



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
**DIPARTIMENTO SCIENZE DELLA VITA E  
DELL'AMBIENTE**

Corso di Laurea Magistrale in  
**Rischio ambientale e protezione civile**

---

**Gestione sostenibile dei reflui risultanti da  
fenomeni alluvionali**

**Sustainable management of wastewater resulting  
from flood events**

Tesi di Laurea Magistrale

di:

Taggio Felice

Relatore

Chiar.mo Prof

Amato Alessia

Sessione di Ottobre

Anno Accademico 2023/2024

**Volevo fare i miei più sentiti ringraziamenti al Dott. Magrini, responsabile dell'unità ricerca e sviluppo di Newster per il supporto tecnico fornito ai fini dell'identificazione delle apparecchiature e per la costruzione dei bilanci di materia e di energia utili alle analisi di sostenibilità.**

# Indice

1	Introduzione	Pag
1.1	i fenomeni alluvionali	4
1.2	alluvioni e cambiamenti climatici	7
1.3	alluvioni in Italia	10
1.4	rischi legati alle acque reflue da alluvione	12
2	Caso studio	14
3	Studio dello stato dell'arte	17
3.1)	Sistemi per la gestione dei fanghi da alluvione e sostenibilità ambientale	18
3.2)	Sviluppo di processi per il trattamento dei fanghi	24
-	3.2.1 Igenizzazione dei fanghi fecali durante l'emergenza	24
-	3.2.2 trattamento e gestione fanghi con tecnologia a microonde	29
-	3.2.3 Opzioni di fitorimediazione	32
3.3)	Sistemi di trattamento mobile per la gestione di fanghi e acque reflue	37
-	3.3.1 sistemi mobili per trattamento fanghi	37
-	3.3.2 sistemi mobili per trattamento acque reflue	46
4	Obiettivo dello studio	61
5	Materiali e metodi	62
5.1)	Metodologia dell'analisi del ciclo di vita	62
5.2)	Metodologie e software	64
6	Analisi di sostenibilità del trattamento dei reflui stagnanti post-alluvione	65
6.1)	Obiettivo e scopo dell'analisi LCA	65
6.2)	Assunzioni	70
6.3)	Analisi dell'inventario	71
6.4)	Risultati dell'analisi di sostenibilità ambientale	73
6.5)	Risultati dell'analisi di sostenibilità economica	84
7	Conclusioni	87
	Bibliografia	89

# 1) Introduzione

## 1.1) I fenomeni alluvionali

Secondo l'Ispra (2021) le alluvioni sono fenomeni di origine naturale derivanti dall'effetto combinato delle forti piogge torrenziali e la permeabilità dei bacini idrografici, in particolare si tratta di allagamenti temporanei di aree che normalmente non sono coperte di acqua. Quando dopo un'intensa pioggia il suolo è completamente saturo, le successive precipitazioni portano tutto ciò che la falda non riesce a sostenere nel fiume, che esonda spandendosi per tutta la piana alluvionale.

Per il Dipartimento della protezione civile le alluvioni si verificano quando le acque di un fiume non vengono contenute nelle sponde, e quindi si riversano nella zona circostante causando danni a edifici e insediamenti produttivi.

Ci sono state molteplici alluvioni nel corso della storia, quello che si deve sapere e che è la stessa presenza umana a far sì che le alluvioni siano considerate un rischio.

Sono le alluvioni ad aver modellato il territorio che oggi utilizziamo, la rivoluzione agricola che milioni di anni fa ha permesso all' uomo di evolversi da cacciatore ad agricoltore, è avvenuta grazie ai primi insediamenti umani lungo le piane alluvionali di grossi fiumi come il Nilo.

I fiumi portano alla terra con la ciclica esondazione minerali e limo, che rendono la pianura fertile e adatta ad utilizzi agricoli, senza contare che sono un'assicurazione contro l'erosione, trasportando una discreta quantità di sedimenti a mare. (agtecher,2023).

È ciò che viene rimarcato dal rapporto wwf del 2018 in occasione del word water week a Stoccolma.

Secondo questo rapporto, i benefici che possono portare i fiumi non riguardano solo l'apporto energetico, ma anche contributi all' agricoltura, alla pesca, alla difesa da eventi estremi.

Per molte religioni i fiumi hanno un ruolo centrale, in particolare quelli liberi da sbarramenti possono portare a una serie di benefici (figura 1), con i seguenti dati:

-2 miliardi di persone contano sui fiumi per l'acqua potabile

-500 milioni di persone vivono sui delta che mantengono il loro stato grazie ai sedimenti trascinati a valle dai fiumi

-il 25 % della produzione alimentare mondiale dipende dall'irrigazione dei fiumi

-ogni anno vengono pescate 12 milioni di tonnellate di pesci d'acqua dolce che sono il principale mezzo di sussistenza per milioni di persone.

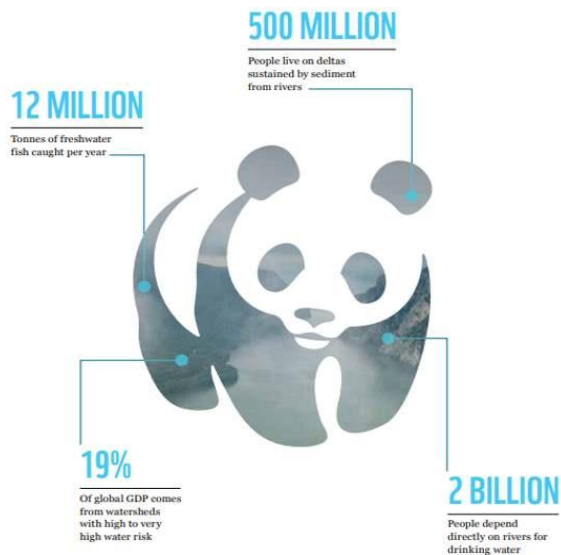


Figura 1 locandina rapporto wwf 2018

Lo sviluppo urbano molto spinto a cavallo degli anni '60 e le conseguenti opere di ingegneria idraulica, ci hanno resi più fragili di fronte a questi eventi ricorrenti ma tutto sommato prevedibili, l'elevata impermeabilizzazione e antropizzazione del territorio impediscono l'infiltrazione della pioggia nel terreno.

Si è tolto spazio necessario ai bacini imbriferi per assorbire acqua e con barriere, argini e dighe siamo andati in un certo senso ad "aggiustare" quello che era il normale percorso fluviale.

Il risultato è un aumento del volume di acqua che i fiumi devono contenere e una diminuzione della loro capienza a causa dell'aumento del letto di sedimenti, che non arrivano più a mare. (Dipartimento di protezione civile,2018)

## 1.2) Alluvioni e cambiamenti climatici

La seconda sezione del 6° *assessment* report dell'IPCC (Figura 2) tratta in maniera specifica il rischio idraulico nei prossimi anni, in particolare si sofferma sulla carenza idrica e sul pericolo alluvioni.



Figura 2 Report IPCC <https://cittaclima.it/2023/03/20/pubblicato-il-sesto-rapporto-ipcc>

Negli ultimi 50 anni, il 44 % dei disastri climatici ha a che fare con inondazioni, circa un miliardo di persone vive in zone più umide del solito, dove cade ogni anno una quantità di pioggia che decenni fa poteva cadere una volta ogni sei anni.

Tra il 1970 e il 2019, le alluvioni sono state responsabili di 1/3 di tutte le perdite economiche dovute a disastri climatici, il report cita anche casi recenti come l'alluvione in Europa centrale, in Cina (Hubei), le piogge torrenziali in Brasile, e gli allagamenti in Australia nel 2021.

Tutti questi eventi accaduti in un solo anno avvalorano le ipotesi degli scienziati sulla correlazione tra aumento in frequenza di inondazioni e periodi siccitosi, e cambiamenti climatici (Report IPCC, 2023).

Secondo il report tecnico pubblicato dal C40, organizzazione mondiale fra 40 grandi città, entro il 2050, i danni economici derivanti dalle alluvioni raggiungeranno i 19 miliardi di dollari annui, con un volume di inondazioni pari a 10.5 m<sup>3</sup> all'anno (figura 3 locandina presa da C40 cities Water Safe Cities).



Figura 3 locandina C40 Cities

A tutto questo vanno aggiunti danni di tipo sociale e urbano, con 7.4 milioni di persone in aree a rischio (principalmente nel sud-est asiatico, rappresentato in Figura 4) dove vi è una maggiore vulnerabilità sociale) che saranno esposte a inondazioni ogni anno, e danni urbani alle infrastrutture di circa 64 miliardi di dollari ogni anno (principalmente nelle città nordamericane dove vi è un alto valore dell’immobile).



Figura 4 immagine presa da report C40 cities

Il report pone enfasi sulle misure per affrontare queste situazioni.

Molte città adottano piani per la gestione di nubifragi che permettono di ridurre notevolmente i costi per future ricostruzioni.

Negli ultimi anni, violenti acquazzoni hanno colpito duramente le stazioni di metropolitana di Washington DC, Madrid e Parigi, con simulazioni che mostravano come l'allagamento di un solo corridoio ferroviario poteva distruggere il 70 % dei treni della città.

Considerato quanto sia grave la minaccia, per gli Stati Uniti investire “1 dollaro in azioni di resilienza può far risparmiare 318 dollari di danni”.

Un'altra città che si sta attivando è Lagos, che promuove una politica sostenibile sulla depavimentazione, sull'uso di superfici impermeabili, e sulla sensibilizzazione della comunità.

La situazione sta peggiorando, togliendo spazio ai fiumi, con dati che dimostrano un aumento del consumo di suolo maggiore rispetto al passato, superando la soglia di 2 metri quadrati al secondo e sfiorando i 70 chilometri quadrati di nuovi insediamenti in un anno (ISPRA, 2022).

Viviamo in un paese con forti rischi sia idraulici che idrogeologici, l'aumento di questi eventi estremi che prima si verificavano in archi temporali molto più lunghi dovrebbe spingere a piani e progetti per aumentare la sensibilità verso il nostro territorio .

### **1.3) Alluvioni in Italia**

In Italia il rischio è assai maggiore rispetto ad altri paesi, complice la naturale conformazione territoriale.

Ad aggravare la situazione è la presenza di un costante rischio idro-geologico, fenomeno di per sé esasperato e indotto dalle continue esondazioni, dalle piogge intense seguite a periodi siccitosi, e alla presenza antropica.

Come riportato dal report del CNR e Istituto di ricerca per la protezione idrogeologica, le inondazioni sono eventi assai diffusi in Italia causando ogni anno molte vittime.

Tale vulnerabilità è dovuta principalmente alla scarsa consapevolezza del rischio, unita all'alta frequenza con la quale questi fenomeni si sono succeduti in passato.

Nel tempo sono state raccolte e censite tutte le informazioni passate, organizzate in archivi digitali e pubblicate su siti web.

In questo modo si è potuto dare alla popolazione una visione più ampia sul rischio in Italia, soprattutto attraverso il racconto dei tragici eventi che sono avvenuti dal 1951 al 2018.

Tra quelle più importanti troviamo quella del Po nel Polesine (1951) e dell'Arno (1966) a Firenze(Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica,2019).

Secondo i dati riportati da Legambiente risalenti all'anno 2022, in Italia a causa dei cambiamenti climatici, la frequenza di fenomeni estremi è decisamente aumentata, da gennaio a settembre 2022 sono state registrate 62 alluvioni. La recente alluvione nelle

Marche è un chiaro campanello d'allarme, considerando che il numero delle alluvioni registrato nell'arco degli ultimi anni, in particolare dal 2010 al 2022 è di 510.

Nel nostro territorio sono inoltre frequenti alluvioni che si verificano in prossimità di piccoli bacini idrografici, a causa di precipitazioni molto intense, localizzate e con tempi di sviluppo di piena di qualche ora (Dipartimento di protezione civile,2018).

Dal 2010 ad ottobre 2023, secondo quanto riportato da mappa di città clima (Rapporto città clima Legambiente), sono stati registrati 684 allagamenti da piogge intense, 166 alluvioni fluviali e 86 frane causate da piogge (figura 5 locandina città clima).

In 10 anni (dal 2013 al 2023), il nostro paese ha speso più di 13,8 miliardi di euro in fondi per la gestione di queste emergenze meteo-climatiche, e i dati della protezione civile mostrano come da maggio 2013 a settembre 2023, ci siano stati 141 casi, che continueranno ad aumentare nei prossimi anni (nel 2020 erano 103).

Tra le regioni più colpite da allagamenti troviamo Sicilia (86 casi), Lazio (72), Lombardia (66), Emilia-Romagna (59), Campania e Puglia (49) e Toscana (48).

Per le esondazioni fluviali troviamo la Lombardia con 30 casi, seguita dall' Emilia-Romagna con 25 e Sicilia con 18(Osservatorio nazionale città clima,2023).

Ma anche molte città ne risentono di più rispetto ad altre; In 14 anni a Roma si sono verificati 49 allagamenti da piogge intense, Bari ne ha avuti 21, Agrigento ha avuto 15 casi, Palermo ne ha avuti 12, per finire Ancona, Genova e Napoli con 10 casi(Osservatorio nazionale città clima,2023).

Sempre riguardo le principali città metropolitane, Milano ha avuto almeno 20 esondazioni dei fiumi Seveso e Lambro, a cui ne seguono 4 a Sciacca (Ag) e Genova e 3 a Senigallia.

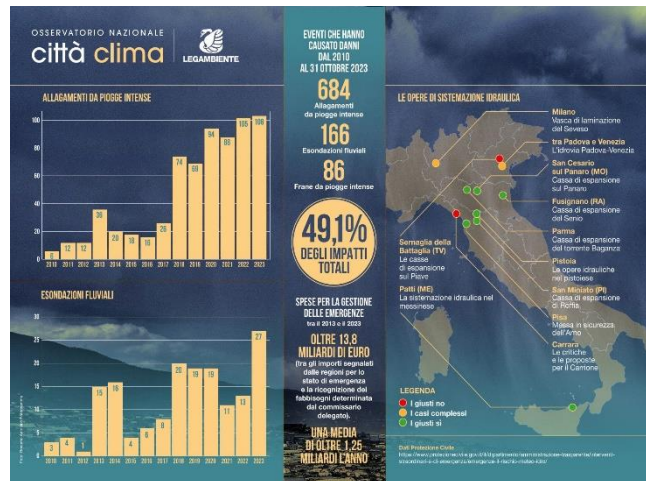


Figura 5 locandina città clima <https://cittaclima.it/2023/11/27/rapporto-citta-clima-2023-speciale-alluvioni/>

Gli ultimi due eventi verificatosi, sono le due alluvioni dell’Emilia-Romagna tra il 3 e 4 maggio e tra il 15 e il 17 maggio 2023.

L’ultima delle due è stata la più grave, e ha coinvolto 44 comuni in modo particolare le provincie di Ravenna, Forlì-Cesena, Rimini e Bologna.

I danni in termini economici e di vite umane ammontano a molte strade e ferrovie chiuse, e 15 vittime oltre le 3 dell’ondata del 3 e 4 di Maggio 2023.

#### 1.4) Rischi legati alle acque reflue da alluvione

I rischi per l’uomo che può portare un’alluvione possono essere ben visibili, come il semplice annegamento, infarto, ipotermia, lesioni e ferite a seguito di impatto con oggetti contundenti. Tuttavia, abbiamo anche rischi indiretti più legati al rischio sanitario, e che si manifestano in un periodo successivo all’esondazione.

Infatti, a seguito di questo evento calamitoso i condotti fognari con le acque reflue tendono a straripare aumentando la probabilità di contrarre infezioni come: ***norovirus***, ***epatite A***, ***rotavirus***, ***Cryptosporidium***, ***Giardia*** e infezioni batteriche dovute a

*Campylobacter, Escherichia coli, Salmonella*. Portando a un aumento di di malattie gastrointestinali, dermatiti, congiuntiviti. (European Climate and Health Observatory,2024). La gestione, la raccolta, il trattamento e lo smaltimento impropri delle acque reflue comporteranno l'inquinamento delle fonti idriche locali con agenti patogeni. Ciò può causare numerose malattie trasmesse dall'acqua e da vettori (ad esempio, malaria e filariosi) fornendo luoghi di riproduzione per i vettori e favorisce la diffusione di parassiti (ad esempio, nematodi o *Ascaris lumbricoides*). Le acque reflue scaricate in modo incontrollato nell'ambiente possono portare a diverse malattie trasmesse dall'acqua che rappresentano una minaccia per la vita umana, soprattutto nei paesi in via di sviluppo.

La presenza di acqua stagnante va inoltre ad aumentare la massiccia presenza di zanzare, e con esse le malattie trasmissibili all'uomo.

Uno studio condotto nel 2013 (Therpong et al,2013), ha preso in considerazione diverse banche dati raccolte dalla biblioteca nazionale di medicina degli Stati Uniti, siti web dell'OMS e CDC (Centro per il controllo e prevenzione di malattie, 2013).

Lo scopo era quello di determinare gli effetti immediati e sul lungo termine a seguito di un'alluvione, che possono portare problemi ai sistemi sanitari pubblici, con insorgenza per contatto con acque stagnanti e contaminate di malattie della pelle, e di fornire ai medici e dermatologi tutte le informazioni su irritazioni, infezioni batteriche e fungine, lesioni e traumi della cute durante il periodo di emergenza.

Sono state individuate quattro tipologie di malattie della cute: infiammazione della pelle (dermatiti), infezioni, lesioni traumatiche.

Le dermatiti derivano da penetrazione di sostanze chimiche e irritanti attraverso la barriera permeabile, che causano il rilascio di mediatori infiammatori. L'esordio dei sintomi può arrivare da pochi minuti a giorni, a seconda della concentrazione delle

sostanze irritanti e del tempo di esposizione, con irritazioni solitamente su mani e piedi e chiazze eritematose sulle zone esposte.

I sintomi più evidenti inizialmente sono prurito, dolore, bruciore, pizzicore, seguiti da infezioni secondarie per esposizione prolungate.

Per infezioni da funghi, l'area del corpo maggiormente colpita sono i piedi, con formazione di eritemi, vesciche e pustole di tipo vescicolare o a mocassino.

Le infezioni batteriche sono caratterizzate inizialmente da fenomeni di rossore e gonfiore che si evolve in vescicole e bolle emorragiche, e occasionalmente si possono avere infezioni estese con cancrena e setticemia. Successivamente, in caso di ferite contaminate, entrano in gioco altri batteri responsabili di infezioni batteriche secondarie.

Le malattie della pelle riscontrate in questo articolo mostrano come ci siano delle relazioni tra tali patologie e fattori ambientali come la gravità del disastro. (Therpong et al,2013 ).

## **2) Caso studio**

L'ondata di maltempo straordinario che ha colpito i 44 comuni delle province di Ravenna, Forlì-Cesena, Rimini, Bologna, Modena e Reggio Emilia; Oltre alle pesanti esondazioni ha prodotto un volume di fanghi e rifiuti pari a 150.000 m<sup>3</sup>, con un volume di esondazione pari a 350 milioni di metri cubi di acqua su una superficie di 540 km<sup>2</sup>.

I servizi ambientali di Hera ed Herambiente, società del gruppo Hera, hanno avuto come obiettivo iniziale quello di trovare posto all'enorme quantità di rifiuti che uscivano dalle case, dalle aziende e dai negozi.

Sebbene gli impianti messi a disposizione dal gruppo Hera siano stati dedicati quasi esclusivamente alla gestione dei rifiuti, la capacità non era comunque sufficiente a causa dell'enorme quantità prodotta. L'operazione è stata quindi divisa in due fasi: nella prima

fase sono state individuate delle piazzole temporanee di deposito vicine ai centri abitati, per consentire ai 250 mezzi di raccolta, tra cui idrovore, autospurghi, motopompe, di essere rapidi ed efficaci; Nella seconda fase si sono realizzati stoccaggi autorizzati in grandi aree individuate il più lontano possibile dai centri abitati, molte di queste non erano di dimensioni sufficienti e quindi alcune sono state realizzate ex-novo grazie alla collaborazione tra Hera e altri fornitori sul territorio.

Il traffico di rifiuti ha superato i 100 viaggi al giorno da oltre 20 piazzole verso le aree di secondo livello con flussi in ingresso e in uscita 24 ore su 24. Dalle aree di secondo livello i rifiuti alluvionali sono stati avviati alle destinazioni finali di recupero e smaltimento. Ciò che non è stato possibile recuperare è stato ridotto volumetricamente, in modo da permettere la gestione in impianti di depurazione, discariche o termovalorizzatori. La fase di trasporto dei rifiuti negli impianti ha richiesto inoltre la presenza di varie decine di operatori, coinvolti in modo continuativo per 10 settimane. Le aree di stoccaggio dove sono stati depositati i rifiuti alluvionali (Herambiente, 2023) sono le seguenti:

Area di stoccaggio Forlì, via Grigioni 28

Area di stoccaggio Forlì, presso impianto Piattaforma Ecologica Attrezzata via Grigioni 19 Forlì (FC) Area di stoccaggio di Bologna, presso impianto “Stazione Trasferimento”, via Stradelli Guelfi 73/A Bologna (BO)

Area di stoccaggio di Rimini, presso impianto di “selezione per recupero di materia”, via Raibano 32, Coriano (RN) Area di stoccaggio di Ravenna presso l'area industriale di Ravenna "Baiona", via Baiona angolo via Baiona Area di stoccaggio di Mezzano di Ravenna, via Strada Statale 16, presso via Stazione, lato ferrovia presso Stazione FFSS di Mezzano (RA) Area di stoccaggio di Ravenna strada statale Romea, km 2,6, Ravenna (RA)

Area di stoccaggio di Ostellato, presso impianto di compostaggio e biostabilizzazione, sito in comune di Ostellato, località San Giovanni  
Area di stoccaggio di Russi, frazione di San Pancrazio

Area di stoccaggio di Faenza, via Sant'Andrea.

Da queste aree, come detto precedentemente, ciò che non può essere recuperato viene ridotto volumetricamente, e trasportato al termovalorizzatore di Imola, o alla discarica Tremonti di Imola o alla discarica di AIMAG (MO).

I reflui alluvionali, oggetto di studio, sono stati classificati come rifiuti urbani con codice 20 03 99 secondo l'ordinanza n. 66 emanata a seguito dell'emergenza: **“I rifiuti derivanti dagli eventi alluvionali, provenienti da edifici pubblici e privati, compresi anche i fanghi, i rifiuti liquidi di cui all'articolo 110, comma 3, lettere a), b) e c) del Decreto Legislativo n. 152/2006, nonché dallo spazzamento delle strade, dalla pulizia degli argini, delle griglie, delle fosse settiche, ovvero portati dai corsi d'acqua in piena ovvero giacenti sulle spiagge, sono classificati come rifiuti urbani. Ai rifiuti solidi urbani indifferenziati è attribuito prevalentemente il codice EER 20.03.01, ovvero 20.03.07 per i rifiuti ingombranti, ferma restando la possibilità di attribuire il codice EER 20.03.99 ove ne ricorrano le condizioni. Ai rifiuti liquidi sopra richiamati sono attribuiti i codici EER 20.03.04 e 20.03.06. Ai fini dei conseguenti adempimenti amministrativi, il produttore dei rifiuti urbani prodotti a seguito dell'alluvione è il Comune di origine dei rifiuti stessi”**(Gestione rifiuti alluvione , 2023). Sempre secondo questa ordinanza tutti i fanghi , così come altri rifiuti urbani, sono stati portati negli impianti delle aree di stoccaggio gestite dai titolari presenti sul territorio regionale, dove tramite dei mezzi mobili viene effettuata la compattazione. Successivamente con l'ordinanza successiva, la numero 67, viene stabilito che i fanghi possono cessare di essere qualificati come rifiuti, se a seguito di ispezione visiva o di cernita non ci sia la

presenza di contaminazioni (ad esempio da idrocarburi), nonché di rifiuti estranei (quali ad esempio carta, legno, plastica, metalli e rifiuti pericolosi), oppure presentano le caratteristiche per essere utilizzati per la realizzazione di rilevati e sottofondi stradali e di piazzali, copertura di discariche, riempimenti, sistemazioni agrarie, tombamenti di cave e ripristini geomorfologici (Gestione rifiuti alluvione, 2023).

Essendoci stati dei miglioramenti dei principali parametri monitorati nelle acque e la mancanza di una contaminazione persistente da sostanze pericolose, i reflui liquidi sono stati verosimilmente rientrodotti nei condotti fognari, in corpi idrici superficiali e in mare, dove la diluizione ha permesso di ridurre la concentrazione di sostanze pericolose, mentre non si hanno informazioni su eventuali sistemi per la riduzione di patogeni come *Escherichia Coli*.

Considerati i fanghi e i reflui le maggiori criticità in questo contesto, sono state identificate possibili soluzioni per la gestione sostenibile dei fanghi e la disinfezione delle acque reflue, nel paragrafo 3 dedicato allo stato dell'arte.

### **3) Studio dello stato dell'arte**

Nella letteratura scientifica sono stati identificati tre macro gruppi di lavori che trattano la gestione dei fanghi da alluvione: quelli riferiti alla sostenibilità ambientale della gestione, quelli riferiti alla degradazione della sostanza organica e ai patogeni, e tutti quei sistemi innovativi e mobili progettati dalle aziende per poter garantire supporto ai sistemi di trattamento tradizionale in situazioni di emergenza.

### 3.1) Sistemi per la gestione dei fanghi da alluvione e sostenibilità ambientale

A differenza degli studi citati più avanti, Il primo articolo ricavato dallo stato dell'arte non affronta il vero e proprio trattamento, ma riguarda un'analisi di Life Cycle Assessment (LCA) per indirizzare i principali stakeholders nella scelta del trattamento più sostenibile e rapido in emergenza. (Amato et al.).

Gli aspetti di sostenibilità affrontati da Amato et al. , si pongono come obiettivo la gestione dei reflui e dei rifiuti originati da eventi alluvionali, tenendo in considerazione gli aspetti ambientali ed economici per sostenere le scelte dei principali decisori in fase emergenziale.

Per fare questo, è stata svolta un'analisi LCA su tutto ciò che può essere energia, materia e impatti di un sistema di gestione dei reflui di un'alluvione.

Da questa indagine si è andati a determinare l'unità funzionale, che è il prodotto su cui è stata impostata l'analisi e a cui è stato assegnato un valore di 10,000,000 kg di rifiuti solidi urbani.

Per poter infine determinare la gestione più sostenibile a livello economico e ambientale, sono stati definiti i confini del sistema dove sono stati inseriti tre scenari corrispondenti a una diversa gestione. (figura 6).

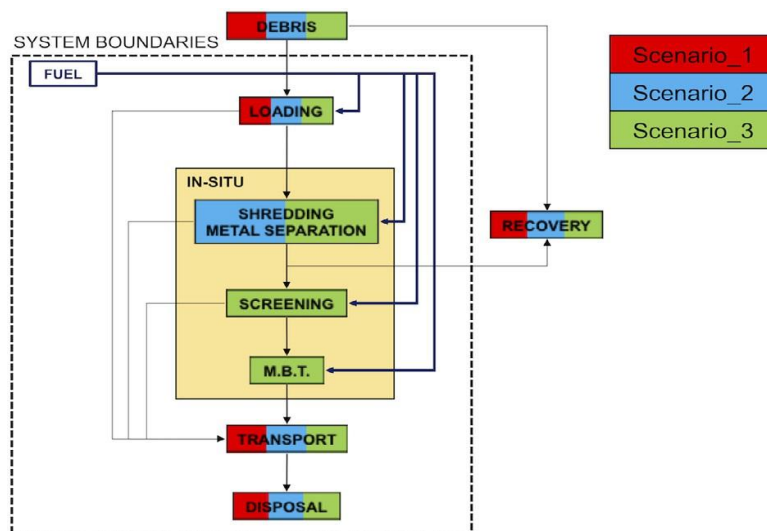


Figura 6 Schema confini del sistema “Disaster waste management after flood events”

Prima di ogni scenario è stata effettuata una raccolta differenziata preliminare, a cui segue:

-Scenario 1: I materiali sono stati solamente caricati e trasportati in discarica per lo smaltimento (tempo di recupero dell'area molto veloce)

-Scenario 2: I materiali sono stoccati temporaneamente in situ, per poi subire un processo di triturazione (minor costo di trasporto);

-Scenario 3: I materiali subiscono oltre un processo di triturazione, una vagliatura per separare la frazione sopravaglio da quella sottovaglio, e un trattamento meccanico-biologico con biostabilizzazione e bioessiccamento (minor impatto ambientale e riduzione volumi più efficiente).

Per ogni fase dei tre scenari sono stati quantificati anche i consumi, riferiti all' unità funzionale.

Grazie al software GABI(figura 7), i dati raccolti sono stati usati per produrre processi di energia e di materie prime, convertendoli in carichi ambientali per diverse categorie di impatto .

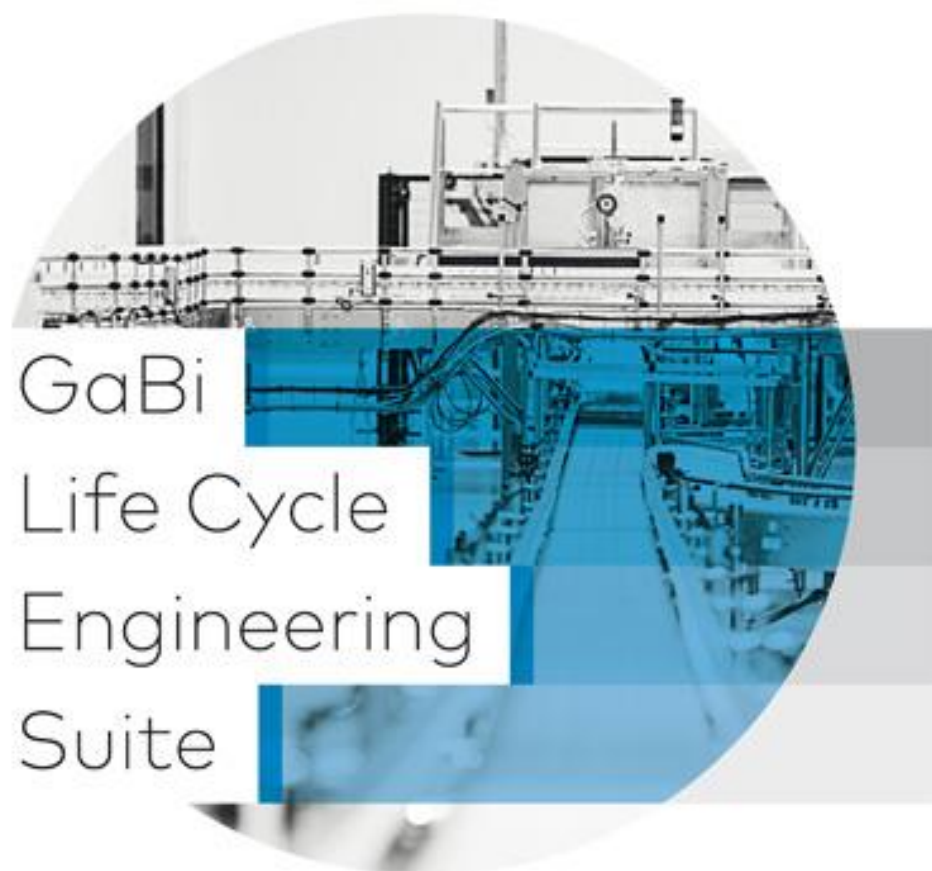


Figura 7 <https://www.thinkstep.it/software-di-life-cycle-assessment-gabi/>

Sono state quindi determinate le categorie di impatto (Figura 8) più significative nella fase di classificazione.



Figura 8 categorie di impatto in analisi LCA <https://www.niering.it/life-cycle-assessment-lca/>

Dai risultati della classificazione e caratterizzazione (figura 9), è emerso che generalmente in tutte le categorie, lo smaltimento in discarica è l'opzione meno sostenibile dal punto di vista ambientale, con l'eccezione delle categorie relative all'acidificazione e all'eutrofizzazione, dove il trattamento meccanico-biologico ha portato a delle emissioni di NOX.

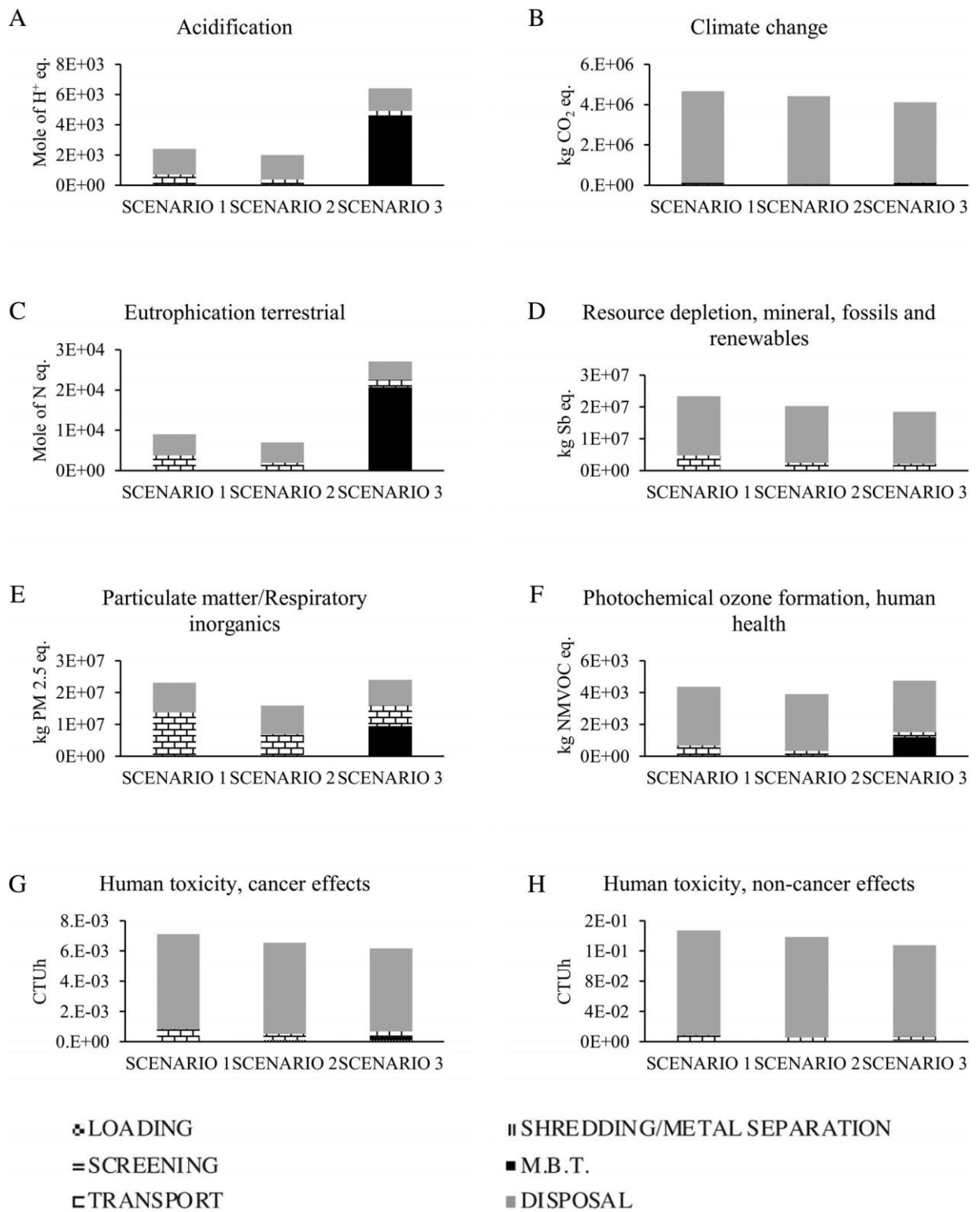


Figura 9 categorie di impatto e carichi ambientali “Disaster waste management after flood events”

Essendo categorie tutte diverse tra loro, è stata infine effettuata una normalizzazione e pesatura.

Alla fine, il *climate change* si è rivelata la categoria più impattante.

Per quanto riguarda l'analisi economica, sono stati considerati i costi unitari per ogni fase (tabella 1) ma anche diverse variabili, come la distanza tra l'area di interesse e l'area di trattamento.

Tabella 1 costi unitari fasi "Disaster waste management after flood events"

Phases	Unit of measure	References
Transport	8 €/km	Eqs. 1-13 supporting material
Landfill	89 €/t	(Andretta, Montresori, & Sunseri, 2010)
M.B.T.	101 €/t	(Andretta et al., 2010)
Shredding	5€/t	Eqs. 1-13 supporting material
Screening	2 €/t	Eqs. 1-13 supporting material
Loading	1 €/t	Eqs. 1-13 supporting material

Il maggior impatto economico in questo caso è rappresentato dall'energia richiesta per il trattamento meccanico- biologico (M.B.T.)

Mentre la triturazione richiede costi minori e riduce enormemente il volume del rifiuto, permettendo di ridurre i consumi relativi ai trasporti e la quantità da destinare in discarica.

La semplice triturazione, secondo lo studio è risultato essere la scelta più sostenibile.

Nonostante i risultati finali ottenuti con analisi LCA, viene comunque richiesta una grande quantità di informazioni per poter quantificare gli impatti di ogni trattamento (Amato et al).

### **3.2) Sviluppo di processi per il trattamento dei fanghi**

In questo paragrafo vengono descritti tutti i principali processi e trattamenti per la riduzione del volume di fanghi, per sanificazione, e per evidenziarne le principali differenze. La letteratura su cui si basa lo stato dell'arte riguarda principalmente tecnologie di trattamento, in cui si valuta l'efficienza di degradazione della sostanza organica, e la riduzione dei principali patogeni legati a problematiche sanitarie durante un'esondazione.

Tra quelli letti, due articoli (Anderson et al., Peter Matuku) non sono riferiti ai fanghi alluvionali nello specifico, ma trattano la problematica di fanghi settici provenienti da sistemi igienico-sanitari compromessi, in paesi in via di sviluppo. Tuttavia, alcune delle principali conclusioni possono essere trasferite a scenari post-alluvione, poiché un'esondazione può sovraccaricare un sistema fognario e portare allo straripamento di acque reflue.

#### **3.2.1) Igenizzazione dei fanghi fecali durante l'emergenza**

Da qui parte la panoramica sul trattamento di fanghi recuperati da sistemi fognari, e sulle problematiche connesse a una situazione di emergenza.

Come visto nello studio precedente, la tempestività durante la gestione di un'emergenza, è un fattore molto importante che deve essere pianificato prima dell'intervento sul campo.

In questo caso, più avanti negli ultimi paragrafi, verranno descritte tecnologie più adatte in emergenza.

Uno dei maggiori rischi durante qualsiasi emergenza, comprese le alluvioni, è la problematica igienico-sanitaria.

In un evento alluvionale questa problematica è ulteriormente aggravata dalla miscelazione dell'acqua del fiume con gli scarichi fognari, che porta alla formazione di fanghi ricchi di materia fecale.

Proprio la gestione dei fanghi fecali durante un'emergenza è stato il tema di uno studio del 2015, pubblicato da Anderson et al.

L'obiettivo è quello di proporre soluzioni per ridurre principalmente i microrganismi patogeni associati a questi fanghi, responsabili di sindromi diarroiche e colera.

In particolare, il lavoro ha preso in considerazione tre trattamenti igienico-sanitari per la sterilizzazione e disinfezione:

- 1) Trattamento di fermentazione con acido lattico;
- 2) Trattamento con Urea;
- 3) Trattamento con Calce idrata.

Per valutare l'effettiva riduzione di patogeni, è stato scelto come indicatore il batterio *Escherichia Coli*.

La ricerca per la scelta dell'opzione migliore è stata condotta presso l'impianto di trattamento delle acque reflue di Sochi(Russia), i fanghi utilizzati negli esperimenti provenivano dalle latrine delle case e del mercato.

Questo ha permesso la suddivisione in 5 lotti.

I fanghi sono stati estratti un giorno prima delle prove sul campo.

Successivamente sono stati caricati in un recipiente da 800 l, trasportati sul sito di prova, e versati in quantità di circa 25-35 kg in fusti di plastica da 50 l.

Prima dell'inizio dei tre processi di trattamento, da questi fusti sono stati prelevati 100-200 g di campione, per analizzare le principali proprietà microbiologiche e fisiche.

Sono stati infine testati i vari trattamenti, tra cui la fermentazione con acido lattico che è un trattamento aerobico e biologico in cui la presenza di batteri lattici, come *Lactobacillus*, e l'inoculo di un substrato zuccherino, permette la riduzione microbica e la produzione di un fango prevalentemente acido.

Il trattamento con urea è anche esso un trattamento biologico ma anaerobio, che consiste nella disattivazione della cellula microbica, a seguito della conversione dell'urea in ammoniaca operata dall'enzima ureasi.

Il trattamento con calce idrata (figura 10) è invece un trattamento prevalentemente chimico in cui si riduce la carica microbica, aumentando il Ph del fango.



Figura 10 calce utilizzata per trattamento fanghi(<https://www.tecnosida.it/impianti-neutralizzazione-fumi-e-iniezione-calce>)

Alla fine di ciascun trattamento è stato osservato che:

-Il trattamento con acido lattico ha mostrato un iniziale aumento della conta di *E.Coli* in 4 giorni, probabilmente per via della presenza del substrato zuccherino.

Dopo una settimana, si è assistito a una riduzione logaritmica della conta batterica sotto il limite di rivelabilità, corrispondente a un aumento del pH per la presenza di acido lattico e metaboliti (Tabella 3).

-Il trattamento con urea ha mostrato per i fanghi domestici, una riduzione della conta di *E.Coli* entro 4 giorni e di Coliformi totali entro una settimana, con un aumento della concentrazione di azoto ammoniacale.

Risultati simili sono stati ottenuti con i fanghi provenienti dal mercato .

-Nel trattamento con calce effettuato su tre lotti di fango si è osservato come l'alcalinità diversa per tutti e tre i lotti influenzasse il raggiungimento di valori differiti di pH, raggiungendo comunque l'obbiettivo di riduzione in tempi molto brevi.

In questo caso la conta di *E.Coli* si è ridotta al di sotto del livello rilevabile dopo solo 5 ore a pH 10, e dopo 1 ora a pH 11.

Mentre per i Coliformi la conta si riduce dopo 2 ore a pH 11,5, e dopo 1 ora a pH 12 .

In conclusione, a tutti e tre questi trattamenti vengono assegnati dei punteggi sulla base di diversi criteri: Sicurezza, robustezza, costi, distribuzione, igienizzazione.

Sommando i punteggi di ogni criterio per ciascuno dei tre trattamenti si è ottenuto il punteggio totale di ognuno (Tabella 2).

Tabella 2: tabella con criteri pesati

	<b>Sicurezza</b>	<b>Sanificazioni</b>	<b>Costi</b>	<b>Robustezza</b>	<b>Distribuzione</b>	<b>Totale</b>
Criterio pesato <sup>ab</sup>	5	5	4	4	3	
fermentazione e acido lattico <sup>c</sup>	5	5	2	3	2	<b>76</b>
Trattamento con Urea <sup>c</sup>	4	5	3	4	4	<b>85</b>
Trattamento con calce <sup>c</sup>	4	5	4	5	3	<b>90</b>

Il trattamento con Calce è risultato quello più vantaggioso sia a livello economico, poiché non viene influenzato dalle condizioni ambientali non essendo un processo biologico, sia in termini di tempo.

Il trattamento con acido lattico producendo fanghi acidi permette il ricircolo, compensando un costo unitario maggiore.

Mentre il trattamento con Urea è un processo anaerobio, quindi necessita di reattori chiusi, sigillati e isolati dall'ambiente esterno, permettendo tuttavia di utilizzare i fanghi come ammendanti in campo agricolo.(Anderson et al,2015)

### **3.2.2) trattamento e gestione fanghi con tecnologia a microonde.**

I trattamenti precedenti sono solo una parte dei sistemi più comunemente usati.

Uno studio condotto dal dottorando Peter Matuku , nel 2018 , ha affrontato la problematica della gestione dei fanghi prodotti in insediamenti di emergenza e in grossi agglomerati urbani.

Il primo obiettivo di questo studio era di effettuare dei resoconti sulle passate tecnologie di gestione di fanghi fecali, e su quelle esistenti, sviluppando un “sistema operativo di sanificazione in emergenza”, che comprenda una serie di tecnologie innovative.

Successivamente è stato fatto un elenco delle diverse opzioni tecnologiche.

È emerso come le tecnologie convenzionali usate in contesti ordinari non affrontino la gestione dei fanghi in maniera olistica e integrata.

Spesso in situazioni di emergenza, la quantità di fanghi e rifiuti da smaltire e trattare è di gran lunga maggiore, ciò comporta che gli impianti di trattamento si vedono arrivare un volume che supera la loro normale capienza.

L'aumento dei flussi da gestire comporta un incremento dei costi di trasporto e gestione, ma soprattutto un forte impatto ambientale sulle falde acquifere. Importante sono anche gli effetti sulla salute legati ad un aumento dei vettori di patologie dovute alla presenza di insetti, soprattutto zanzare.

Dallo studio precedente era emerso che il trattamento con calce era il più vantaggioso in termini di tempo e di abbattimento della carica microbica, tuttavia, questo studio ha mostrato come tale trattamento non elimini la concentrazione ma tenda solamente a disattivarla.

Altre tecnologie valutate sono l'essiccazione, il compostaggio, la co-digestione con rifiuti solidi e il co-trattamento nel trattamento delle acque reflue.

Sebbene quest'ultime siano consolidate in situazioni igienico-sanitarie ordinarie, non sono molto efficienti in situazioni emergenziali

Il compostaggio è un processo biologico e aerobico che permette di ottenere un materiale ricco di humus, materiale carbonioso, azoto e fosforo. Tuttavia, presenta delle limitazioni, tra cui la necessità di ampi spazi, di trattamenti lunghi.

La co-digestione con rifiuti solidi permette di migliorare la resa di biogas prodotto e di produrre un ottimo ammendante e fertilizzante, ma il trattamento non si presta ad un'azione rapida e tempestiva, poiché il processo di conversione è molto lento e richiede un ulteriore post-trattamento per la distruzione dei patogeni.

Il co-trattamento nel trattamento di acque reflue non tiene in considerazione l'enorme quantità di fanghi, sedimenti e materiale organico trasportato durante un'emergenza, per cui gli impianti di trattamento sono ovviamente impreparati e sottodimensionati.

Appare quindi evidente come il fattore spazio e il fattore tempo siano fondamentali in un'emergenza come può essere un'alluvione.

Una tecnologia innovativa presentata come alternativa in questo studio è la tecnologia a microonde.

Tale tecnologia si basa sull'energia delle microonde, che fa parte dello spettro elettromagnetico, e ha una frequenza compresa tra 300 MHz e 300 GHz.

Il risultato porta alla rottura dei legami idrogeno dell'acqua e la generazione di calore.

La presenza di molecole dipolari come l'acqua, nei fanghi da trattare, rende questa tecnologia adatta alla situazione.

Sono state quindi effettuate delle valutazioni sull'efficienza ed efficacia di questo trattamento, seguendo due fasi.

La prima fase consisteva nella validazione dei risultati con un'analisi sperimentale in laboratorio, verificando la riduzione dell'indicatore patogeno *Escherichia Coli* e delle uova di *Ascaris Lumbricoides* sotto il limite di rivelabilità.

Per verificare l'applicabilità sul campo è stato usato un forno a microonde domestico, e sono stati testati due fanghi: fanghi di acque nere provenienti da un impianto di prova a Sneek nei Paesi Bassi, e fanghi fecali.

I risultati di questa analisi hanno dimostrato l'applicabilità sul campo di questa tecnologia, portando alla realizzazione nella seconda fase di un reattore a microonde su scala pilota.

Sono infine stati trattati diverse tipologie di fanghi, tra cui fanghi settici e fanghi attivi, mostrando non solo una riduzione dei patogeni sotto il limite di rivelabilità ma anche una riduzione del volume di materia organica di circa il 60 %.

I vantaggi sono principalmente sanitari, ma anche economici, poiché la riduzione di volume riduce i costi di trasporto mentre l'essiccazione ne permette sia il riutilizzo energetico sia il riutilizzo come fertilizzante.(Peter Matuku,2018)

### **3.2.3) Opzioni di fitorimediazione**

Nonostante faccia parte delle tecniche di trattamento, il fitorimediazione è tra le tecniche non convenzionali più discusse e complesse.

Molto spesso i fiumi durante un'inondazione tendono a trasportare tramite i propri sedimenti, numerose sostanze organiche e inorganiche, che possono comportare rischi potenziali per l'uomo tramite il loro ingresso nella catena trofica.

Secondo uno studio del 2009(Bert et al,2009), la gestione di sedimenti che un fiume porta a mare o che rilascia lungo le aree alluvionate, consiste solitamente nel dragaggio e trattamento con sistemi di bonifica tradizionali, che possono essere fisici e biologici.

Tuttavia questo può comportare la perdita delle caratteristiche qualitative del sedimento, compromettendo l'eventuale riutilizzo.

L'articolo si concentra quindi su un sistema, il fitorimediazione.

Quest'ultimo permette la valorizzazione dell'area e la sua conservazione, grazie alla stabilizzazione dei contaminanti.

La carenza di informazioni su queste tecniche aveva portato a effettuare delle ricerche sul campo per evidenziarne i pro e i contro.

Sono stati riportati quindi studi a lungo termine per verificare se la concentrazione di contaminanti accumulati dal fusto e dalle radici delle piante, portassero a degli effetti biologici visibili, come la diminuzione del numero di specie e l'inibizione della crescita delle piante.

Il risultato è che entro pochi mesi l'accumulo non era correlato a nessun tipo di effetto, mentre dopo circa 12 mesi questi cominciavano a manifestarsi.

Oltre a questo, è stato notato come solo determinate specie vegetali fossero specifiche per un determinato tipo di sedimento.

Questo rende la scelta del tipo di pianta un fattore indispensabile per un efficiente trattamento, le specie preferibili sono quelle autoctone oppure mangrovie.

In definitiva il fitorimediazione è preferibile ai metodi tradizionali nel caso di inquinamento da metalli pesanti. Questo perché, la presenza di micorrize, e di comunità microbiche che si sviluppano nel microhabitat creato dalla pianta, permette di evitare il trasporto di acqua ricca in metalli nelle acque sotterranee.

Tuttavia, sono richiesti ancora molti studi per poter ottimizzare questa tecnologia e renderla pienamente operativa e applicabile. Inoltre, altro punto debole sono i tempi di azione, punto chiave di una situazione emergenziale (Bert et al, 2009)

Qui di seguito vengono riassunte le principali caratteristiche di tutte le tecnologie citate (tabella 3).

Tabella 3 caratteristiche tecnologie convenzionali di trattamento fanghi e reflui

Tipologia di trattamento	Parametri monitorati	Efficienza di abbattimento	Tipologia fango	Aspetti negativi	Aspetti positivi	Scala dell'esperienza	Referenza
Smaltimento, disinfezione, triturazione-vagliatura.	Volume, impatto ambientale scenari, costi per trasporto, energia richiesta per vagliatura e triturazione.	- Raccolta differenziata preliminare riduce volume di rifiuti del 16 %  -Riduzione del peso specifico e della materia organica putrescibile di circa il 17 % in 21 giorni.	Da alluvione, rifiuti solidi urbani.	-Assenza di un pretrattamento in loco  -grandi impatti del trasporto.  -scenario di smaltimento meno sostenibile  -trattamento meccanico biologico impatta sulla categoria eutrofizzazione e acidificazione.	-Triturazione e vagliatura permettono un risparmio in termini di tempo e di costi.  -Triturazione e vagliatura riducono il volume da destinare allo smaltimento	Unità funzionante (10,000,000 kg di rifiuti solidi urbani)	Amato et al (2021)
Trattamenti chimici e biologici	<i>E.Coli</i> , <i>Coliformi</i> totali.	Trattamento con acido lattico:abbattimento di $4.87 \pm 1.01 \log$ CFU*/ml(*Colony Forming Unit) di <i>E.Coli</i> in 4 giorni	Da latrina, fosse settiche	I trattamenti con acido lattico e urea sono processi più lenti e più costosi.	il trattamento con Calce permette efficace abbattimento in tempi brevi, senza risentire delle	Sul campo	Anderson et al.(2015)

		<p>-trattamento con urea : abbattimento di <i>E.Coli</i> in 4 giorni (<i>Coliformi</i> totali entro una settimana).</p> <p>Il trattamento con calce riduce la conta in 5 ore a pH 10 e in 1 ora a pH 11. (non sono riportate percentuali di abbattimento)</p>			condizioni ambientali.		
Trattamento con Microonde	<i>E.Coli</i> , Volume fanghi	Riduzione del 60 % di volume dei fanghi con riduzione della carica microbica(in condizioni sperimentali), aumento di percentuale di riduzione sul campo.	Da latrine	/	Basso ingombro, nessuna richiesta di energia termica, tempi brevi	In laboratorio, sul campo	Peter Matuku(2018)

Trattamento con Fitorimediazione	metalli, sostanze organiche e inorganiche, recupero suoli contaminati.	L'abbattimento si può avere, limitando la mobilità dei metalli attraverso la fitostabilizzazione, che non riduce la concentrazione ma impedisce la contaminazione delle falde sotterranee, oppure attraverso la fitoestrazione.	Da fiume, da aree alluvionate, da aree umide	Necessari ulteriori studi per determinarne l'applicabilità, risultati ottenuti in tempi lunghi.	Molto sostenibile dal punto di vista sociale, economico e ambientale.	Sul campo	Bert et. al 2009
----------------------------------	------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------	-----------	------------------

### **3.3) Sistemi di trattamento mobile per la gestione di fanghi e acque reflue**

Qui di seguito si discutono le principali tecnologie mobili in container, utilizzate per la gestione e il trattamento in loco di fanghi e acque reflue

#### **3.3.1) Sistemi mobili per trattamento fanghi**

Sebbene molte delle tecnologie innovative citate siano valide, soprattutto la tecnologia a microonde (Peter Matuku), le dimensioni dei reattori utilizzati incidono molto sulla rapidità di intervento. Ecco perché molte aziende possono offrire dei sistemi di trattamento mobili su container (Flottweg, Mena water), che possono essere trasportati molto facilmente sul posto anche da un solo operatore, garantendo così tempestività in situazioni critiche.

Alcune delle precedenti soluzioni, presentano la problematica della distanza del sito di trattamento dal sito dell'evento.

Ecco perché molte aziende, come Flottweg, si sono occupate di sviluppare dei sistemi mobili, pensati soprattutto per la disidratazione e l'ispessimento dei fanghi in eccesso provenienti da un impianto di trattamento.

Sono detti mobili perché possono essere trasportati ovunque ci sia necessità di trattare un'elevata quantità di fanghi, come per esempio un'area post-alluvione o un altro scenario emergenziale.

I costi di investimento in questi piccoli impianti rivestono spesso un ruolo decisivo, visto che la realizzazione di impianti fissi è molto dispendiosa economicamente. Generalmente sono costituiti da macchinari (centrifughe) tutti all' interno di un container (figura 11).

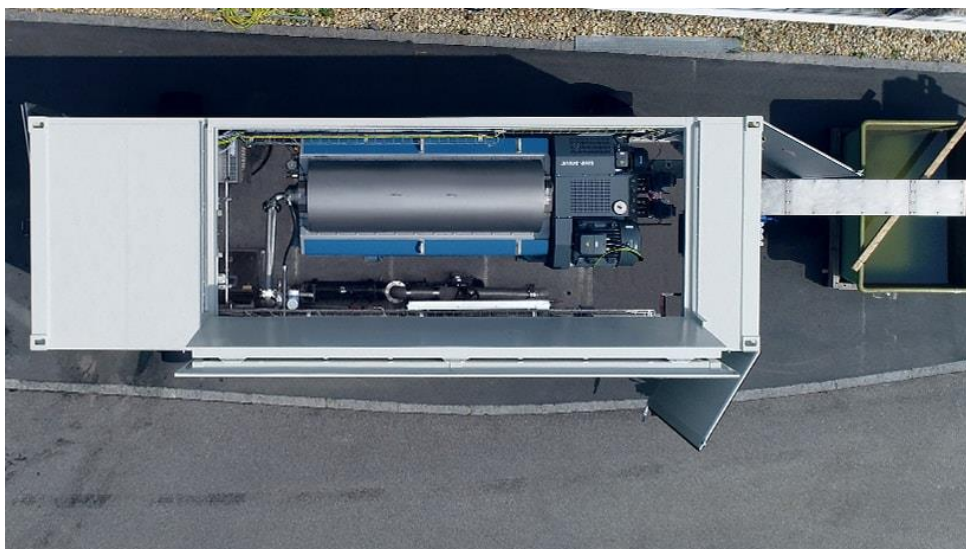


Figura 11 sistema mobile flottweg con centrifuga, <https://www.flottweg.com/it/linea-di-prodotti/sistemi/impianti-di-disidratazione-mobili/>

Queste tecnologie sono facili da montare e richiedono solamente “attacco e disidratazione” nel momento in cui vengono trasportate sul sito (Plug and play)

Dispongono di tutti i processi normalmente presenti negli impianti di trattamento fissi, con il vantaggio di essere facilmente portati sul sito dell'evento, sostituendo efficacemente un impianto di trattamento in caso di guasto o anomalia e consentendo di poter gestire i fanghi in eccesso, e di usare processi di sedimentazione per separare la frazione solida da quella liquida.

L'impianto è inserito in un container, dotato nei quattro angoli superiori e inferiori di elementi che permettono di sollevare e caricare l'impianto. Mentre il collegamento dei tubi di alimentazione può essere fatto da un singolo operatore.

La manutenzione è minima e richiede un semplice dispositivo manuale per accedere all'impianto, senza l'utilizzo di una gru o di un elevatore a forca.

Il materiale è in acciaio inossidabile, ciò contribuisce ad allungare il ciclo di vita di tutte le componenti rispetto le tecnologie convenzionali.

Le attrezzature utilizzate per l'ispessimento e la disidratazione sono delle centrifughe (Figura 12).

Per la disidratazione viene usato un decanter HTS che garantisce il raggiungimento della più alta percentuale di sostanza secca, passando dal 2-6 % al 25-35% per fanghi digeriti, usando semplicemente la forza centrifuga.

Il decanter HTS flottweg è progettato appositamente per garantire un risparmio di costi operativi, dovuti al minimo consumo di elettricità e alla mancanza di agenti o teli filtranti, inoltre riduce il volume dei fanghi nell'impianto di trattamento dell'8 %.

Per l'ispessimento e l'addensamento dei fanghi in eccesso prodotti dal chiarificatore e indirizzati verso la torre di digestione, viene usato un decanter OSE. Quest'ultima permette di separare tramite accelerazione centrifuga il materiale solido dal liquido e di addensare dallo 0.5-1 % di materia secca al 6-8 %, con costi di manutenzione minimi dovuti al design facilmente accessibile, risparmio energetico dovuto al basso regime di funzionamento e risparmio economico dovuto al basso fabbisogno di flocculante.

Ultimamente questa azienda ha sviluppato una nuova serie di centrifughe che raggiungono prestazioni anche migliori rispetto alle precedenti, come per esempio un ulteriore risparmio del 20 % di energia, una riduzione di fanghi del 10 %, una portata in più del 15 %, e un risparmio del consumo di flocculanti del 20 %. Qui di seguito vengo riportati i dati tecnici di tre tipologie di questa serie riferiti alla portata volumetrica: 20-50 m<sup>3</sup>/h, 30-70m<sup>3</sup>/h, 60-140m<sup>3</sup>/h.(figura 12)

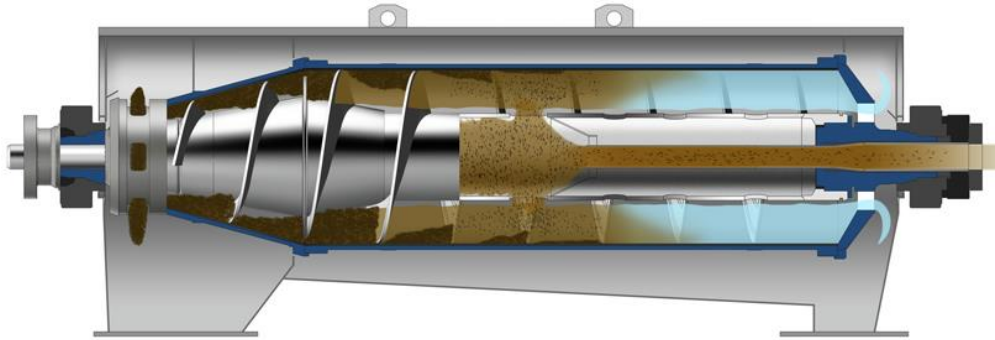


Figura 12 sezione trasversale centrifuga flottweg per ispessimento e disidratazione <https://www.flottweg.com/it/linea-di-prodotti/decanter/decanter-hts/>

Un'altra azienda che utilizza impianti di disidratazione dei fanghi in container, permettendo di ottenere tempi di realizzazione molto brevi, è la Mena water. (figura 13)



Figura 13 impianto mobile in container Mena water <https://mena-water.com/container/sludge-dewatering-unit/>

La scelta del tipo di tecnologia di disidratazione dipende dalla capacità necessaria per l'intervento sul sito. Si possono avere quindi piccoli impianti a sacco-secco, che permettono il condizionamento dei fanghi, e hanno un design compatto che garantisce un'installazione rapida e semplice (figura 14). Oppure delle filtropresse a nastro (figura 15), dotate di preaddensatore, polimeri, miscelatori e pompe comprensive di cavi e tubazioni.

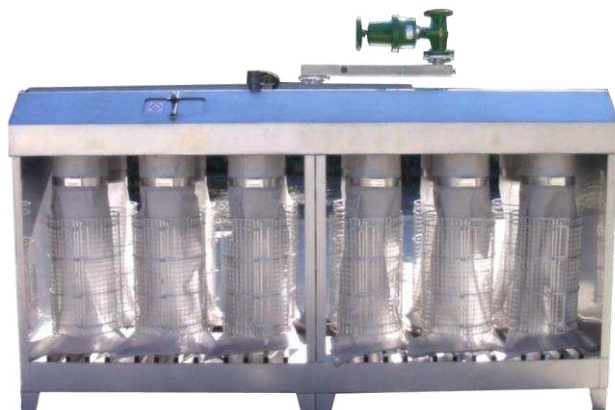


Figura 14 impianto sacco-secco, Mena water <https://mena-water.com/products/bag-dryer/>



Figura 15 filtro pressa, Mena water <https://mena-water.com/products/belt-filter-press/>

Con questi ultimi si agisce prima sulla separazione solido-liquido attraverso il preaddensatore a clocea, che permette il raggiungimento di una percentuale di solidi dallo 0.5-3% al 5-15%, e poi sulla disidratazione, che porta la concentrazione di solidi al 18-30% a seconda del fango. La portata volumetrica che può essere raggiunta da questo

impianto è di circa 2-8 m<sup>3</sup>/h per unità (capacità più elevata attraverso disposizione modulare), tuttavia l'azienda ha a disposizione una variante chiamata pressa a vite che raggiunge una percentuale di materia secca del 90 % (figura 16), e una portata volumetrica variabile da 2 a 30 m<sup>3</sup>/h.

Le caratteristiche principali che giustificano l'utilizzo di queste attrezzature sono le consegne rapide sul posto, attrezzature di qualità in acciaio inossidabile, design compatto, buon rapporto qualità- prezzo, ridotta manutenzione con requisiti minimi di funzionamento che richiedono solamente attacco ed utilizzo (plug and play) e minimi lavori di costruzione.

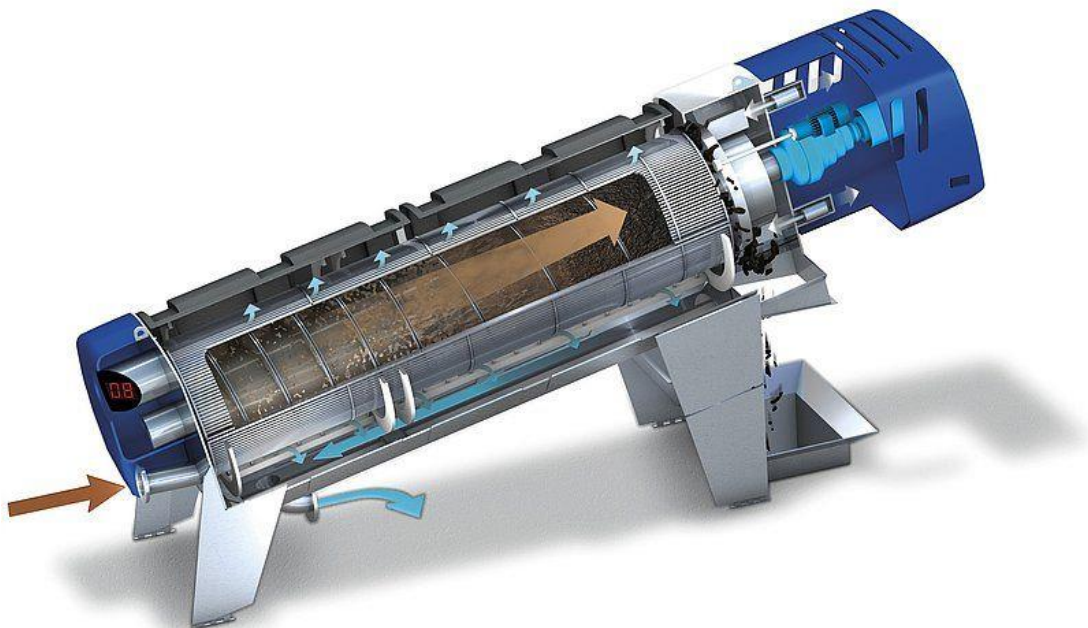


Figura 16 Pressa a vite, Mena water <https://mena-water.com/products/>

In qualsiasi scenario in cui intervenire in maniera urgente e precoce, la scelta migliore ricade su questi sistemi, poiché non sostituiscono i sistemi fissi ma sono un'aggiunta fondamentale, soprattutto quando la quantità di fanghi da gestire sono oltre la capacità massima. Inoltre, costituiscono un notevole risparmio di costi e di tempo grazie al design compatto e permettono di ottenere capacità elevate attraverso la disposizione modulare.

Alcune apparecchiature, come la pressa a vite, grazie alla disidratazione, ispessimento, e pressatura, può portare alla riduzione di circa il 90 % del volume dei fanghi senza un'eccessiva manutenzione, con minimo dispendio energetico (Mena water).



Ultimamente l'azienda Arrow ha sviluppato un sistema robotico, costituito da otto modelli, unici e innovativi, utilizzati per il trattamento e il riciclaggio di fanghi industriali e acque reflue. Tale tecnologia può essere trasportata su un container da 20 piedi e garantisce una capacità di trattamento, che varia a seconda del modello, da 15 fino a 250 m<sup>3</sup>/h (figura 17).




Figura 17 <https://ecoarrow.com/products/the-predator-series/>

Nella tabella seguente vengono elencati i punti principali delle tecnologie mobili per il trattamento fanghi (tabella 4).

Tabella 4 prestazioni sistemi mobili fanghi

Sistemi mobili	Capacità	Funzioni	Marca	foto
Centrifughe Flottweg	capacità minima da 20m <sup>3</sup> /h fino a 140 m <sup>3</sup> /h	Disidratazione dal 2-6 % al 25-35% per fanghi digeriti.	Decanter HTS. Decanter OSE. Centrifuga Xellettor.	
Filtropressa a nastro, pressa a vite Mena Water.	Filtropressa a nastro: 2-8 m <sup>3</sup> /h per unità  Pressa a vite: da 2 a 30 m <sup>3</sup> /h.	Disidratazione fanghi.  Con preaddensatore a clocea, si raggiungono dai 0.5-3% al 5-15% di solidi.  Con disidratazione si arriva al 18-30 %.	Centrifuga Q-press.	

				
Sistemi robotici Arrow operations and Technologies Ltd.	Da 15 fino a 250 m <sup>3</sup> /h a seconda del modello.	Riciclaggio di fanghi e acque reflue.	Predator	/

### **3.3.2) Sistemi mobili per trattamento acque reflue**

Gli aspetti critici di un'espansione, non riguarda soltanto la gestione dei fanghi, ma anche delle acque reflue che il sistema fognario, per via dei grossi volumi d'acqua che ricadono sul territorio, non riesce a sostenere. Esistono quindi degli impianti mobili pensati per offrire un trattamento di disinfezione in loco, come per esempio gli Impianti in container per la depurazione delle acque reflue in container green MBR (Membrane Biological Reactor) della Idro group.

Sono impianti modulari e di trattamento per acque reflue realizzati in container (figura 18) e quindi facilmente trasportabili ed installabili. I progetti che includono gli impianti GREEN MBR necessitano della realizzazione di lavori civili di minima entità; L'utilizzo della tecnologia MBR permette infatti la riduzione dei volumi necessari minimizzando gli ingombri. Grazie alla tecnologia utilizzata, Membrane Bio Reactor (MBR), l'acqua prodotta dall'impianto può essere riutilizzata (es. per scopi irrigui, lavaggio automobili, servizio antincendio).



figura 18 impianto mobile in container green MBR, <https://www.idro.net/upload/blocchi/MBR.pdf>

Le sezioni di trattamento base di questi impianti consistono in una Grigliatura Fine, una denitrificazione (solo per la versione con denitro), ossidazione-nitrificazione, filtrazione MBR e disinfezione finale, mentre i campi di applicazioni possono andare da città o piccole comunità residenziali, fino a scuole e ospedali.

Esistono diversi modelli, ognuno con una capacità di trattamento che varia a seconda del numero di abitanti equivalenti (AE), andando da 20 m<sup>3</sup>/giorno per 100 AE con potenza di 5 kW, fino a un massimo di 440 m<sup>3</sup>/giorno per 2200 AE con potenza di 41 kW (figura 19).

## MODELLI DISPONIBILI

IMPIANTI MBR SENZA DENITRO				
MODELLO	A.E.	PORTATA m <sup>3</sup> /day	kW installati	N. CONTAINER
Green MBR 100	100	20	5	1x20'
Green MBR 240	240	48	7,2	1x20'
Green MBR 480	480	96	9,4	1x40'
Green MBR 720	720	144	14	1x40' + 1x20'
Green MBR 960	960	192	18	2x40'
Green MBR 1200	1200	240	21	2x40' + 1x20'
Green MBR 1500	1500	300	29	3x40'
Green MBR 2200	2200	440	41	4x40'

IMPIANTI MBR CON DENITRO				
MODELLO	A.E.	PORTATA m <sup>3</sup> /day	kW installati	N. CONTAINER
Green MBR 100 DEN	100	20	5,9	1x20'
Green MBR 240 DEN	240	48	9,2	1x20'
Green MBR 480 DEN	480	96	11,9	1x40'
Green MBR 720 DEN	720	144	15,8	1x40' + 1x20'
Green MBR 960 DEN	960	192	21,4	2x40'
Green MBR 1200 DEN	1200	240	26,7	2x40' + 1x20'
Green MBR 1500 DEN	1500	300	36,6	3x40'
Green MBR 2100 DEN	2100	420	47,4	4x40'

Figura 19 modelli impianti MBR <https://www.idro.net/upload/blocchi/MBR.pdf>

I punti di forza rappresentati da questi sistemi sono modularità, compattezza, facile trasporto, robustezza, rapida installazione, e tempi rapidi di consegna (figura 20).



figura 20 punti di forza impianti MBR <https://www.idro.net/upload/blocchi/MBR.pdf>

Un altro importante sistema mobile è l'Eco cycle MBBR containerizzato, un processo di trattamento biologico altamente efficace basato su una combinazione di un processo di fanghi attivi convenzionali e di un mezzo biofilm. I sistemi containerizzati Eco cycle MBBR per il trattamento delle acque reflue contengono tutte le fasi necessarie, come il trattamento fisico (trattamento primario), la camera anossica, l'aerazione, la chiarificazione, la disinfezione, la sezione di stoccaggio dei fanghi e tutte le apparecchiature meccaniche ed elettriche, le tubazioni e la strumentazione all'interno della sua struttura containerizzata come sistema mobile, inoltre offre una facile installazione e funzionamento. Il mezzo biofilm fornisce una maggiore superficie per l'adesione e la crescita dei microrganismi biologici. La maggiore superficie riduce l'ingombro dei serbatoi necessari per il trattamento delle acque reflue. (figura 21)



Figura 21 impianto mobile eco cycle MBBR, <https://www.arsimak.com/mobile-containerized-wastewater-treatment-systems/>

Il campo di applicazione in questo caso comprende città, comuni, strutture militari, villaggi turistici, fabbriche e ospedali, e ha una capacità che può variare da 20 m<sup>3</sup>/giorno a 250 m<sup>3</sup>/giorno (figura 22)

MODEL	EQUIVALENT POP.	CAPACITY m <sup>3</sup> /day	DIMENSIONS (BxLxD) cm	NO. OF TANKS
Ecocycle® MBBR 100	100	20	235x300x300	1
Ecocycle® MBBR 200	200	40	235x300x300	1
Ecocycle® MBBR 250	250	50	235x450x300	1
Ecocycle® MBBR 300	300	60	235x450x300	1
Ecocycle® MBBR 400	400	80	235x525x300	1
Ecocycle® MBBR 500	500	100	235x675x300	1
Ecocycle® MBBR 750	750	150	235x675x300	1
Ecocycle® MBBR 1000	1000	200	235x900x300	1
Ecocycle® MBBR 1250	1250	250	235x1125x300	1

Figura 22 modelli Ecocycle MBBR

Similmente alle due tecnologie precedenti, anche gli impianti di depurazione in container progettati da Klaro (figura 23), offrono una soluzione veloce al trattamento e alla disinfezione di acque reflue in vari contesti. I sistemi di trattamento delle acque reflue KLARO *Container* si distinguono per la loro qualità, flessibilità ed efficienza. Progettati e prodotti individualmente, vengono rapidamente installati secondo il principio plug-and-play, smontati e reinstallati in un'altra sede.

E' un sistema flessibile e mobile per il trattamento delle acque reflue, che può essere utilizzato laddove è necessario un sistema di trattamento delle acque reflue ma non è disponibile un collegamento alla rete fognaria.

Può essere utilizzato per un'ampia gamma di applicazioni: campo profughi, campo militare, campi di lavoro e di ricerca, cantieri edili, comuni, campeggio (figura 23)



figura 23 impianto in container Klaro

Tra le diverse caratteristiche abbiamo la facilità di trasporto, poiché l'impianto di depurazione delle acque reflue è situato in uno o più container marittimi le cui dimensioni e costruzione soddisfano gli standard mondiali, e quindi può essere trasportato su qualsiasi veicolo che può essere caricato anche con container marittimi. Non è richiesta alcuna pianificazione o costruzione per gestire un impianto di trattamento delle acque reflue in container: l'impianto deve solo essere posizionato su una base solida. Ciò consente di risparmiare sui costi iniziali e l'impianto è anche altamente efficiente nel funzionamento.

Ci sono quattro diversi impianti di trattamento delle acque reflue in container tra cui scegliere:

**Container. One** , **Container. One+** , **Container .Pro** e **Container. Xtra** . Tutti hanno un design modulare e possono quindi essere ampliati. Fondamentalmente, sono disponibili container da 10, 20 e 40 piedi. Per volumi di acque reflue maggiori, è possibile collegare tra loro più container, offrendoti la massima flessibilità possibile. In questo modo gli impianti di trattamento delle acque reflue in container possono arrivare fino a 1.380 PE e 207 m<sup>3</sup> di acque reflue al giorno. Container da 40 piedi permettono di trattare un massimo di 34.5 m<sup>3</sup> al giorno di refluo, con consumi intorno a 33,8 kWh al giorno.

Questi impianti in container seguono il processo SBR (impianto a fanghi attivi). Il trattamento avviene quindi nei seguenti passaggi : Aereazione, sedimentazione e infine estrazione e disinfezione opzionale del refluo.

Altri sistemi efficienti sono le tecnologie newster. Diversamente dagli altri tre sistemi, questi sono degli impianti sono focalizzati principalmente al processo di disinfezione , e posizionati “in loco”, cioè in prossimità solitamente di zone dove non ci sono sistemi fognari efficienti, in piccoli ospedali senza allacci alla rete fognaria, e soprattutto dove ci sono reparti di malattie infettive o autoptici. Sono quindi delle tecnologie mirate soprattutto al trattamento terziario e di disinfezione delle acque. In molti contesti gli effluenti e le acque di scarico vengono convogliate direttamente nel sistema fognario previo trattamento fisico-biologico, che comunque non garantisce la riduzione di batteri e di altri patogeni responsabili di molte patologie come colera, epatite, febbre tifoide. Questi impianti di trattamento hanno una capacità di 10 m<sup>3</sup>/h, e sono dotati di un separatore dove le acque reflue contenenti materiali solidi vengono filtrate con un filtro a vite, e di una vasca di disinfezione dove il refluo e il disinfettante vengono miscelati. (Figura 24-25).

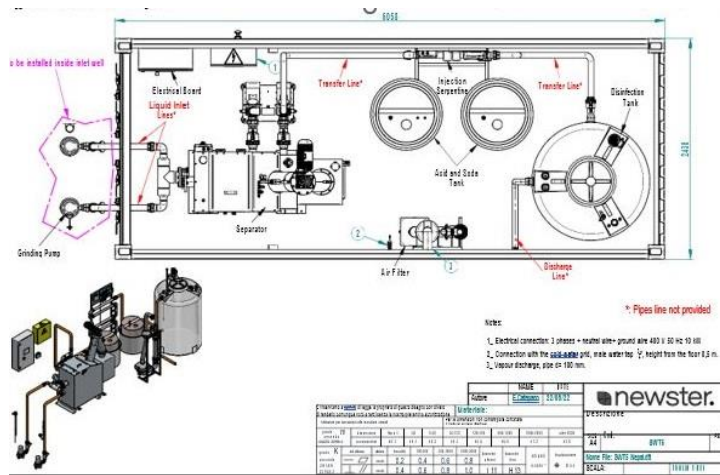


Figura 24 Impianto mobile Newster

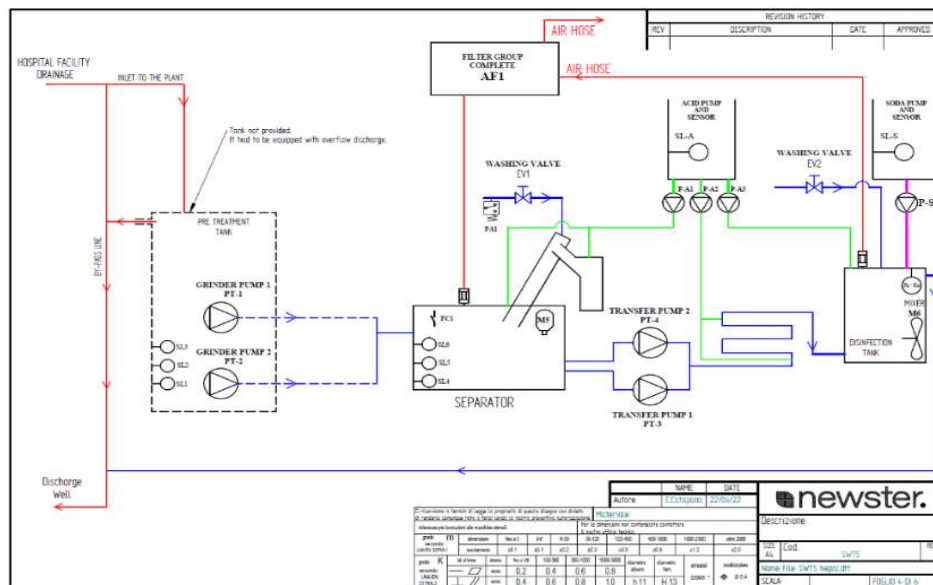


Figura 25 descrizione sistema Newster

I disinfettanti usati possono essere il cloro, l'ipoclorito di sodio, il biossido di cloro oppure l'acido peracetico.

I disinfettanti a base di cloro hanno però uno svantaggio che deriva dalla loro reattività, in particolare se nel refluo è contenuta una buona quantità di sostanza organica, è possibile che si formino dei composti organici alogenati come il cloroformio o altri prodotti non conosciuti, che possono essere sospetti cancerogeni.



L'acido peracetico (PAA) è quindi la sostanza più conveniente da utilizzare anche a seguito di validazioni effettuate in laboratorio, prima di tutto perché è un ottimo ossidante, libera ossigeno attivo e radicali ossidrilici che distruggono la membrana e la parete cellulare batterica; E come seconda cosa non portano alla formazione di sottoprodotti tossici. Dai test effettuati sull'efficacia dell'acido peracetico sull'inattivazione batterica, è stato dimostrato che con una concentrazione che va da 5 a 10mg/l e con un tempo di contatto di 15 minuti, è possibile ridurre i Coliformi totali del 95 % negli effluenti secondari, mentre per quando riguarda i liquami grezzi lo stesso risultato lo si raggiunge dopo 10 minuti, ma con una concentrazione di PAA del 20 mg/l. La differenza che c'è tra il trattamento dei liquami grezzi e gli effluenti secondari è la concentrazione di PAA, tutto ciò è dovuto alla presenza di solidi sospesi. È stato infatti dimostrato come il decadimento dell'acido peracetico e la diminuzione dell'inattivazione batterica, sia dovuta alle caratteristiche chimico-fisiche della matrice dell'effluente.

Un pH troppo basico, per esempio, porta alla dissociazione del PAA e alla formazione della sua forma dissociata, che riduce l'efficienza; Mentre solidi sospesi e materia organica possono portare, da una parte il PAA a un'ossidazione più spinta, portando il disinfettante a consumarsi più velocemente, da l'altra parte a formare degli agglomerati con le cellule batteriche aumentandone la resistenza all'azione disinfettante.

Ciò fa capire come servirebbe una concentrazione molto più alta di PAA per un liquame grezzo (con valori di COD molto alti), rispetto a quella per un effluente secondario, per poter ridurre in modo significativo la carica microbica, e il pretrattamento meccanico prima della disinfezione permette di raggiungere buoni risultati senza utilizzare dosi eccessive.

Le caratteristiche di questi sistemi vengono sintetizzate nella tabella 5.

Tabella 5 prestazioni sistemi mobili reflui

Sistemi mobili	Capacità	Marca	Foto
Idrogroup	capacità minima da 20 m <sup>3</sup> /giorno fino a 440 m <sup>3</sup> /giorno	Green MBR	Foto 1 
Arsimak	capacità minima da 20 m <sup>3</sup> /giorno fino a 250 m <sup>3</sup> /giorno	Eco cycle MBBR	Foto 2 
Klaro	Capacità di trattamento di 34.5 m <sup>3</sup> /day per container di 40 piedi.	SBR Container Klaro.Pro	/



Al fine di evidenziare le principali differenze tra i diversi trattamenti citati in letteratura, la tabella 6 evidenzia i punti di forza e i punti deboli di ogni sistema mobile, sia per i fanghi, sia per i reflui. Per ogni sistema citato, viene inserita la tipologia di trattamento, i parametri monitorati, l'efficienza di abbattimento, gli aspetti positivi e negativi, e le fonti di ognuno di essi. Tale tabella ha la funzione di interfacciarsi in maniera più semplicistica possibile agli aspetti essenziali di tutti i trattamenti, senza ulteriori approfondimenti.

Tabella 6 sintesi sistemi mobili per trattamento fanghi e acque reflue

Tipologia di trattamento	Parametri monitorati	Efficienza di abbattimento	Tipologia	Aspetti negativi	Aspetti positivi	Scala dell'esperimento	Referenza
Sistemi mobili per trattamento fangho e disinfezione reflui	Volume fanghi, concentrazione materia secca, portata volumetrica espressa in m <sup>3</sup> /h, risparmio energetico.	La forza centrifuga delle centrifughe flottweg permette di raggiungere dal 2-6% di materia secca fino al 25 -35%  -Le filtropresse a nastro permettono di raggiungere dallo 0.5 al 15 % di materia secca con preaddensatore, fino al 18-30 % con disidratazione.  -Pressa a vite riduce fanghi fino al 97 %.	Fanghi, acque reflue	Non sono riportati aspetti negativi.	Modulabili, portati direttamente sul posto, facili da montare, funzionamento immediato, manutenzione minima, minimo dispendio energetico.  Pressa a vite permette disidratazione senza precedente ispessimento	Sul campo Capacità di trattamento m <sup>3</sup> /h : -Il modello Flottweg ha una capacità minima di 20m <sup>3</sup> /h, quello con più prestazioni può trattare fino a 140m <sup>3</sup> /h.  -La filtropressa a nastro della Mena water può raggiungere capacità di trattamento di 2-8 m <sup>3</sup> /h per unità(capacità più elevata con disposizione modulare), la pressa a vite ha capacità di trattamento che va da 2 a 30 m <sup>3</sup> /h.  Tecnologia Arrow :capacità da 15 fino a 250 m <sup>3</sup> /h  Sul campo:Impianto MBR idro group: Capacità 20m <sup>3</sup> /giorno per 100 AE,	Flottweg Mena water Arrow Idro group Arsimak Newster

						<p>440 m<sup>3</sup>/giorno per 2200 AE</p> <p>Sul campo:Impianto MBBR arsimak:da 20 a 250 m<sup>3</sup>/giorno</p> <p>Sul campo:impianti SBR Klaro modulari fino a 207 m<sup>3</sup> /giorno di acque reflue.</p> <p>Sul campo: Impianto SWT Newster, fino a 10 m<sup>3</sup>/h</p>	
--	--	--	--	--	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

## 4) Obiettivo dello studio

Sulla base di quanto descritto dal caso studio analizzato nel capitolo 2 considerando che la velocità di intervento in caso di emergenza è la priorità, è stato identificato il problema delle acque stagnanti che restano nelle aree urbane dopo il ritiro delle acque e che causano un significativo rischio sanitario come descritto nel sottocapitolo 1.4. Ovviamente, il ristagno di tutta quest'acqua, con la forte presenza di zanzare e di batteri patogeni contenuti in acque nere e liquami possono compromettere la salute umana e quella ambientale.

In questo contesto, il presente lavoro ha come obiettivo analizzare possibili soluzioni presenti sul mercato al fine di trattare tali acque. Si tratta di sistemi mobili, facilmente trasportabili, che permettano non solo un trattamento chimico-fisico, ma un trattamento terziario di disinfezione che riduca la presenza di patogeni e di conseguenza il rischio sanitario. Considerato quindi il rischio sanitario connesso al rilascio di liquami ed effluenti civili, durante le esondazioni del 16-17 maggio, che hanno prodotto un volume di acqua pari a 350 milioni di metri cubi su 540 km<sup>2</sup> di superficie, e considerando quindi che non è il fango la causa principale del rischio sanitario, ma i reflui prodotti da attività di tipo civile, l'obiettivo della tesi è quello di valutare la sostenibilità ambientale ed economica per tali sistemi, problema che spesso durante un'emergenza viene sottovaluto, e che permette a chi opera in tali contesti di orientarsi preferibilmente verso la tecnologia, che abbia a parità di efficacia di trattamento dei buoni vantaggi in termini economici e ambientali.

Data la disponibilità in commercio di sistemi mobili di trattamento sanitario di acque reflue, si intende confrontare tali tecnologie da un punto di vista dell'impatto ambientale del loro funzionamento, attraverso un'analisi di LCA(Life Cycle Assessment).

# 5) Materiali e metodi

## 5.1) Metodologia dell'analisi del ciclo di vita

Lo strumento di valutazione degli impatti di ogni tecnologia tramite LCA consiste in un procedimento di identificazione e quantificazione dei carichi energetici e ambientali di ogni processo, comprendendo l'intero ciclo di vita del processo o dell'attività come l'estrazione il trasporto delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale. Tale analisi è fondamentale per valutare la sostenibilità di un prodotto o di un'attività e come supporto alle attività decisionali e alla formulazione di politiche ambientali.

La metodologia LCA fa riferimento alle norme ISO, nel dettaglio : ISO-standards 14040-14044.

La UNI EN ISO 14040 (2006) fa riferimento a Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Principi e quadro di riferimento, mentre la UNI EN ISO 14044 (2006) si riferisce alla Valutazione del ciclo di vita , Definizione e Linee guida.

La struttura di un LCA è divisa in tre fasi (figura 26):

- definizione dell'obiettivo e dello scopo
- analisi dell'inventario
- valutazione degli impatti

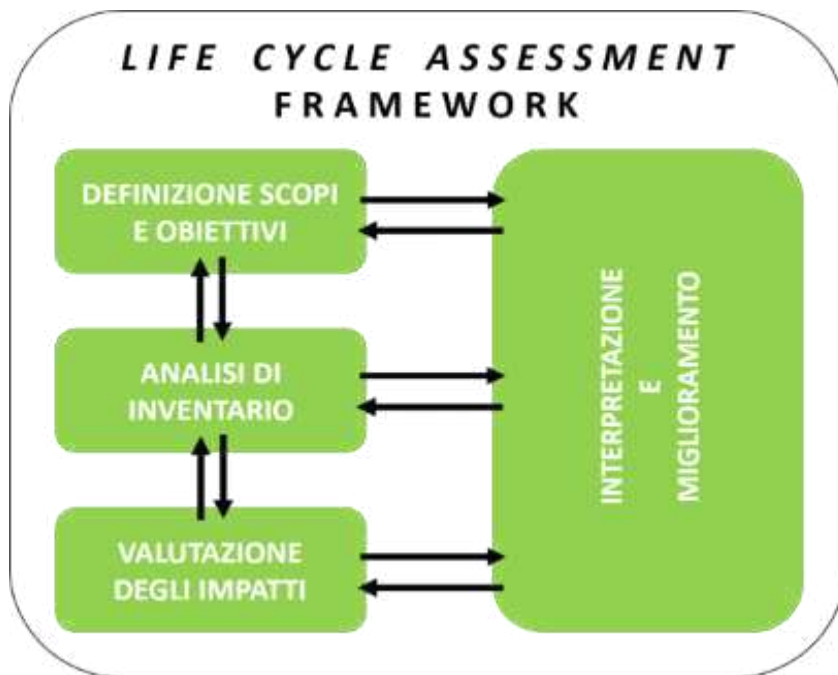


figura 26 struttura LCA, <https://www.reteclima.it/lca-life-cycle-assessment-analisi-del-ciclo-di-vita/>

La definizione degli scopi e obiettivi è la spiegazione della tipologia di studio che si va a realizzare, in particolare viene specificato se è uno studio comparativo tra due o più processi oppure l'analisi di un prodotto già esistente.

Per quanto riguarda lo scopo, questo include la descrizione di due fattori chiave per la realizzazione dell'analisi:

- L'unità funzionale

- L'analisi dei confini del sistema

L'obiettivo principale nell'analisi di LCA è la definizione dell'unità funzionale, cioè il prodotto su cui basare l'analisi e a cui fare riferimento per tutti i dati in ingresso e in uscita.

La definizione dei confini del sistema è un elemento essenziale all'interno di un LCA, poiché definiscono le unità di processo e tutti i flussi in input e output, ma anche perché è possibile omettere alcuni flussi non significativi per l'obiettivo che vogliamo raggiungere.

## 5.2) Metodologie e software

Il software utilizzato per l'analisi, è LCA for expert integrato con il database 2024.1.

Il metodo selezionato per le fasi di classificazione e caratterizzazione e normalizzazione e pesatura è l'Environmental footprint 3.0, metodo recente e consigliato dalla Commissione Europea.

Tale metodo include le categorie e gli indicatori di impatto riportati nella tabella 7.

Tabella 7 categorie e indicatori di impatto

EF 3.0 Acidificazione [Mole of H+ eq.]
EF 3.0 Cambiamento Climatico-totale [kg CO2 eq.]
EF 3.0 Ecotossicità, Acqua dolce-totale [CTUe]
EF 3.0 Eutrofizzazione, acqua dolce [kg P eq.]
EF 3.0 Eutrofizzazione, acqua di mare [kg N eq.]
EF 3.0 Eutrofizzazione, terrestre [Mole of N eq.]
EF 3.0 Tossicità umana , cancerogeni-totale [CTUh]
EF 3.0 Tossicità umana, no-cancerogeni - totale [CTUh]
EF 3.0 radiazioni ionizzanti, salute umana [kBq U235 eq.]
EF 3.0 Utilizzo del suolo [Pt]
EF 3.0 Deplezione dell'Ozono [kg CFC-11 eq.]
EF 3.0 Particolato [incidenza di malattie]
EF 3.0 Formazione fotochimica dell'ozono, salute umana [kg NMVOC eq.]
EF 3.0 Utilizzo di risorse, fossili [MJ]
EF 3.0 Utilizzo di risorse, minerali e metalli [kg Sb eq.]
EF 3.0 Utilizzo idrico [m <sup>3</sup> world equiv.]

# 6) Analisi di sostenibilità del trattamento dei reflui stagnanti post-alluvione

## 6.1) Obiettivo e scopo dell'analisi LCA

Il presente studio si propone di essere un'analisi comparativa tra differenti sistemi mobili di trattamento di acque reflue che intendono essere un'alternativa al tradizionale scenario in cui le acque stagnanti vengono lasciate nelle aree alluvionali per giorni, per poi essere scaricate in mare (senza alcun pretrattamento) causando la proliferazione di patogeni.

A partire dalle tecnologie descritte nel capitolo 3.4, sono state selezionate tre apparecchiature molto efficienti nel campo della disinfezione delle acque reflue. In tutti e tre i casi il trattamento prevede l'utilizzo di agenti disinfettati combinati con un'azione fisica/meccanica.

Ai fini dell'analisi si è ipotizzato di posizionare tali tecnologie a valle delle idrovore, utilizzate come mezzi di pompaggio delle acque, e che non saranno considerate nell'analisi poiché comuni a tutti gli scenari. Ciò che sarà considerato, è il volume di refluo da trattare.

L'unità funzionale selezionata per lo studio è stata identificata in 1 m<sup>3</sup> di refluo da trattare.

L'analisi si è posta come primo obiettivo valutare due diversi agenti disinfettanti selezionati sulla base di reali applicazioni: acido peracetico e diossido di cloro, al fine di identificare la scelta più sostenibile.

Una volta identificato l'agente più sostenibile il secondo obiettivo è stato confrontare tre diverse apparecchiature considerate per il trattamento (Newster, Idrogroup, Klaro) al fine di valutare la scelta a minor impatto ambientale.

Per quanto riguarda la scelta degli agenti disinfettanti, questa si basa su uno studio del politecnico di Milano (Galbiati, 2016) ed uno riportato dall'azienda Newster.

In entrambi i casi si è valutata l'efficienza nell'utilizzo di cloro-derivati, in particolare ipoclorito nel caso dello studio del Politecnico e  $\text{ClO}_2$  nel caso di Newster.

Il cloro e i cloro-derivati sono i disinfettanti più comunemente utilizzati, negli ultimi anni, però, l'acido peracetico si è rivelato una soluzione praticabile, in particolare nel trattamento delle acque reflue. La maggior diffusione del cloro e i cloro-derivati nella disinfezione di acque reflue, è dovuta principalmente alla loro economicità, efficienza, facilità di utilizzo e al loro potenziale di disinfezione residuo. Tuttavia, la maggiore problematica legata alla disinfezione con cloro è la possibilità di formazione di sottoprodotti di disinfezione (DBPs) tossici, sia clorurati che brominati. In tale contesto sono stati quindi condotti studi indirizzati alla ricerca di disinfettanti alternativi che potessero sostituire i cloro-derivati. Un disinfettante ampiamente utilizzato negli ultimi anni nell'ambito della depurazione delle acque reflue è l'acido peracetico (PAA).

I valori tipici di dosaggio, per le sostanze a base di cloro, vanno da 5 a 10 mg/L con tempi di contatto da 30 a 60 minuti al fine di permettere la conformità dei reflui municipali agli standard convenzionali sugli indicatori batterici. Esistono tre forme chimicamente equivalenti con cui il cloro è utilizzato in disinfezione: il cloro elementare  $\text{Cl}_2$ , gas di densità maggiore dell'aria a temperatura ambiente, e le soluzioni di ipoclorito di sodio  $\text{NaClO}$  e di ipoclorito di calcio solido  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ .

Questi composti immessi in acqua rapidamente idrolizzano a formare acido ipocloroso (acido debole parzialmente dissociato). A seconda del valore di pH e di temperatura,

l'acido ipocloroso può dissociarsi nella forma di ione ipoclorito (pH basico). Essendo la superficie degli organismi patogeni carica negativamente, questi sono più facilmente penetrati dalla specie elettricamente neutra ( $\text{HClO}$ ), è quindi opportuno trovarsi in condizioni di pH tendenzialmente acido per ottenere la massima azione battericida. La specie  $\text{HClO}$  è infatti circa ottanta volte più forte come disinfettante della specie  $\text{ClO}^-$ . Mentre se lo scopo è quello di ossidare, è conveniente trovarsi in condizioni di pH tendenzialmente basico poiché è la specie ione ipoclorito ( $\text{ClO}^-$ ) ad avere il maggiore potere ossidante. La somma di acido ipocloroso e ione ipoclorito è definita cloro attivo libero, questo è un ossidante non selettivo e in acqua può dare inizio a una serie di reazioni di decadimento che provocano una perdita di disinfettante dal sistema, oppure un cambiamento nella forma del disinfettante verso specie chimiche meno attive. Le sostanze ossidabili organiche e inorganiche possono consumare cloro attivo tramite reazioni di ossidoriduzione; infatti, la specie ossidante presente all'equilibrio (ione ipoclorito) può reagire con la sostanza ossidabile e ciò determina un consumo della specie disinfettante (acido ipocloroso). Tra le sostanze inorganiche nelle acque naturali, le specie più reattive sono quelle presenti in uno stato di valenza ridotto come ferro, manganese, solfuro, bromuro e ammoniaca, le reazioni con le sostanze organiche procedono invece più lentamente, in funzione della natura delle specie presenti. Tra le sostanze organiche vi sono inquinanti e microinquinanti organici (composti alifatici, idrocarburi aromatici, composti farmaceutici) e la materia organica naturale (NOM, Natural Organic Matter), che può reagire formando molecole organiche clorate, portando alla formazione di nuovi composti definiti sottoprodotti di disinfezione come trialometani (THM), le cui cinetiche di formazione sono favorite da condizioni di temperatura e pH crescenti e dunque dalla presenza in acqua di ioni idrossido ( $\text{OH}^-$ ). I THM che si possono formare sono: cloroformio  $\text{CHCl}_3$ , bromodichlorometano  $\text{CHBrCl}_2$ , dibromoclorometano  $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ , bromoformio  $\text{CHBr}_3$ .

Per quanto riguarda l'acido peracetico (PAA), anche se la sua efficacia aumenta al diminuire della presenza di solidi sospesi totali (TSS), la sua azione sembra non essere influenzata dalla presenza di TSS in concentrazione tra 10 e 40 mg/L, e mantiene una buona efficienza di disinfezione fino a 100 mg/L di TSS. Ha il vantaggio di sfruttare gli stessi bacini utilizzati per la clorazione, evitando quindi la necessità di onerosi investimenti per interventi strutturali, ma molti aspetti del processo di disinfezione con acido peracetico non sono ancora del tutto noti: le cinetiche di decadimento e di disinfezione, la possibilità di ricrescita batterica dovuta alla presenza di acido acetico negli effluenti disinfettati e gli effetti ecotossicologici diretti e indiretti sull'ecosistema acquatico. I valori tipici di dosaggio e di tempi di contatto sono confrontabili con quelli utilizzati nella clorazione: da 1 a 3 mg/L di acido peracetico se l'effluente da disinfettare è di buona qualità (nitrificato e filtrato), e da 30 a 60 minuti per il tempo di contatto. L'acido peracetico è un perossido dell'acido acetico, un composto instabile che può esistere solamente in equilibrio con l'acido acetico, il perossido di idrogeno (HP, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e l'acqua. Nonostante il perossido di idrogeno contribuisca anch'esso al potere disinfettante della miscela, il acido peracetico è un disinfettante più potente anche a basse concentrazioni, tuttavia il PAA è molto meno stabile rispetto al perossido di idrogeno, soprattutto in soluzioni diluite: una soluzione all'1 % perde la metà del suo potere disinfettante in 6 giorni per idrolisi. Quando l'acido peracetico è aggiunto all'acqua questo è soggetto a due principali reazioni un rapido consumo ossidativo iniziale, dovuto all'interazione tra l'acido e i composti organici e inorganici ossidabili presenti in acqua, e il consumo del disinfettante dovuto al suo decadimento, dovuto principalmente a tre tipi di reazioni principali, nell'intervallo di pH tra 5,5 e 9, la decomposizione spontanea a formare acido acetico e ossigeno, l'idrolisi con formazione di acido acetico e perossido di idrogeno, la decomposizione catalizzata dalla presenza di metalli di transizione. Per quanto riguarda l'inattivazione microbica da parte del disinfettante, questa avviene

simultaneamente alle reazioni di decadimento ed è direttamente influenzata da questa. Infatti, sia il consumo ossidativo iniziale che il decadimento naturale del acido peracetico nel tempo devono essere considerati nella valutazione della concentrazione attiva di disinfettante ad ogni tempo di contatto. (Galbiati,2016).

Considerato il primo obiettivo dell'analisi si è deciso di confrontare l'uso di biossido di cloro con l'uso di Acido peracetico. Tra i cloro-derivati si è deciso di selezionare il  $\text{ClO}_2$ , e non l'ipoclorito di sodio sulla base di quanto discusso da studi scientifici (Monarca et al, 1991, Mancini et al,2000). Le due ricerche, infatti confrontano l'efficacia nell'uso dei due agenti dimostrando che il  $\text{ClO}_2$ , non solo consente una riduzione della formazione dei composti alogenati e una maggior efficacia di disinfezione, ma anche un minor consumo di reagente grazie a un maggiore potere ossidante costante anche in presenza di variazioni di pH. Tutti questi aspetti positivi si traducono anche nel dimezzamento dei tempi di contatto rispetto ai processi che impiegano l'ipoclorito. Generalmente, per rappresentare i confini di un sistema, si utilizza un diagramma di flusso che mostra le singole unità di processo (blocchi) e le loro relazioni, o flussi, (freccie). Tutte le unità coinvolte nell'analisi sono racchiuse all'interno di un riquadro che rappresenta appunto i confini del sistema (figura 27).

La figura 27 riassume i confini del sistema costruiti sulla base delle conclusioni raccolte dalla letteratura

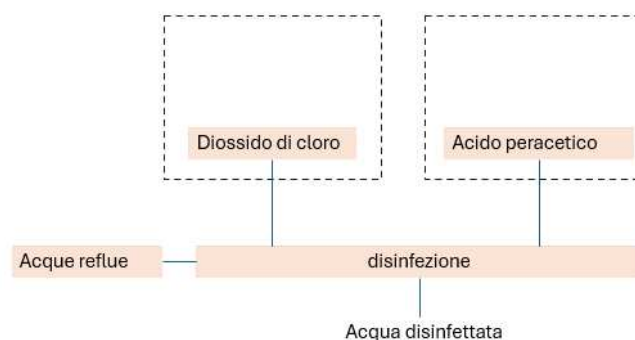


Figura 27 confini del sistema considerati per la prima parte dell'analisi di sostenibilità, per l'identificazione dell'agente disinfettante più sostenibile

Una volta effettuato il confronto tra i due agenti ,si è proceduto al confronto di tre possibili apparecchiature identificate tra quelle mobili presenti in commercio. Tali opzioni rappresentano un'alternativa a quella ad oggi messa in atto che include lo scarico in mare o nei corpi idrici, senza pretrattamento. Il confronto viene fatto tra le apparecchiature delle aziende Idrogroup, Klaro, Newster (figura 28).

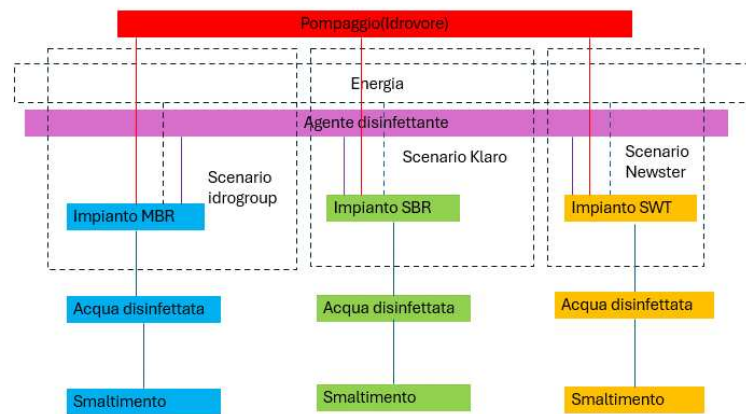


Figura 28 confini del sistema selezionati per la seconda parte dell'analisi di sostenibilità e per l'identificazione della tecnologia mobile più sostenibile

## 6.2) Assunzioni

Al fine delle analisi sono state fatte delle assunzioni. In particolare, l'impatto relativo all'acido peracetico (poichè assente nel database) è ricavato a partire dal suo processo di produzione:



$(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$  rappresentano rispettivamente l'anidride acetica e il perossido di idrogeno, reagenti necessari alla formazione di acido peracetico(PAA).

A partire quindi dalla massa di 50 g di acido(15%), sulla base della stechiometria di reazione, del numero di moli e della massa molare, sono stati ricavati il peso di anidride e di perossido di idrogeno, come riportato di seguito:

$$\text{g CH}_3\text{COOOH}(\text{Acido peracetico}) = 7,5 \text{ g}$$

$$\text{massa molare CH}_3\text{COOOH} = 76,05 \text{ g/mol}$$

$$\text{n moli CH}_3\text{COOOH} = 0,098619329$$

$$\text{n moli} = m/M = \text{g/g/mol} = 7,5/76,05$$

$$\text{n moli CH}_3\text{COOOH} = \text{n moli (CH}_3\text{CO)}_2\text{O} = \text{n moli H}_2\text{O}_2$$

$$\text{g} = \text{n moli} * \text{M} = \text{mol} * \text{g/mol}$$

$$\text{g (CH}_3\text{CO)}_2\text{O}(\text{Anidride Acetica}) = \text{n moli CH}_3\text{COOOH} * \text{massa molare}$$

$$\text{(CH}_3\text{CO)}_2\text{O} = 0,098619329 * 102,9$$

$$\text{g (CH}_3\text{CO)}_2\text{O} = 10,1 \text{ g}$$

$$\text{g H}_2\text{O}_2 = \text{n moli CH}_3\text{COOOH} * \text{massa molare H}_2\text{O}_2 = 0,098619329 * 34,01 \quad \text{g H}_2\text{O}_2 =$$

$$3,4 \text{ g}$$

### 6.3) Analisi dell'inventario

Questi confini del sistema sono stati utilizzati anche per l'esecuzione dell'analisi di sostenibilità economica.

La seconda fase di un LCA è rappresentata dall'analisi dell'inventario, che contiene la raccolta dei dati in input e output riguardanti le unità di processo incluse nei confini del sistema.

La tabella 8 riporta i bilanci di materia in termini di consumi di sostanze disinfettanti. Le informazioni sugli agenti disinfettanti sono state raccolte a partire da una sperimentazione condotta dall'azienda Newster.

Tabella 8 analisi dell'inventario agenti disinfettanti

	Input
agente disinfettante (scenario 1)	50 g (15%)
soda	15 g (30%)
agente disinfettante (scenario 2)	50 g (15%)

Per quanto riguarda i consumi energetici, le tecnologie MBR dell' Idrogroup, sono divise in diversi modelli, ognuno con una diversa capacità di trattamento. Se consideriamo i modelli con capacità di 240 m<sup>3</sup>/giorno(10m<sup>3</sup>/h), la potenza installata è di 21 kW. Volendo trattare 1 m<sup>3</sup> di acqua reflua, la potenza necessaria sarà di 2,1 kW. Il sistema SBR della Klaro ,per trattare 1 m<sup>3</sup>di refluo, ha una potenza riportata nelle schede tecniche di di 2,55 kW, mentre il sistema SWT della Newster assumendo la massima portata e il massimo consumo, richiede una potenza di 1,6 kW per 1 m<sup>3</sup>. Individuando 20 minuti, come tempo di contatto per un efficiente disinfezione.

La tabella 9, invece, riporta i consumi energetici delle tre tecnologie mobili selezionate.

Tabella 9 analisi dell'inventario tecnologie mobili

	output
consumi energetici idrogroup kWh	0,693
consumi energetici Klaro kWh	0,842
consumi energetici Newster kWh	0,528

#### **6.4) Risultati dell'analisi di sostenibilità ambientale**

Dopo aver quantificato i flussi in ingresso e in uscita si individuano tutte le principali categorie di impatto associate ai nostri flussi.

Successivamente si passa alla caratterizzazione, dove si determinano i contributi dei consumi energetici e degli agenti disinfettanti per ogni categoria, moltiplicando il valore dei flussi per un fattore di caratterizzazione, associato a ogni categoria. I contributi calcolati mostrano le categorie più impattate e quelle meno impattate, permettendo di confrontare i vari scenari, e individuare quelli più sostenibili.

Il confronto tra i due scenari relativi all'utilizzo dell'biossido di cloro o dell'acido peracetico(PAA), mostra come il processo di produzione di ClO<sub>2</sub> sia il più impattante per alcune categorie, in particolare per la ecotossicità in acqua dolce, per la tossicità della salute umana legata alla cancerogenità, per l'eutrofizzazione di acqua dolce, per la formazione di particolato, e per la categoria Acidificazione. La differenza in percentuale rispetto all'acido sono del 77% (ecotossicità), del 30 % per la tossicità della salute umana legata alla cancerogenesi, del 52 % per l'eutrofizzazione, del 21 % per la formazione di particolato, e del 50 % per acidificazione.

Dalla descrizione dei processi di produzione del diossido presenti nel database e in letteratura, si osserva come esistano due processi fondamentali per la produzione di biossido, quello che parte da clorato, e quello che parte da clorito. Secondo una

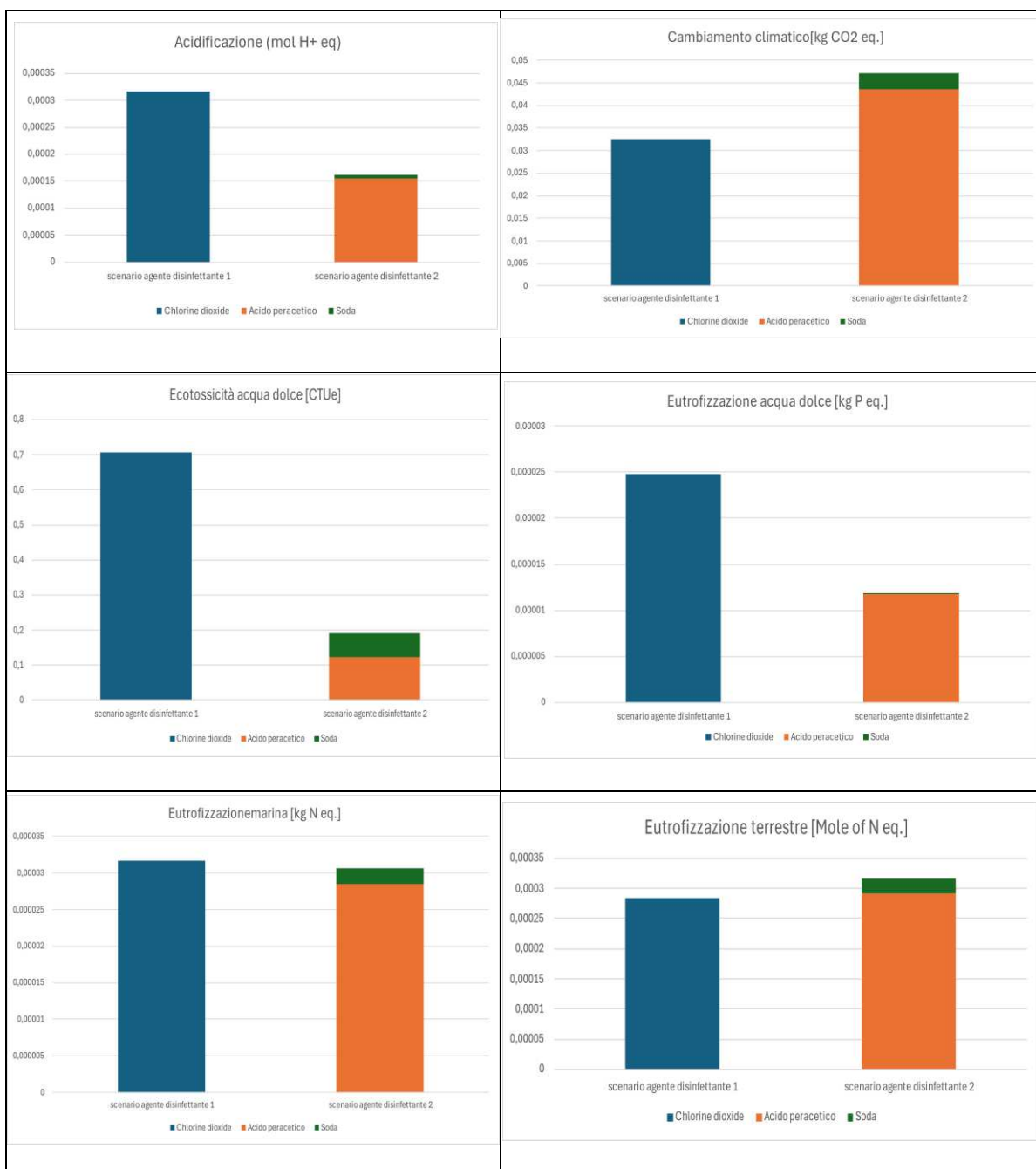
monografia redatta da Caffaro S.P.A nel 2002 e aggiornato nel 2014, il processo più impiegato per la produzione di biossido di cloro è quello che impiega il clorito per ottenere l'agente disinfettante da cloro e acido forte. Nel caso della reazione di clorito con cloro, vi è una forte tossicità potenziale delle sostanze organiche clorurate e Triaolometani, prodotte dalla reazione del cloro con le sostanze umiche presenti nelle acque. Questo ha indotto a ricercare metodi di produzione di biossido di cloro privo o con piccole quantità di cloro molecolare, come per esempio il processo di produzione con clorito e acido cloridrico. Questo processo è il più comunemente impiegato nel campo del trattamento delle acque, data la semplicità di funzionamento e la disponibilità sul mercato delle apparecchiature necessarie. Il clorito può essere commercializzato in stato solido (cristalli di colore bianco) ottenuti da soluzioni acquose industrialmente prodotte. La concentrazione in sostanza attiva nei cristalli è circa 80%, a causa della comburezza del prodotto e per i pericoli derivanti è pertanto commercializzato principalmente in soluzione acquosa limpida di colore giallo chiaro (al 25–31 %). Dall'analisi di questi processi è possibile determinare le cause degli impatti, in particolare il fenomeno dell'acidificazione causato dall'utilizzo di acido cloridrico come reagente, la cancerogenità per l'uomo e la tossicità per gli organismi dovuta alla reazione di clorito e di cloro elementare con composti organici per formare organo clorurati, e la maggiore formazione di particolato dovuto alla formazione di triaolometani molto volatili, in seguito alla reazione con le sostanze organiche. Inoltre, nello stesso studio, viene spiegato come secondo l'IARC( International Agency for Research on Cancer), il clorito non è classificabile come cancerogeno per gli uomini , e il primo e più consistente riscontro derivante dall'esposizione al clorito è lo stress ossidativo che comporta modificazioni nei globuli rossi.

Come visibile in Figura 29 ,alcune categorie di impatto risultano maggiormente colpite dall'acido peracetico e in particolare dagli agenti utilizzati per la sua produzione: anidride

acetica e perossido di idrogeno (i cui processi sono stati estratti dal database di LCA for expert). Si può osservare come tre delle categorie più impattate riguardano la produzione di ozono fotochimico, il cambiamento climatico, e l'utilizzo di risorse fossili. Uno dei principali processi che porta alla formazione di anidride acetica, è l'ossidazione dell'Acetaldeide in fase liquida che porta alla produzione non solo di anidride, ma di acido acetico e perossido di idrogeno come sottoprodotto. Le condizioni operative di questo processo richiedono temperature intorno ai 40-60°C , con una forte esotermicità della reazione ,che necessità di un raffreddamento efficiente. Inoltre i diluenti usati per l'acetaldeide vanno dall' acetato di etile, al cloruro di metilene. L'impatto sul cambiamento climatico e sull' utilizzo delle risorse fossili, in questo caso può essere dovuto alla presenza di sostanze, tra reagenti e diluenti, che sono combustibili, e che quindi portano alla produzione di CO<sub>2</sub>. Per la deplezione dell'ozono, la conseguenza può essere un ulteriore processo di produzione dell'anidride acetica, chiamata sintesi di Williamson(Reazione di Williamson: sintesi degli eteri, meccanismo,2016), in cui vengono fatti reagire acetato di sodio e cloruro di acetile, responsabile dell'impatto sulla categoria di deplezione di ozono. Infine la produzione di ozono troposferico(O<sub>3</sub>) è giustificato dalla presenza di acetaldeide, che è un COV(Composto Organico Volatile) derivante da molte fonti, e come tale, reagendo con gli NO<sub>x</sub>, contribuisce in presenza di radiazione solare alla formazione di O<sub>3</sub>. Le differenze in percentuale rispetto al biossido di cloro sono del 30 % per il cambiamento climatico, del 70 % per la produzione di ozono fotochimico, del 30 % per l'utilizzo di risorse fossili, e del 39 % per la deplezione dell'ozono .

Il processo di produzione di perossido di idrogeno (descritto nel dataset fornito dal software ) consiste invece nell' idrogenazione e nella successiva ossidazione di Antrachinone disciolto in una soluzione contenente solventi polari .

Rispetto all'anidride acetica, il processo di produzione di perossido non contribuisce a impatti significativi su tutte le categorie ad eccezione della categoria relativa all'utilizzo di risorse fossili (figura 29).





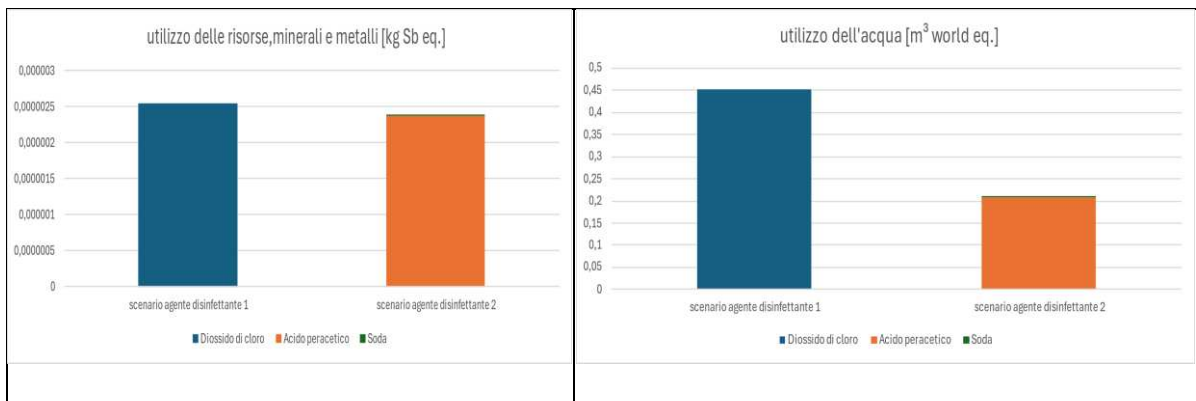


Figura 29 Risultato di classificazione e caratterizzazione, confronto tra acido peracetico e biossido di cloro per tutte le categorie (Unità funzionale: 1 m<sup>3</sup>)

Infine, avendo ogni categoria un diverso indicatore, il confronto tra le diverse categorie viene reso più semplice dall'individuazione di fattori di normalizzazione. Tali fattori sono indispensabili per standardizzare i contributi per ogni categoria, permettendo, una volta moltiplicati i valori dei flussi per ogni fattore, di dare un peso diverso ad ogni categoria, valutando quale sia quella più importante e qual è lo scenario più sostenibile per ognuna di queste.

Complessivamente considerando l'impatto totale, il carico ambientale legato ai due agenti disinfettanti è confrontabile con un vantaggio dell'acido peracetico di circa il 3 % rispetto al biossido di cloro(figura 30).

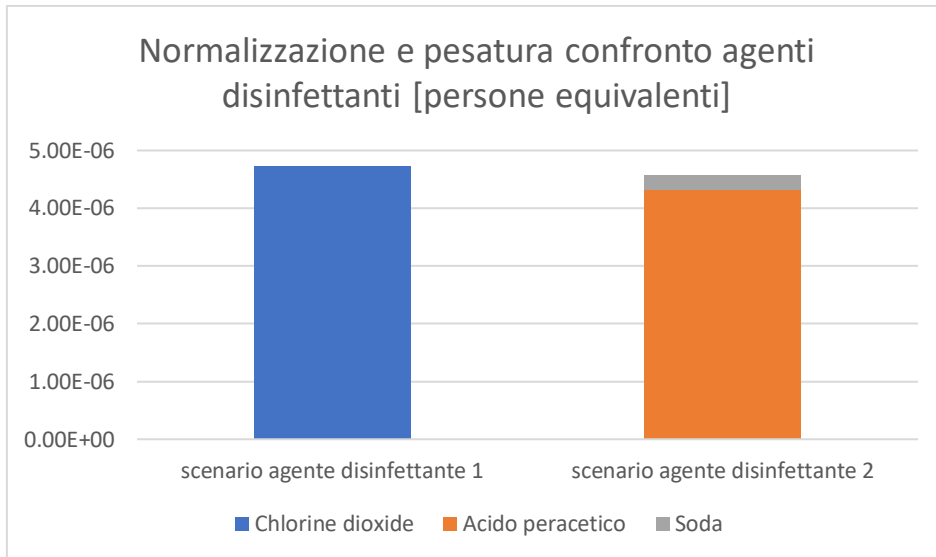


figura 30 normalizzazione e pesatura confronto scenari agenti disinfettanti (unità funzionale 1 m<sup>3</sup>)

Grazie alla normalizzazione vediamo i risultati dei confronti tra le diverse categorie più impattate dal biossido (figura 31) e dall'acido peracetico più soda (figura 32).

I grafici a torta, mostrano un forte impatto sul cambiamento climatico e sull'utilizzo di risorse fossili, sia per acido peracetico e soda, sia per biossido di cloro. E' inoltre possibile osservare i contributi in percentuale relativi a biossido e ad acido. L'acido e la soda incidono sulla formazione dell'ozono per un 9% rispetto al 3% del biossido, mentre il biossido incide di più sull'acidificazione, sulla tossicità degli organismi, e sull'eutrofizzazione di acqua dolce, con una percentuale del 7% per acidificazione ed ecotossicità, e del 9% per eutrofizzazione. Vediamo inoltre come le categorie cambiamento climatico e utilizzo di risorse fossili, siano uguali e superiori in termini

percentuali rispetto alle altre, con l'acido peracetico che incide su entrambe per il 26 % rispetto al 18% del biossido di cloro.

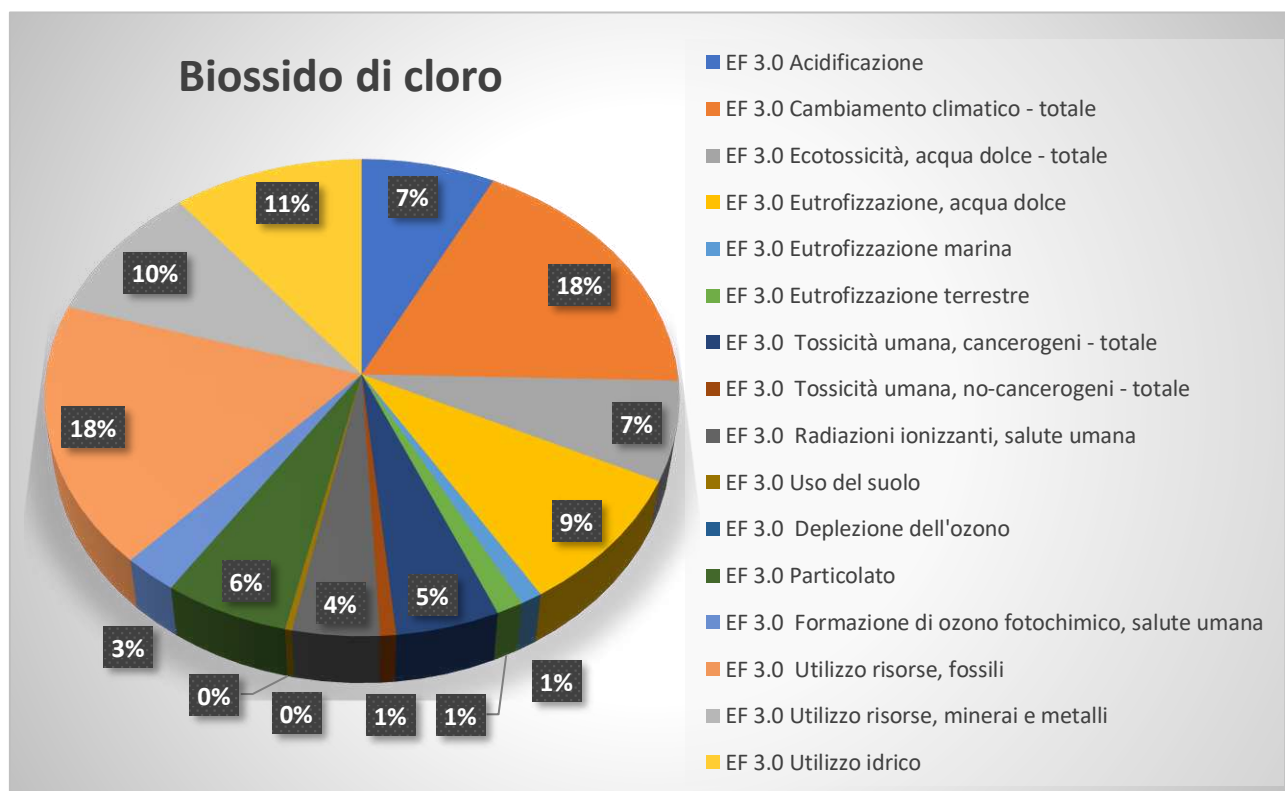


figura 31 normalizzazione e pesatura contributi percentuali per ogni categoria di biossido di cloro

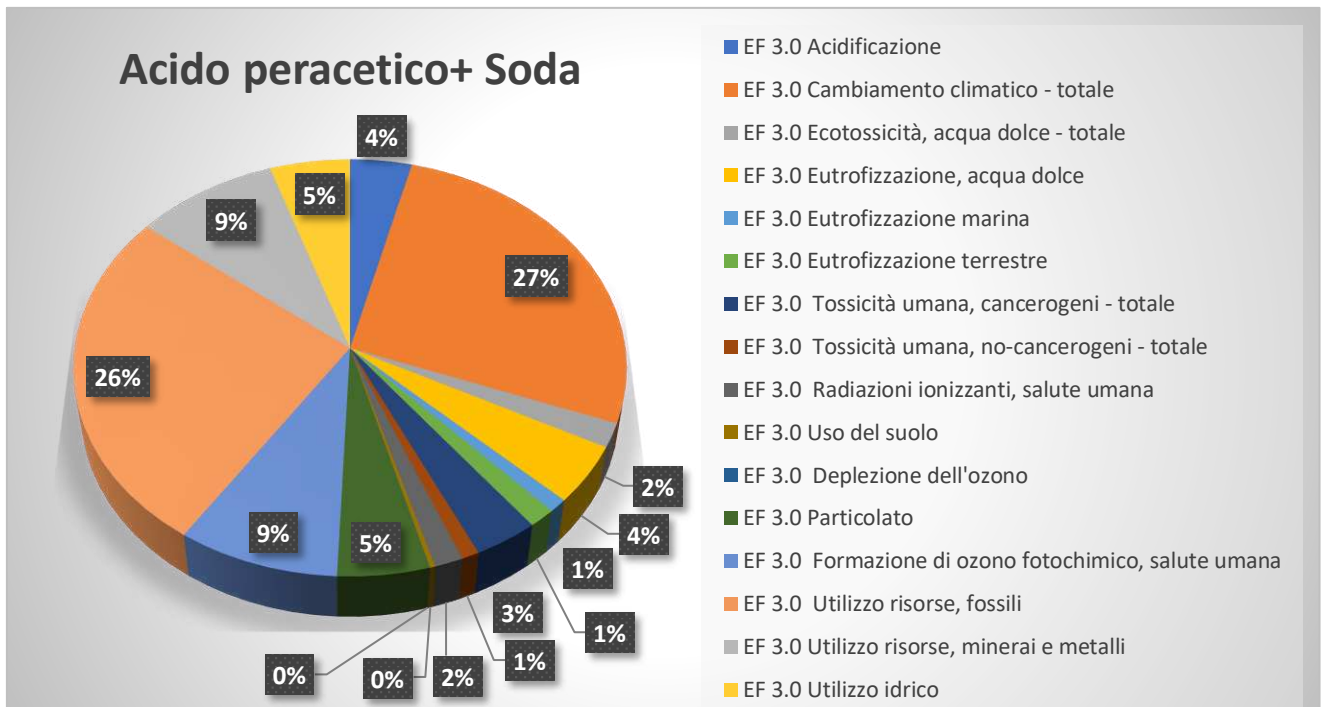


figura 32 normalizzazione e pesatura contributi percentuali per ogni categoria di acido peracetico+soda

Nella valutazione del miglior agente disinfettante da utilizzare dovrebbero entrare in gioco gli aspetti della sostenibilità integrati con quelli tecnici, legati all'efficacia dell'utilizzo dell'agente stesso.

Per quanto riguarda l'efficienza di abbattimento, infatti, nello studio relativo al confronto tra acido peracetico e biossido di cloro, si fa riferimento a un esperimento in cui sono state prelevati e analizzati i campioni di acqua provenienti dall'impianto di depurazione della città di Bologna e trattati con biossido e acido peracetico utilizzando un tempo di permanenza di 20 minuti. Valutando l'efficienza di abbattimento di Coliformi e streptococchi, l'acido peracetico è risultato avere un'efficienza migliore rispetto al biossido, poiché in presenza di solidi sospesi in piccole concentrazioni(12-15mg/l), parte

del biossido di cloro non svolge la sua azione disinfettante in quanto impiegato nell'ossidazione dei composti organici, mentre l'acido peracetico sembrerebbe svolgere la sua azione battericida indipendentemente dalla concentrazione di solidi sospesi fino a una concentrazione di 100mg/l.(Mancini et al.)

Nel caso delle tre tecnologie, il vantaggio tecnico è indubbiamente lo stesso, ovvero quello di poter essere installate e trasportate immediatamente sul luogo dell'evento. Tuttavia, ognuna di esse ha processi diversificati, che richiedono specifici consumi energetici. È importante quindi fornire, in fase di pianificazione, ai principali attori coinvolti nella fase emergenziale, la tecnologia più efficiente ma anche quella più sostenibile a livello energetico. Se si osservano i loro rispettivi consumi, il sistema SBR della Klaro risulta il meno sostenibile dal punto di vista energetico, con il sistema MBR e SWT dell'Idrogroup e della Newster che hanno un migliore consumo energetico. Osserviamo inoltre come lo scenario Newster sia migliore rispetto agli altri due (figura 33).

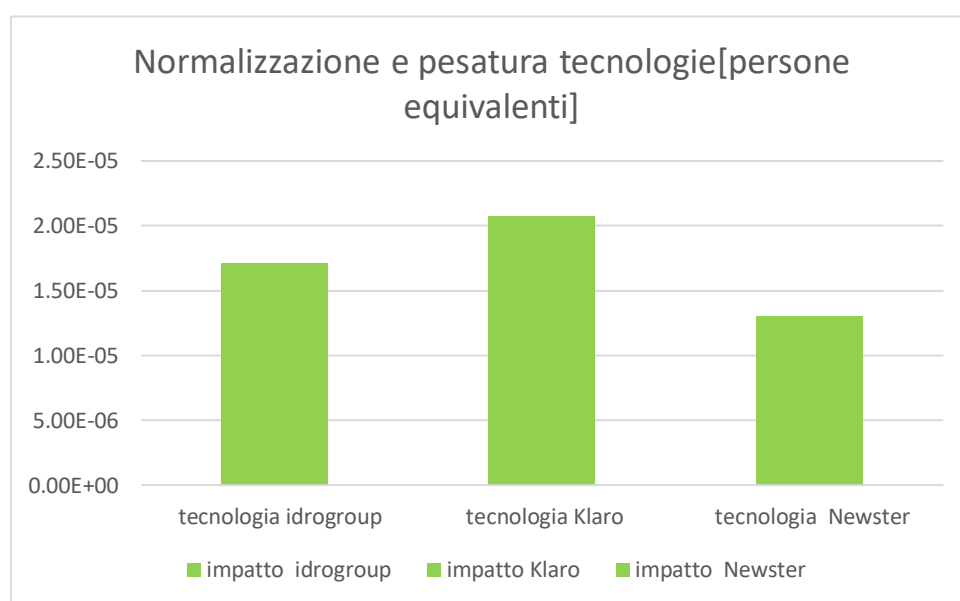


figura 33 normalizzazione e pesatura, confronto tra gli impatti delle diverse tecnologie in funzione, escluso l'impatto associato all'agente disinfettante (unità funzionale:  $lm^3$ )

Identificato l'acido peracetico, come il disinfettante più sostenibile e più efficace, si è proceduto a combinare il suo impatto con quello legato al funzionamento delle diverse tecnologie identificate. Si è assunto di usare la stessa quantità di agente per tutte e tre i sistemi.

E dalla Figura 34 si vede come, nello scenario di Newster, identificato come il meno impattante il contributo dell'agente risulta essere il 35% sul totale. (figura 34).

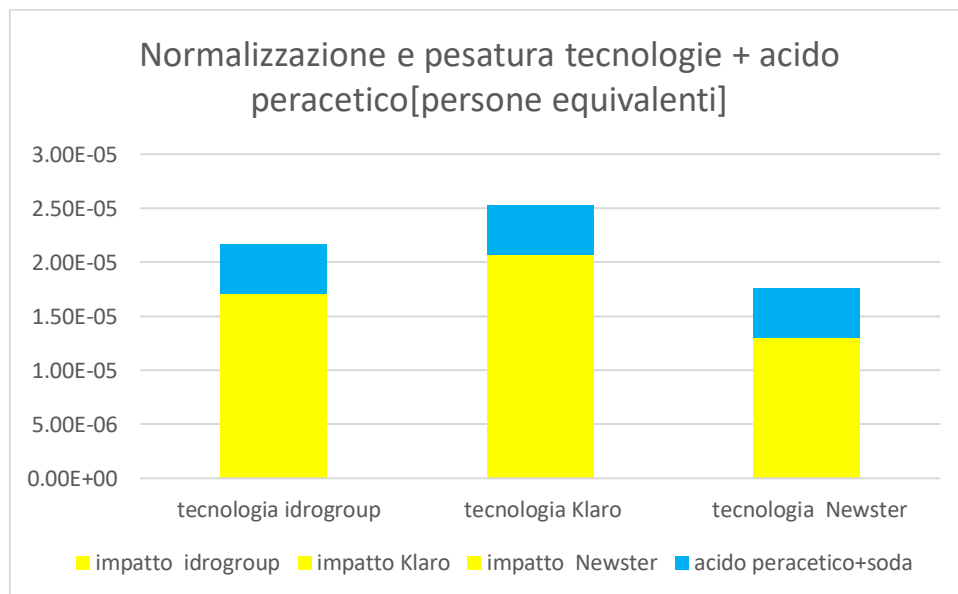


figura 34 normalizzazione e pesatura, confronto tra gli impatti delle diverse tecnologie in funzione incluso l'impatto associato all'acido peracetico+soda (unità funzionale 1 m<sup>3</sup>)

## 6.5) Risultati dell'analisi di sostenibilità economica

Per poter fare un'analisi dei costi, relativa all'impiego di acido peracetico o di Biossido di cloro, è importante conoscere in che concentrazione vengono venduti i due prodotti, o come vengono prodotti.

Una tanica di 25 kg di acido peracetico, venduto al 15 %, può arrivare a costare 100 euro (Lavanderia store), quindi circa 4 €/kg.

Il biossido di cloro, essendo instabile ad alte concentrazioni(>10%), viene prodotto in loco a partire da clorito di sodio e acido cloridrico (Caffaro S.P.A,2002-2014).

In letteratura si riporta che 1,21 kg di clorito di sodio(1000 ml) al 25%, è venduto a 48,60 €(Acqua lab), mentre una tanica di 25 kg di acido cloridrico (30-33 %), viene venduto a 98,70 € (Lavanderia store).

Considerando quindi la stessa quantità di prodotto utilizzato, sia per acido peracetico, sia per biossido di cloro, il costo relativo al trattamento di 1 m<sup>3</sup> di acque reflue con acido è di 0,2 euro per 50 g.

Nel bilancio economico è previsto anche l'idrossido di sodio(soda), che viene venduto in tanica di 25 kg a 54,90 € e a concentrazioni del 30-33%. Essendo 15 g, la quantità di idrossido utilizzata insieme ad acido peracetico, il costo per trattare 1 m<sup>3</sup> sarà di 0,033 €.

Il costo complessivo di acido peracetico più soda è di 0,2 €.

Per il biossido invece, si ricava il costo totale sulla base della quantità di clorito di sodio, e di acido cloridrico necessari a ottenere tramite reazione 50 g di biossido di cloro al 15%(7,5g) in loco:



I risultati dell'analisi stechiometrica mostrano come siano necessari 50 g di clorito di sodio al 25 % di soluzione , e 13 g di acido cloridrico al 30%, per sintetizzare 7,5 g di biossido. Il costo della quantità necessaria a trattare 1 m<sup>3</sup> di acque reflue corrisponderà quindi a 2 € per il clorito , e 0,05 euro per l'acido cloridrico. Complessivamente, quindi, il costo finale per l'utilizzo del biossido di cloro, sarà pari a 2 €.

Per i consumi energetici, l'analisi economica viene fatta in relazione al costo per chilowattora, che per fascia oraria unica è pari a 0,12 €/kWh (Arera, 2024)

I costi euro/kg ed euro/kWh per tutti è due gli agenti, e per la tecnologia Newster, sono descritti nella tabella 10, e nella figura 35.

Tabella 10 confronto costi agenti disinfettanti e consumi energetici

Costo unitario	Scenario 1	Scenario 2
Energia	0,12 €/kWh	0,12 €/kWh
Agente 1(biossido di cloro)	44 €/kg	/
Agente 2(Acido peracetico+soda)		6 €/kg

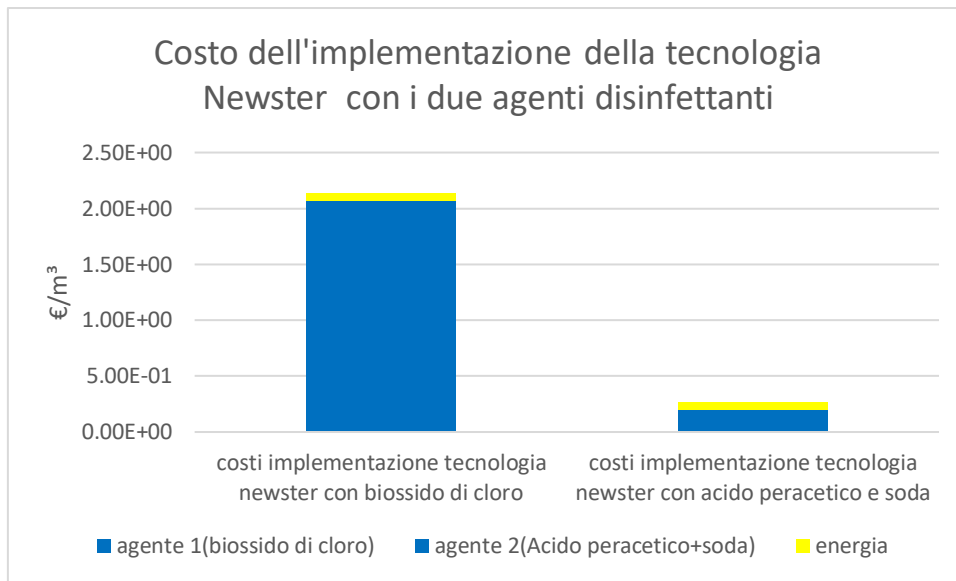


Figura 35 confronto costi agenti disinfettanti e consumi energetici newster

Dalla figura 35, si evince che i costi dovuti all'utilizzo di acido peracetico sono più sostenibili dal punto di vista economico con un risparmio di circa il 90% rispetto al biossido, che presenta l'ulteriore difficoltà tecnica di dover essere prodotto sul momento, poiché instabile a concentrazioni superiori al 10 %.

La valutazione della sostenibilità economica si trova quindi in accordo con le considerazioni fatte sull'efficacia di abbattimento di patogeni. L'acido peracetico è la scelta migliore dal punto di vista economico, dal punto di vista tecnico, e dal punto di vista che riguarda la sicurezza e la salute umana.

D'altro canto, gli aspetti ambientali non sembrano prediligere un agente piuttosto che un altro, considerati i risultati confrontabili. Gli aspetti ambientali, tuttavia, risultano importanti nella scelta dell'apparecchiatura considerato il più basso consumo energetico della tecnologia Newster che si traduce in una effettiva riduzione del carico ambientale fino al 25%.

## 7) Conclusioni

A partire dall'analisi del caso studio dell'evento alluvionale che ha coinvolto il territorio dell'Emilia-Romagna nel 2023, il presente lavoro di tesi ha approfondito una criticità molto comune in questo tipo di emergenze, ovvero la gestione dell'acqua stagnante che resta nelle zone abitate nei giorni successivi all'evento.

Per risolvere questo problema si è proposto l'utilizzo di sistemi mobili di trattamento di acque reflue, facilmente trasportabili direttamente verso le zone colpite tramite container.

Nell'ottica della sostenibilità, aspetto spesso trascurato in fase di gestione delle emergenze, i sistemi sono stati analizzati con un approccio del ciclo di vita, integrando aspetti della sostenibilità tecnica, ambientale ed economica.

La combinazione dei 3 aspetti ha identificato come scenario migliore l'utilizzo dell'apparecchiatura di Newster composta da un separatore, dove le acque reflue vengono filtrate con un filtro a vite, che permette la separazione dei materiali solidi, dal refluo e da una vasca di disinfezione dove il refluo e il disinfettante (Acido peracetico o biossido di cloro) vengono miscelati, con lo scopo di abbattere i patogeni presenti.

Tale apparecchiatura, garantisce un minor consumo energetico con un conseguente risparmio economico e di emissioni.

La scelta del miglior agente disinfettante, ha invece mostrato come non ci siano significativi vantaggi di tipo ambientale, ma un miglioramento della sostenibilità economica del processo di circa l'80%.

La tesi si propone quindi di fornire informazioni utili ai pianificatori della gestione delle emergenze, con un metodo totalmente innovativo che introduce il tema della sostenibilità anche in situazioni particolarmente critiche come quelle degli eventi alluvionali.

## Bibliografia

- [agtecher,2023, https://agtecher.com/it/the-full-history-of-agriculture-from-hunter-gatherers-to-modern-farming/](https://agtecher.com/it/the-full-history-of-agriculture-from-hunter-gatherers-to-modern-farming/)

- Agua lab,2024, Clorito di sodio 25% 1000 ml individuale, <https://agualab.it/25-clorito-di-sodio/clorito-di-sodio-25-1000-ml-individuale.html>

-Amato A, Gabrielli F, Spinozzi F,Galluzzi Magi L, Balducci S, Beolchini F, Journal of Flood Risk Management,2019, Disaster waste management after flood events.

-Amazon 2024,soda caustica liquida 30/33% tanica da 25 kg idrossido di sodio <https://www.amazon.it/dp/B08T6GFGJ4?tag=ipvreviews544679-21&linkCode=ogi&th=1&psc=1>

-Anderson C, Malambo D.H, Perez M.E.G , Nobela H.N, de Pooter L, Spit J,Hooijmans C.M, de Vossenbergh J, Greya W , Thole B , van Lier J.B, Brdjanovic D,2015, International Journal of Environmental Research and Public Health, Lactic Acid Fermentation, Urea and Lime Addition: Promising Faecal Sludge Sanitizing Methods for Emergency Sanitation.

-ARERA,2024,valori della materia energia per il servizio di maggior tutela <https://www.arera.it/consumatori/valori-della-materia-energia-per-il-servizio-di-maggior-tutela>

-Arrow operations and Technologies,2024, the predator series <https://ecoarrow.com/products/the-predator-series/>

-Arsimak,2024,impianto MBBR, <https://www.arsimak.com/mobile-containerized-wastewater-treatment-systems/>

-Bert V , Seuntjens P , Dejonghe W, Lacherez S, Thuy H.T.T, Vandecasteele B, 2009, Phytoremediation as a management option for contaminated sediments in tidal marshes, flood control areas and dredged sediment landfill sites.

-Caffaro S.P.A,2014, il biossido di cloro,<https://www.periti-industriali.firenze.it/it/eventi/allegati/125/Monografia-Caffaro.pdf>

- Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica,2019, una storia di alluvioni in Italia (1951-2018), <https://www.polaris.irpi.cnr.it/wp-content/uploads/POLARIS-PRESENTAZIONE-LIGHT-1.pdf>

Chimicamo,2016, Reazione di Williamson: sintesi degli eteri, meccanismo, <https://chimicamo.org/chimica-organica/reakzione-di-williamson/>

-Dekanter® hts flottweg per la disidratazione dei fanghi,2024, sezione trasversale centrifuga flottweg per ispessimento e disidratazione <https://www.flottweg.com/it/linea-di-prodotti/decanter/decanter-hts/>

- Dipartimento di protezione civile, 2018, Alluvioni, <https://www.protezionecivile.gov.it/it/approfondimento/alluvioni/#:~:text=Le%20alluvioni%20sono%20tra%20le,vie%20di%20comunicazione%2C%20zone%20agricole>

- European Climate and Health Observatory, Flooding, 2024, <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/observatory/evidence/health-effects/flooding>
- Flottweg,2024, <https://www.flottweg.com/it/linea-di-prodotti/sistemi/impianti-di-disidratazione-mobili/>
- Flottweg,2024, flottweg xelletor, [https://www.flottweg.com/fileadmin/user\\_upload/data/pdf-downloads/Xelletor-IT-min.pdf](https://www.flottweg.com/fileadmin/user_upload/data/pdf-downloads/Xelletor-IT-min.pdf)
- Gruppo Hera,2024,I nostri impianti,<https://www.gruppohera.it/gruppo/attivita/acqua/i-nostri-impianti>
- Herambiente,2023,Herambiente al servizio dei territori alluvionati dell’Emilia-Romagna, <https://ha.gruppohera.it/herambiente-a-servizio-dei-territori-alluvionati-dell-emilia-romagna>
- Huber technology waste water solutions,2024, <https://www.huber-se.com/products/detail/huber-screw-press-q-press/#benefits>
- impianti di disidratazione mobili ,2024, sistema mobile flottweg con centrifuga, <https://www.flottweg.com/it/linea-di-prodotti/sistemi/impianti-di-disidratazione-mobili/>
- Idrogroup,2024,impianto mobile in container MBR, <https://www.idro.net/upload/blocchi/MBR.pdf>
- Ispra, 2021, le alluvioni, <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/dissesto-idrogeologico/le-alluvioni>
- Ispra,2022, alluvione in Emilia-Romagna:piogge record,fiumi e corsi d’acqua esondati, <https://www.isprambiente.gov.it/it/archivio/notizie-e-novita-normative/notizie-ispra/2023/05/maltempo-in-emilia-romagna-piogge-record-fiumi-e-corsi-dacqua-esondati>
- Ispra, 2022, Rapporto nazionale “consumo di suolo”, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2022, <https://www.isprambiente.gov.it/it/archivio/eventi/2022/07/presentazione-del-rapporto-nazionale-201consumo-di-suolo-dinamiche-territoriali-e-servizi-ecosistemici-edizione-2022201d>
- Klaro,2024,impianto SBT, [https://en.klaro.eu/fileadmin/user\\_upload/downloads/broschueren/2023/Technical\\_brochure\\_KLARO\\_Container.One.pdf](https://en.klaro.eu/fileadmin/user_upload/downloads/broschueren/2023/Technical_brochure_KLARO_Container.One.pdf)
- Lavanderia store ,2024,acido peracetico 25 kg 15 %, [https://www.lavanderiastore.it/prodotto/acido-peracetico/?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjw3vO3BhCqARIsAEWblcBsL65TjMsjMl-ZM9nWyOINoyrS0y46GB59CvdQDIL9OPcnx6bgf60aAkv8EALw\\_wcB](https://www.lavanderiastore.it/prodotto/acido-peracetico/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw3vO3BhCqARIsAEWblcBsL65TjMsjMl-ZM9nWyOINoyrS0y46GB59CvdQDIL9OPcnx6bgf60aAkv8EALw_wcB)
- Lavanderia store,2024, Acido cloridrico 30/33% 25 kg, [https://www.lavanderiastore.it/prodotto/acido-cloridrico/?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjw3vO3BhCqARIsAEWblcCbNhd-eGWNJr\\_DTNJtGUTtLQquVJTQ23PEcIYTcq3S0nSzDCsCKdMaAnpNEALw\\_wcB](https://www.lavanderiastore.it/prodotto/acido-cloridrico/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw3vO3BhCqARIsAEWblcCbNhd-eGWNJr_DTNJtGUTtLQquVJTQ23PEcIYTcq3S0nSzDCsCKdMaAnpNEALw_wcB)

- Mancini M.L,Sorrentino M,2000,“Sperimentazione di tecniche di disinfezione mediante biossido di cloro e acido peracetico applicate alle acque reflue dell’impianto di trattamento della città di Bologna”, <https://anovastudi.com/wp-content/uploads/2014/02/cap3-confronto.pdf>
- Matuku P, 2020, Novel concepts, systems and technology for sludge management in emergency and slum settings
- Mena water,2024, <https://mena-water.com/container/sludge-dewatering-unit/>
- Mena water,2024, impianto mobile in container, <https://mena-water.com/container/sludge-dewatering-unit/>
- Mena Water,2024, impianto sacco-secco, <https://mena-water.com/products/bag-dryer/>
- Monarca S, Nardi G, Ferretti D ,Dorè F,Francescani A,Grottolo M,1991.,“Uso del biossido di cloro nella disinfezione delle acque reflue di depuratori civili”,<https://anovastudi.com/wp-content/uploads/2014/02/cap3-confronto.pdf>
- Nier,2022, LCA – Life Cycle Assessment, <https://www.niering.it/life-cycle-assessment-lca/>
- Price compare 24, 2024,soda caustica liquida 30/33% tanica da 25 kg idrossido di sodio [https://it.pricecompare24.com/product/soda-caustica-liquida-3033-tanica-da/B08T6GFGJ4/?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjw6oi4BhD1ARIsAL6pox0NuZSIInsG24tvJYfE3kJ1HWLBYRBIDYsuSeGGI3uDcLURKTVgGmUUaArwFEALw\\_wcB](https://it.pricecompare24.com/product/soda-caustica-liquida-3033-tanica-da/B08T6GFGJ4/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw6oi4BhD1ARIsAL6pox0NuZSIInsG24tvJYfE3kJ1HWLBYRBIDYsuSeGGI3uDcLURKTVgGmUUaArwFEALw_wcB)
- Rapporto città clima, 2023, speciale alluvioni, <https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2023/11/Report-Citta-Clima-2023-Alluvioni.pdf>
- Rapporto WWF, 2018, Valuing Rivers, [https://d24qi7hskwe91.cloudfront.net/downloads/wwf\\_valuing\\_rivers\\_final.pdf](https://d24qi7hskwe91.cloudfront.net/downloads/wwf_valuing_rivers_final.pdf)
- Regione Emilia Romagna-ambiente,2023,Gestione rifiuti alluvione 2023, <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/rifiuti/rifiuti/piano-rifiuti/gestione-rifiuti-alluvione-2023>
- Report IPCC, 2023, Climate Change 2023 <https://cittaclima.it/2023/03/20/pubblicato-il-sesto-rapporto-ipcc/>
- Report C40 cities,2024, water safe cities, <https://storymaps.arcgis.com/stories/75508f9fac8c43bda366ae545fb60ec8>
- Rivista di Arpae dell’Emilia-Romagna,5/11/2023, Ecoscienza sostenibilità e controllo ambientale, <https://www.arpae.it/it/notizie/12019alluvione-in-emilia-romagna-online-ecoscienza-5-2023>
- Tecnosida clean air for industries,2024, Filtri a maniche con sistema di inertizzazione per la depurazione dei fumi ,<https://www.tecnosida.it/impianti-neutralizzazione-fumi-e-iniezione-calce>
- Tempark T, Lueangarun S, Chatproedprai S, Wananukul S,International journal of dermatology,2013, flood related skin- diseases:a literature rewiev, [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/ijd.12064?saml\\_referrer](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/ijd.12064?saml_referrer)



