MIE** è rilevante per individuare i parametri operativi ottimali e i relativi costi
- La **dose specifica di ozono** (mg O_3/mg DOC) si riduce del 56% sostituendo MTP con AMS







https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100334

Ianes et al. (2025). Model-based techno-economic analysis of quaternary treatments under the framework of the Urban Wastewater Treatment Directive. PhD thesis, Politecnico di Milano

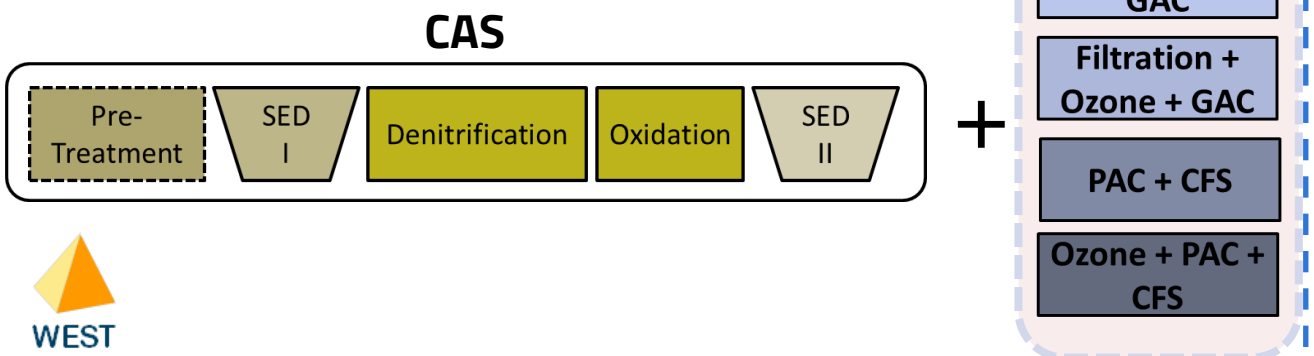
Come e quanto costano i trattamenti quaternari?

REVISIONE DELLA LETTERATURA

52 articoli (dal 2011) relativi al monitoraggio di 89 impianti

+

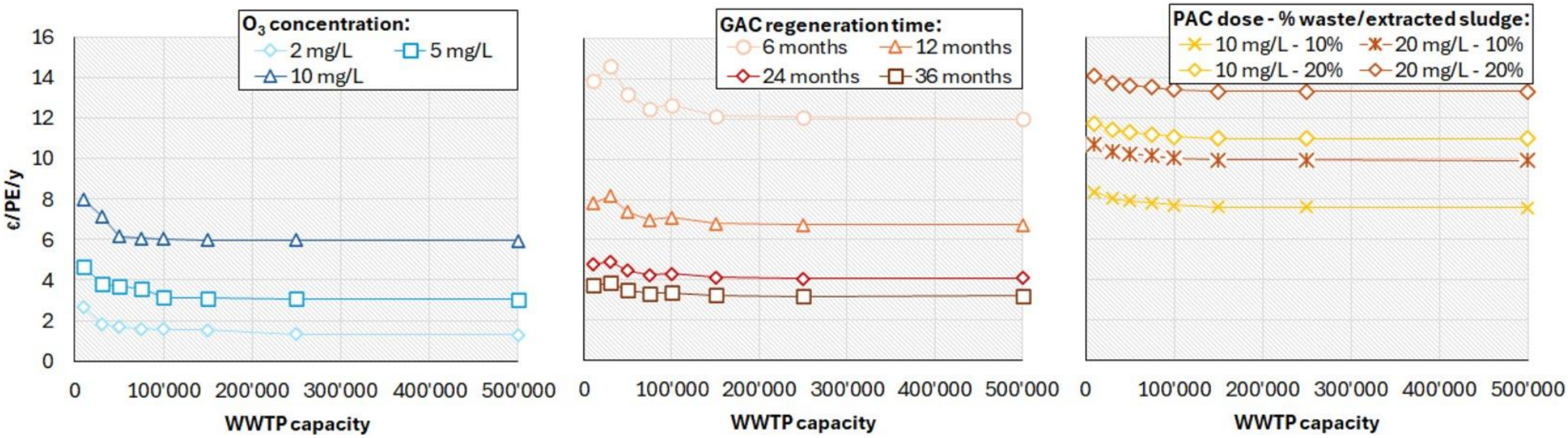
ARCHETYPE WWTP MODEL



	CAPEX	OPEX
OZONE	Ozone generators Ozone destructor Cooling plant Contact tank Installation	Pure oxygen consumption Pure oxygen mainteinance Energy consumption Mainteinance
GAC	Filter columns Pumps/compressors Installation	Regeneration of GAC Fresh GAC GAC disposal Energy consumption Mainteinance
PAC	Contact tnks Separation tanks Mixers Pumps Eventual new sludge line Installation	Fresh PAC $FeCl_3$ Aluminum polychloride Microsand Sludge disposal Energy consumption Mainteinance

La stima dei costi

- Ozonizzazione e adsorbimento su carbone attivo granulare (GAC) sono economicamente sostenibili, con specifici vantaggi e svantaggi
- L'adsorbimento su carbone attivo in polvere (PAC) presenta i costi più elevati



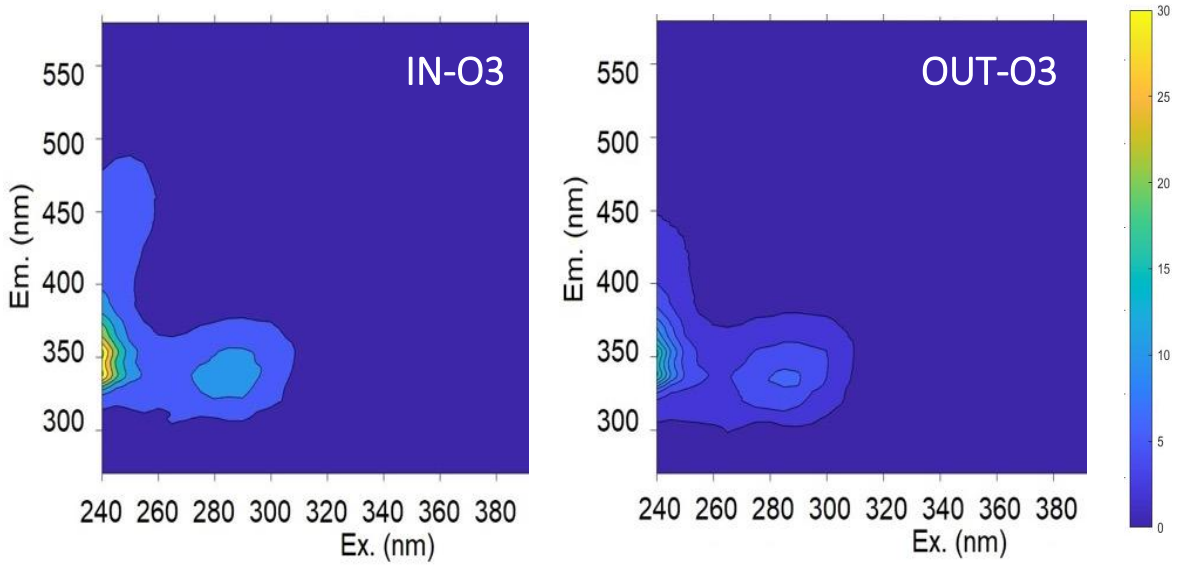
https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100334

Il monitoraggio

Gestire (real-time) i processi attraverso **variabili proxy** considerato che il costo analitico è elevato e le analisi no rapide

- parametri surrogati per i quali è possibile il monitoraggio tramite **strumenti on-line**
- sensori virtuali (**soft sensors**) che sfruttano l'intelligenza artificiale applicata a sensori a basso livello informativo

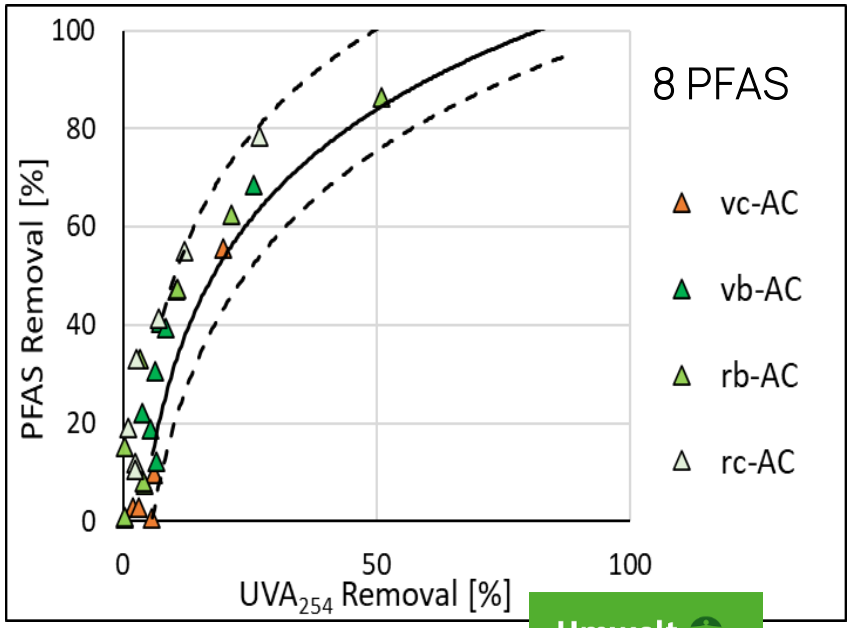
- La rimozione della sostanza organica può essere usata come variabile proxy per il controllo del processo di adsorbimento
- Variabili da monitorare: assorbanza, fluorescenza



Il monitoraggio: alcuni esempi

Efficacie per l'**adsorbimento**, indipendetemente dalla tipologia di carbone attivo, non per l'**ozonizzazione**

Acqua destinate al consumo umano
(sorgente: bank filtration)

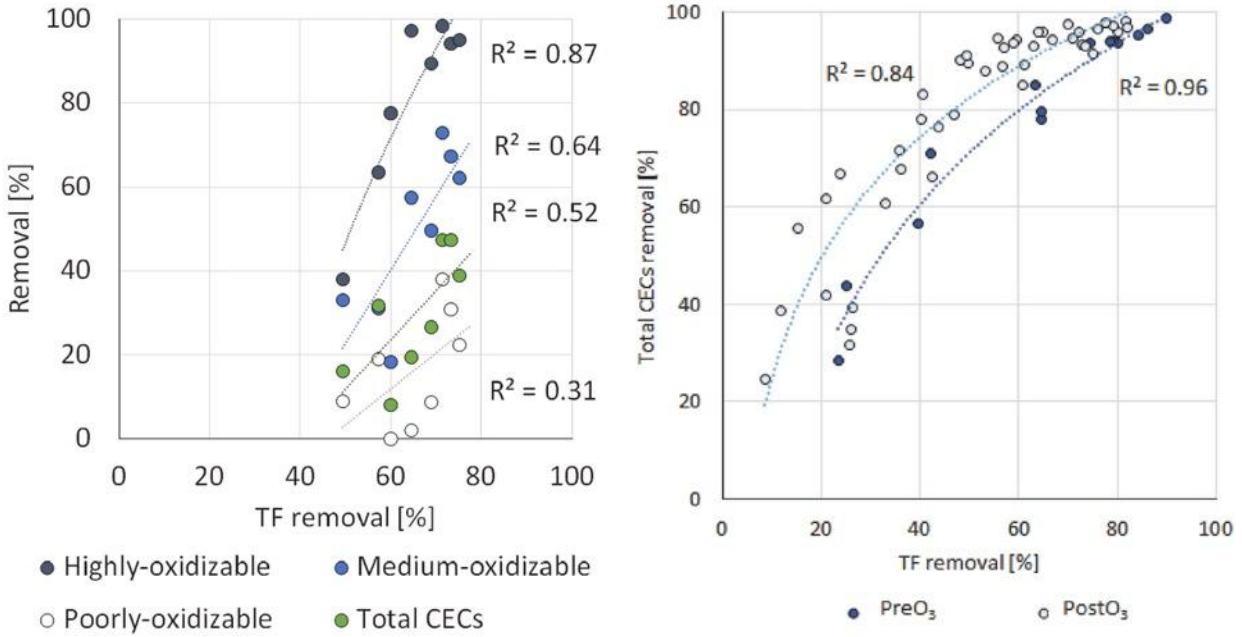


Umwelt Bundesamt

berlin

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148821

Acqua destinate al consumo umano
(sorgente: acqua superficiale)



GRUPPO HERA

https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119537

Take home messages

- Non esiste una soluzione ottimale in assoluto: contaminanti, matrice e condizioni operative determinano efficacia e costi dei trattamenti
- È necessario generalizzare i risultati per superare la dipendenza da studi e modelli sito-specifici
- Trattamento, monitoraggio e costi devono essere valutati in modo integrato per individuare strategie efficaci e sostenibili



POLITECNICO MILANO 1863 | DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Grazie!



Manuela Antonelli

Politecnico di Milano – Department of Civil and Environmental Engineering (DICA)

manuela.antonelli@polimi.it

linkedin.com/in/manuela-antonelli/

