



Gruppo di Lavoro 2
– *Tecnologie e Buone pratiche* –

P4

Le migliori tecnologie e buone pratiche per la
gestione circolare del fosforo
Aggiornamento 2025

Gennaio 2026

Indice

Indice	3
Indice delle Figure.....	7
Indice delle Tabelle	9
Premessa.....	10
Partecipanti al Gruppo di Lavoro N.2 - Tecnologie e Buone Pratiche (GdL2), alla data di dicembre 2025.....	11
1. Introduzione	14
1.1. Introduzione alle fonti alternative di fosforo.....	16
1.2. Acque reflue e Fanghi di depurazione	17
1.3. Rifiuti e sottoprodotti organici.....	19
1.4. Batterie agli ioni di litio	20
1.5. Confronto delle diverse tecnologie per il recupero del fosforo	21
2. Fosforo e produzione scientifica (aggiornamento a gennaio 2026).....	24
3. Evoluzione dell'applicazione delle tecnologie per il recupero del fosforo a livello internazionale	26
3.1. Panoramica delle tecnologie di recupero esistenti del fosforo dalle acque reflue urbane e dai fanghi	28
Valorizzazione del fosforo presente nei fanghi di depurazione	29
3.2. Panoramica delle tecnologie in piena scala per il recupero del fosforo localizzate in Europa – aggiornamento gennaio 2026	30
Tecnologie di recupero di fosforo dal fosfato disciolto nei surnatanti dei digestati dei fanghi di depurazione come monoammio fosfato	30
Tecnologie di recupero di fosforo dai fanghi di depurazione.....	32
Tecnologie di recupero di fosforo da ceneri di mono-incenerimento fanghi	33
4. Nuova Direttiva Europea acque reflue urbane	35
4.1. Implicazioni della evoluzione della Direttiva Europea acque reflue sulla gestione del fosforo	36
5. Bilancio semplificato del fosforo a livello nazionale ed opportunità di recupero dalle acque reflue.....	39
NOTA alla presente raccolta di tecnologie e progetti	42
6. Tecnologie per il recupero del fosforo sviluppate dai partecipanti alla Piattaforma	43
6.1. Tecnologia termochimica innovativa di recupero del fosforo	43

Università degli Studi di Brescia	43
6.2. Processo termochimico integrato per recupero di fosforo e biocarbone	44
RE-CORD	44
7. Progetti inerenti il fosforo dei partecipanti alla Piattaforma	45
7.1. DEASPHOR: Recupero del P per via chimica da ceneri di pollina.....	45
Università degli Studi di Brescia	45
7.2. PHIGO: Recupero del fosforo per via termochimica da ceneri di rifiuti organici	46
Università degli Studi di Brescia	46
7.3. FLASHPHOS - The complete thermochemical recycling of sewage sludge.....	47
Italmatch	47
7.4. PHOSTER – Recupero di fosforo e magnesio da flussi di rifiuti per la produzione di fertilizzanti rinnovabili di alta qualità.....	48
Politecnico di Milano	48
7.5. Struvite – Trattamento degli effluenti e digestati zootecnici per ridurre le emissioni e produrre Struvite	49
CRPA (Centro Ricerche Produzioni Animali).....	49
8. Altri progetti dei partecipanti al GdL2 che sono di interesse per la Piattaforma Italiana del Fosforo	51
8.1. Progetto CN AGRITECH	51
8.2. Progetto Econutri - Innovative concepts and technologies for Ecologically sustainable Nutrient management in agriculture aiming to prevent, mitigate and eliminate pollution in soils, water and air	55
Università di Torino	55
8.3. Progetto GRIP – Processi Verdi per la produzione industriale e conveniente valorizzazione degli effluenti	56
Università di Torino	56
8.4. Progetto IPCEI Batteries (2) - EuBatIn	57
Italmatch	57
8.5. Progetto Idro.Smart	58
RE-CORD	58
8.6. Progetto P2GreenN.....	59
IRIDRA.....	59
9. Nuovi Progetti ed attività di interesse della Piattaforma Italiana del Fosforo	

nell'anno 2025	60
9.1. Nuovi progetti	60
UPCYCLE	60
NEOFOS	61
F.O.S.F.O.R.O	61
9.2. Evoluzione dei progetti in corso ed Ulteriori attività	62
10. Conclusioni.....	65
11. Riferimenti bibliografici	66
12. Sitografia.....	68
Appendice A – TRL	71

Indice delle Figure

Figura 1. Domanda di fosforo per settore in rapporto alla domanda totale di fosforo minerale dell'Unione Europea pari a circa 1550 ktP/anno (P-REX, 2017)	14
Figura 2. Confronto del contenuto di fosforo in rifiuti ed acque di rifiuto (Laga 2015). 16	
Figura 3. Andamento della produzione scientifica riguardante il recupero del fosforo (da Scopus, www.scopus.com). Si noti che nella legenda è da intendersi P come <<phosphorus OR phosphorous>> e i confronti sono sempre rispetto alla prima serie di dati (cioè P AND recovery AND waste*; P AND recovery AND wastewater; P AND recovery AND Italy). L'asterisco (*) indica qualsiasi lettere. Tutti i termini cercati in "Article title, Abstract, Keywords", tranne "Italy" in "Affiliation country". Consultazione Scopus eseguita il 16 gennaio 2026.	24
Figura 4. Andamento della produzione scientifica riguardante la gestione del fosforo (da Scopus, www.scopus.com). Si noti che nella legenda è da intendersi P come <<phosphorus OR phosphorous>> e i confronti sono sempre rispetto alla prima serie di dati (cioè P AND management AND Italy). Tutti i termini cercati in "Article title, Abstract, Keywords", tranne "Italy" in "Affiliation country". Consultazione Scopus eseguita il 16 gennaio 2026.	25
Figura 5 Schema di flusso semplificato di un impianto di trattamento reflui dove sono riportati (coi numeri) i punti potenziali per il recupero del fosforo	30
Figura 6 Bilancio semplificato dei flussi del fosforo in Italia. Valori in kTon/a di P. Dati da Van Dijk et al., 2016. Anno di riferimento per la valutazione, 2005. La tabella riporta le principali perdite misurate nei rifiuti organici solidi e liquidi. Il valore per la produzione agricola riporta l'accumulo	39

Indice delle Tabelle

Tabella 1. Principali caratteristiche dei tre maggiori flussi di fosforo potenzialmente recuperabili in Europa (Modificata da Nattorp et al., 2019)	17
Tabella 2. Sommario delle tecnologie disponibili per il recupero del fosforo (elaborazione UNIVPM; PIF, 2019a)	23
Tabella 3 Riassunto delle principali tecnologie ed applicazioni per il recupero di fosforo dalle acque reflue (Fonte: Kabbe, 2023; https://www.phosphorusplatform.eu/images/download/Kabbe_P-recovery_tech_implementation%20Table_2023-01-04.pdf).....	27
Tabella 4 Requisiti per il trattamento terziario degli scarichi provenienti dagli impianti di trattamento delle acque reflue urbane di cui all'articolo 7(1) [cioè $\geq 150\,000$ a.e.] o dagli impianti di trattamento delle acque reflue urbane che servono gli agglomerati di cui all'articolo 7(3) [cioè $\geq 10\,000$ a.e. che scaricano in aree sensibili]. Per gli scarichi provenienti dagli impianti di trattamento delle acque reflue urbane di cui all'articolo 7(1), si applicano entrambi i parametri. Per gli agglomerati di cui all'articolo 7(3), possono essere applicati uno o entrambi i parametri a seconda della situazione locale. Si applicano i valori per la concentrazione o per la percentuale di riduzione. [Nota: la tabella Direttiva riporta alcune note di maggiore specificità per l'applicazione dei valori sotto riportati: per maggiori dettagli si faccia riferimento alla Direttiva]	37

Premessa

Il presente documento rappresenta l'aggiornamento dell'analisi delle Tecnologie e Buone Pratiche effettuata, prima nel 2019 all'interno delle attività della Piattaforma Italiana del Fosforo (PIF, 2019a; 2019b), poi nel 2023 e quindi nel 2024.

Il documento si pone l'obiettivo di censire le attività relative alle Tecnologie e Buone Pratiche intercorse dal 2019 ad oggi (ovvero gennaio 2026). L'analisi tenta di concentrarsi sul ruolo delle attività dell'Italia nel settore del recupero e della gestione del fosforo.

Il presente Report NON ha l'obiettivo di sostituirsi ai documenti già prodotti negli anni precedenti, ma di aggiornarli. I documenti già prodotti, infatti, presentano un'analisi dettagliata (specie quelli del 2019) delle tecnologie e buone pratiche disponibili che hanno visto poche modifiche negli ultimi anni. In questo senso, si vuole presentare un documento "snello" che, quando necessario, faccia richiamo a quanto già prodotto.

Allo stesso tempo, il presente Report costituisce un ampliamento di quelli preparati nel 2023 e 2024.

Le tecnologie e progetti descritti a partire dal Capitolo 6 del presente Report, sono stati presentati alla Piattaforma dai partecipanti al GdL 2 (Tecnologie e Buone Pratiche). Il GdL2 non ha avuto modo di effettuarne una valutazione tecnico-scientifica: non si può quindi ritenere che la PIF attraverso questo rapporto abbia avallato o selezionato alcune tecnologie a discapito di altre eventualmente non ancora intercettate, citate o descritte nel presente documento. Ne consegue, quindi, che le tecnologie/progetti/attività riassunti nel seguito non possono essere considerati come "certificati" dalla PIF.

Il riferimento a nomi commerciali e/o di prodotti commerciali non rappresenta o implica l'approvazione o il sostegno della PIF o dei suoi membri, ma è presentato esclusivamente a scopo informativo.

Partecipanti al Gruppo di Lavoro N.2 - Tecnologie e Buone Pratiche (GdL2), alla data di dicembre 2025

Alessandro Spagni, Coordinatore GdL2, ENEA
Gianluca Adorni, Punta allo Zero S.r.l.
Michela Allevi, assoambiente
Gianni Andreottola, Università di Trento
Francesco Avolio, HERA SpA
Elisabetta Barberis, Università di Torino
Federica Barone, Acqua&Sole srl
Daniele Basso, HBI Group
Francesco Beneventi, Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica
Marco Blazina, MM spa
Alice Boarino, Università degli studi di Torino
Elza Bontempi, Università degli Studi di Brescia
Stefano Bottardi, Pizzoli SpA
Andrea Brunori, ENEA
Simone Busi, ENEA
Sonia Calce, Università di Brescia
Roberto Canziani, Politecnico di Milano
Sergio Cappucci, ENEA
Chiara Cardenia, ENEA
Luisella Celi, Università di Torino
Davide Collini, b-plast
Giulio Conte, Iridra
Vincenza Cozzolino, Università di Napoli Federico II
Alice Dall'Ara, Ada srls
Roberta De Carolis, ENEA
Silvia Di Fabio, ENEA
Luciana Di Gregorio, ENEA
Vincenza Di Malta, Associazione Italiana Compostaggio
Luigi Di Rienzo, ITALMATCH CHEMICALS
Giovanni Esposito, Università di Napoli Federico II
Anna Laura Eusebi, Università Politecnica delle Marche
Davide Faccio, FCP Cerea
Laura Fiameni, Isinnova Srl
Martino Finotelli, BlueTech
Alessia Foglia, Università Politecnica delle Marche
Cristian Fracassi, Isinnova Srl
Dario Frascari, Università di Bologna
Giacomo Gardini, Evergreen Italia Srl
Andrea Giordano, Acqua&Sole srl

Jacopo Govi, Germina
Lorena Guglielmi, IRETI S.p.A.
Martina Iorio, ENEA
Mario Lapetina, Acea Ambiente
Michela Lucian, Carborem srl
Massimo Manobianco, GREEN CARBON / INGELIA
Stefano Marconi, Alan srl
Carola Martina, Novamont Spa
Mattia Massa, Università degli Studi di Brescia
Lucia Mastacchini, Lucia Mastacchini
Elena Mauro, Utilitalia
Gabriele Mazzoletti, HBI
Marco Melandri, Università di Bologna
Fabio Merzari, Carborem SRL
Laura Mira Bonomi, EFAR
Marco Morone, Italmatch Chemicals S.p.a.
Silvia Motta, Regione Lombardia
Pietro Nicolai, Cia Agricoltori Italiani
Maria Cristina Pasi, Italmatch chemicals SpA
Carlo Pastore, IRSA CNR
Renato Pavanetto, Hbi group srl
Massimo Pedò, FCP Cerea
Davide Perduca, Perduca Ambiente srl
Piero Perduca, Northtec srl
Elisabetta Perrotta, Assoambiente
Raffaele Pica, ENEA
Sergio Piccinini, CRPA - Centro Ricerche Produzioni Animali
Alfieri Pollice, IRSA CNR
Raffaella Pomi, Università di Roma La Sapienza
Raffaele Ravagli, YARA ITALIA SPA
Tina Riis, AquaGreen
Giuseppe Rosace, Università di Bergamo
Francesca Saggionetto, IRETI - Gruppo Iren
Giulia Sagnotti, Acea Elabari
Andrea Salimbeni, RE-CORD
Veronica Santoro, ESPP
Luigi Sciubba, ENEA
Silvia Socciarelli, CREA
Manuela Spagnol, Azienda Agricola Allevi srl
Fulvia Tambone, Università degli Studi di Milano DISAA
Fabio Torlai, Italmatch Chemicals spa
Alessandra Trinchera, CREA
Andrea Turolla, Politecnico di Milano

Giovanni Vargiu, Gruppo CAP

Luigi Vennitti, Puccioni 1888

Andrea Visca, ENEA

Pierfrancesco Visconti, EFAR European Federation for Agricultural Recycling

Christian Wieth, AquaGreen

Alberto Zolezzi, Associazione italiana compostaggio AIC ETS

1. Introduzione

La gestione e l'uso sostenibile del fosforo è diventato nell'ultimo decennio un argomento di discussione a livello internazionale. L'Unione Europea importa oltre il 90% del fosforo minerale utilizzato per sostenere la produzione agricola ed industriale. Il fosforo in Europa è principalmente utilizzato per la produzione di fertilizzanti (circa 65%), di additivi alimentari e per altri prodotti chimici quali ad esempio la produzione di detersivi (Figura 1; P-REX, 2017).

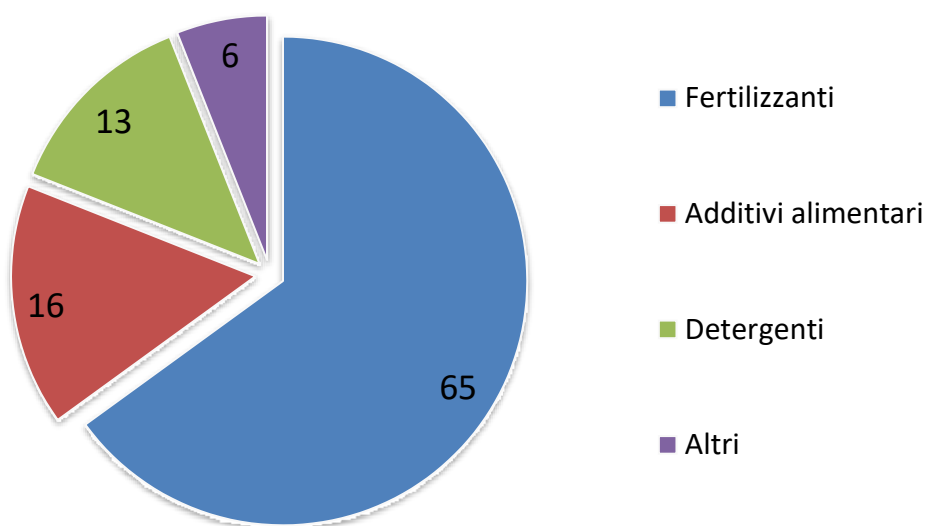


Figura 1. Domanda di fosforo per settore in rapporto alla domanda totale di fosforo minerale dell'Unione Europea pari a circa 1550 ktP/anno (P-REX, 2017).

Come risposta alla necessità di approvvigionamento del fosforo, la Commissione Europea ha inserito nel 2014 la fosforite nella lista delle materie prime essenziali (Critical Raw Materials, Commissione Europea, 2014).

Nella comunicazione della Commissione Europea, "Affrontare le sfide relative ai mercati dei prodotti di base e alle materie prime" (Commissione Europea, 2011), veniva adottato formalmente un elenco di 14 materie prime essenziali (ossia materie prime con un alto rischio di approvvigionamento e un'elevata importanza economica). La Commissione si impegnava, inoltre, a prevedere una eventuale revisione dell'elenco. La prima revisione dell'elenco ha portato, come citato appena sopra, all'inserimento della fosforite nella lista delle materie prime essenziali (Commissione Europea, 2014). Il terzo aggiornamento ha visto l'inserimento del fosforo nella stessa lista (Commissione

Europea, 2017). Le valutazioni del 2020 hanno sostanzialmente confermato il fosforo e la fosforite nell'elenco delle materie prime critiche (Commissione Europea, 2020).

Approssimativamente il 15 % dell'input di fosforo a livello europeo è disperso nei rifiuti solidi, nei fanghi di depurazione e nelle loro ceneri. A questa quantità va aggiunta la frazione di fosforo (anche del 50%) contenuta nei fertilizzanti che non viene assimilata dalle piante e accumula nel terreno, o viene rilasciato nei corpi idrici superficiali contribuendo ai fenomeni di eutrofizzazione (P-REX, 2017; Ott e Rechberger, 2012; Van Dijk et al., 2016).

I liquami zootecnici rappresentano una frazione importante del flusso di fosforo; questi sono sostanzialmente distribuiti sul terreno, ad esclusione di casi isolati di allevamenti particolarmente intensivi e di località dove non c'è disponibilità sufficiente di terreno per lo spandimento (Van Dijk et al., 2016).

La frazione più consistente dei fanghi di depurazione viene distribuita sui terreni contribuendo al ricircolo di una parte del fosforo (P-REX, 2017; Van Dijk et al., 2016). Riguardo l'utilizzo dei fanghi di depurazione in agricoltura, occorre sottolineare che la normativa europea è in evoluzione, per cui tale pratica potrebbe subire delle significative modifiche nel prossimo futuro (Commissione Europea, 2022).

Contraddittorio il caso dell'incenerimento dei fanghi: nonostante le ceneri rappresentino una matrice promettente per l'applicazione di tecnologie per il recupero di fosforo, queste sono solitamente smaltite in discarica o inertizzate in cementi contribuendo alla perdita della risorsa (P-REX, 2017; Nattorp et al., 2019).

Nell'ultimo decennio si è assistito all'applicazione di tecnologie per il recupero di fosforo da rifiuti e reflui. Nonostante diverse tecnologie siano state applicate in piena scala, il recupero di fosforo non ha ancora trovato larga applicazione (Canziani e Di Cosmo, 2018; Egle et al., 2015; P-REX, 2017).

1.1. Introduzione alle fonti alternative di fosforo

I flussi maggiormente significativi per le potenzialità di recupero fosforo sono i liquami zootecnici, i fanghi di depurazione, i rifiuti dei macelli e i rifiuti organici (PIF, 2019a; 2019b).

Le diverse matrici della linea rifiuti liquidi e solidi presentano un differente contenuto di fosforo che li rende di diverso interesse per un eventuale recupero dell'elemento (Figura 2).

La frazione organica del rifiuto solido urbano (FORSU) in Europa contiene una quantità significativa di fosforo (produzione di circa 187 kt P/a). Tuttavia, la matrice presenta una ampia eterogeneità e la produzione è molto distribuita sul territorio. Inoltre, nonostante l'importante quantità, la concentrazione media di fosforo nella FORSU è di solito minore del 0.5% sul peso secco. Per questa ragione, ad oggi, il recupero di fosforo dalla FORSU è stato poco esplorato (Nattorp et al., 2019; Tab. 1).

I liquami zootecnici sono per lo più applicati direttamente al terreno, contribuendo al riciclo del fosforo. Allo stesso modo, una parte consistente dei fanghi di depurazione prodotti in Europa sono distribuiti sul terreno (circa 40%). Negli ultimi anni, i flussi dei fanghi di depurazione stanno subendo importanti variazioni a seguito delle continue evoluzioni delle politiche dei Paesi Membri inerenti la loro gestione. Inoltre, la reale disponibilità di fosforo per l'assimilazione da parte delle piante a seguito dello spandimento di fanghi e liquami zootecnici sulla superficie del suolo rimane una questione in discussione. Il fosforo accumulato nello strato superficiale del suolo, infatti, può essere trasportato nei corpi idrici superficiali a seguito di eventi meteorologici, contribuendo ai fenomeni di eutrofizzazione delle acque interne (Carpenter et al., 1998).

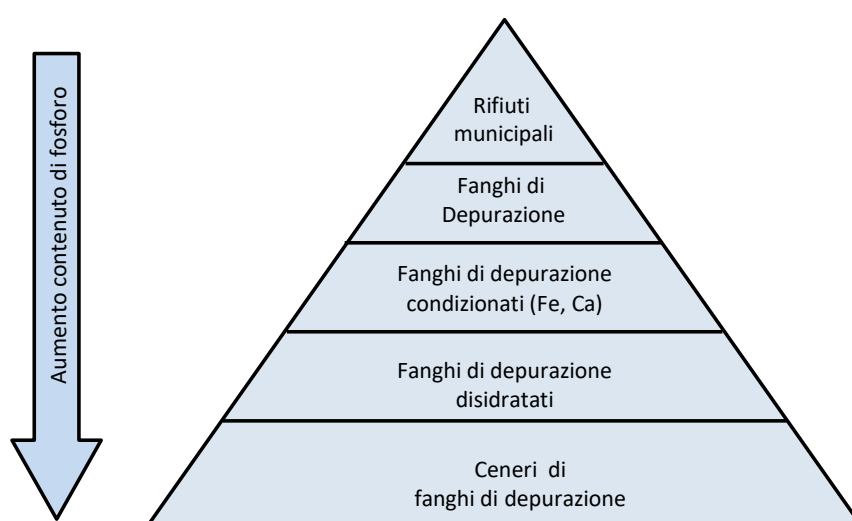


Figura 2. Confronto del contenuto di fosforo in rifiuti ed acque di rifiuto (Laga 2015).

Nonostante per lungo tempo le farine di carne ed ossa fossero state utilizzate per la produzione di alimenti per animali, questo impiego è stato proibito (Regolamento CE n. 1774/2002; CE, 2002) a seguito dei casi di BSE (Nattorp et al., 2019). Questo prodotto di scarto, quindi, potrebbe costituire un'interessante matrice per il recupero del fosforo nel breve futuro (Tab. 1).

Analizzando i flussi provenienti dalle specifiche attività produttive o di servizio, l'aliquota maggiore, pari a circa il 35% delle perdite totali di fosforo in UE, è rappresentata dai fanghi di depurazione (PIF, 2019a; 2019b; Van Dijk et al, 2016).

Tabella 1. Principali caratteristiche dei tre maggiori flussi di fosforo potenzialmente recuperabili in Europa (Modificata da Nattorp et al., 2019).

	Effluenti zootecnici Letame/Liquami	Fanghi di depurazione	Farina di carne ed ossa
Quantità (ktP/a)	1810	374	312
Riciclati (%)	97	39	6
Principale via di riciclo	Spandimento sul suolo	Spandimento sul suolo	
Materiale secco (%)	5-30	~25 (10-50)	90-95
P (% nel secco)	0.5 (bovini); 1-2 (pollame); 0.3-2.7 (suini)	2-4	12-15
Contaminanti organici	Farmaceutici	Composti chimici emergenti	BSE (Encefalopatia Spongiforme Bovina)

1.2. Acque reflue e Fanghi di depurazione

Il contributo pro capite di fosforo in Europa in termini di carico di massa specifico nelle acque reflue varia tra 0.65 e 4.80 g/abitante al giorno, con una media di circa 2.18 g/abitante al giorno. Le acque reflue municipali possono contenere, quindi, da 5 a 15 mg/L di fosforo totale, dove l'Italia si colloca in prossimità del limite inferiore del range (PIF, 2019a; 2019b).

Il fosforo nelle acque reflue si divide in una frazione particolata ed in una solubile. La rimozione convenzionale del fosforo dalle acque reflue, ai fini della conformità ai limiti autorizzativi degli effluenti degli impianti di depurazione, si basa: 1) su principi fisici, per

la parte legata alla frazione particolata e separabile fisicamente; 2) su processi biologici e/o chimici per la frazione solubile, seguiti, comunque, da unità di separazione fisica. Nella seconda opzione, infatti, il fosforo viene rimosso perché metabolizzato dai microorganismi o attraverso la formazione di precipitati chimici insolubili in acqua.

Il fosforo rimosso dalla linea acque degli impianti di depurazione è inviato alla linea di trattamento dei fanghi. Il fosforo presente nei reflui, quindi, è accumulato principalmente nei fanghi di depurazione inviati alla destinazione ultima di conferimento o a processi di incenerimento.

Mentre il fosforo rimosso chimicamente è poco solubile in acqua, risultando piuttosto stabile lungo tutta la filiera di trattamento, il fosforo rimosso fisicamente (separazione solido/liquido per sedimentazione o filtrazione) o biologicamente nella linea acque può essere parzialmente rilasciato in forma solubile, come ortofosfato, a seguito di processi fermentativi. I processi fermentativi nella linea fanghi, supportando l'idrolisi del fosforo organico a forma solubile, possono generare flussi con concentrazioni da 100 a 350mg/L di $P-PO_4^{3-}$ (con picchi fino a 700 mgP- PO_4^{3-} /L), che li rendono particolarmente idonei a processi di recupero (PIF, 2019a; 2019b).

Le ceneri provenienti dal fango incenerito possono contenere rilevanti quantità di fosforo (circa 5% in peso), da renderli comparabili con le rocce fosfatiche (sebbene quelle con minori contenuti di P) (PIF, 2019a; 2019b).

Nella Unione Europea sono prodotti ogni anno circa 10 Mt di sostanza secca di fanghi di depurazione contenenti 3,3 Mt di azoto e 0,3 Mt di fosforo. Il 42% dei fanghi di depurazione viene inviato, come destinazione ultima di conferimento, allo spandimento nei terreni agricoli dopo essere stato stabilizzato.

In Europa, il potenziale recupero di P dai fanghi provenienti dalle acque reflue è solo parzialmente sfruttato tramite processi di riciclo (115 kton di P per anno delle 297 kton stimate come prodotte dai fanghi) lasciando aperti ampi margini di incremento (circa 182 kton all'anno) a sostituzione dell'utilizzo della risorsa fossile (coprendo teoricamente circa il 30% dell'attuale richiesta europea) (PIF, 2019a; 2019b).

Una recente indagine di UTILITALIA riporta una variabilità tra le diverse regioni riguardo la produzione specifica dei fanghi urbani. Il quantitativo di fanghi prodotto, infatti, oscilla da 10'000 ton/milione di abitanti in Sicilia a 120'000 ton/milione di abitanti in Trentino Alto Adige. Il valore medio di produzione specifica di fango è in Italia pari a 50'658 t/milione di abitanti, con una concentrazione di secco tra il 20% ed il 25% (UTILITALIA, 2019).

Considerando, in modo del tutto preliminare e semplificato, un contenuto in secco medio nei fanghi italiani del 22.5 %SS e un contenuto di P pari a 1.7 come P%TS, si può grossolanamente stimare un carico di massa di fosforo nei fanghi di circa 193 ton P/milione di abitanti. Pertanto, ai fini di una valutazione del tutto sommaria del potenziale recuperabile, applicando un range di recupero percentuale tra il 10% e il 40% del fosforo totale (percentuali di recupero su processi applicati ai fanghi liquidi; P-rex,

2015), si ottiene un dato cautelativo annuo di carico di fosforo valorizzabile a livello nazionale tra 19 e 77 ton P/milione di abitante, pari a 1-4 ktonP/anno per l'intero Paese (PIF, 2019a).

1.3. Rifiuti e sottoprodotti organici

Il recupero del fosforo dai reflui zootecnici, dalla frazione organica del rifiuto solido urbano (FORSU) e da quelli prodotti dalla filiera alimentare mostra un potenziale significativo. In particolare, i processi e le tecnologie per il recupero di fosforo dai reflui agroalimentari hanno raggiunto la piena scala (anche in Italia). I processi applicati, invece, su altre matrici, come ad esempio urine e letami, sono ad oggi sviluppati in scala dimostrativa e/o pilota e non hanno raggiunto, dal punto di vista tecnologico, TRL (Appendice A) elevati (PIF, 2019a; 2019b).

Le maggiori concentrazioni di ortofosfato sono presenti nei rifiuti provenienti dalle industrie lattiero-casearie e da altre industrie alimentari come ad esempio quelle del lievito e della melassa. Anche le frazioni liquide del letame contengono considerevoli concentrazioni di P.

Anche i rifiuti delle industrie della lavorazione delle patate sono particolarmente inclini al recupero del fosfato poiché le acque reflue ne contengono elevate quantità. Durante la preparazione del prodotto surgelato alle patate, con lo scopo di prevenire imbrunimenti ossidativi si applica il pirofosfato acido di sodio ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$). Il trattamento applicato provoca la lisciviazione del fosfato (PIF, 2019a; 2019b).

Flussi con significative concentrazioni di P possono essere trovati anche in altri settori agro-industriali quali gli zuccherifici e birrifici (PIF, 2019a; 2019b).

Flussi con significative concentrazioni di P possono essere trovati anche in altri settori agro-industriali quali gli zuccherifici e birrifici (PIF, 2019a; 2019b).

Per quanto riguarda i rifiuti, i maggiori quantitativi di P sono principalmente contenuti nella FORSU e nei residui legnosi. La frazione organica biodegradabile rappresenta circa il 35% di tutti i rifiuti solidi urbani (RSU), sebbene vari ampiamente tra i paesi dell'UE (EEA, 2020). Il recupero di P dalla frazione biodegradabile è possibile attraverso processi di compostaggio o di digestione anaerobica. Le ceneri di solo rifiuti solido urbano (RSU), invece, generalmente contengono quantità relativamente basse di P, con valori di circa 0,5 %P in peso (Kalmykova e Karlfeldt Fedje, 2013).

I letami provenienti dall'attività zootecnica hanno un contenuto di P mediamente dell'1.8% su sostanza secca (Tab. 1), i reflui provenienti dall'industria alimentare hanno concentrazioni di P da 20 a 450 mg/L e la mostra un contenuto pari a 1.7-4.2 g P/kg di rifiuto.

1.4. Batterie agli ioni di litio

Le batterie rappresentano una frazione modesta dell'utilizzo del fosforo a livello nazionale ed internazionale: ciononostante, questo è un settore in larga espansione e di estrema attualità. Esistono numerose tipologie di batterie a ioni di litio, che differiscono fondamentalmente per il tipo di catodo utilizzato. Tra queste, di largo impiego sono le batterie a catodo di litio-ferro fosfato, LiFePO_4 (LFP), utilizzate in passato prevalentemente nel settore dell'accumulo stazionario. Negli ultimi anni l'interesse verso questa tipologia di batterie sta crescendo notevolmente e diverse case automobilistiche stanno investendo in tal senso. Secondo alcune previsioni, nel 2023 le chimiche predominanti saranno quelle di tipo LFP ed NMC (nicel magnesio cobalto), con quote di mercato molto simili (Breiter et al., 2022).

Il contenuto di fosforo nel materiale catodico di una batteria a ioni di litio del tipo LiFePO_4 è pari al 16-20 % in peso (base secca) (Li et al., 2017; Yang et al., 2017). Il materiale catodico (LiFePO_4) è pari, a sua volta, al 14.50 % in peso della batteria (La Manca et al., 2015). Tenuto conto di tali dati, rispetto all'intera batteria, si può assumere un quantitativo di fosforo pari al 2.6%. Le batterie LiFePO_4 rappresentano circa il 15% delle batterie Li-ione (dati 2017; Htfmarketreport, 2018). Tenuto conto di ciò, si possono estrapolare i quantitativi di batterie LiFePO_4 presenti in Italia per l'anno 2018, pari a 694 tonnellate (import – export). Il quantitativo di fosforo potenzialmente recuperabile a seguito del loro smaltimento risulta dunque essere pari a 18 tonnellate (come P elementare).

Ad oggi sono state sviluppate una serie di tecnologie per recuperare materiali di valore da batterie a ioni di litio esauste, con alcuni esempi anche a scala industriale. Tuttavia, tali processi sono applicabili prevalentemente a batterie contenenti nickel e cobalto, mentre non esistono ancora tecnologie idonee al trattamento di batterie del tipo LFP (Li et al., 2017).

In letteratura sono presenti una serie di lavori incentrati sul trattamento di batterie LFP applicabili a scala laboratorio (Forte et al., 2021). Le tecnologie di trattamento sono fondamentalmente due: rigenerazione diretta del materiale catodico e recupero dei metalli mediante tecniche pirometallurgiche e idrometallurgiche (Wang et al., 2017). La prima tipologia include trattamenti finalizzati alla rigenerazione di LiFePO_4 , quali sinterizzazione in fase solida, riduzione carbotermica e rigenerazione elettrochimica. Alla seconda categoria appartengono processi piro- ed idrometallurgici finalizzati al recupero di litio, ferro, alluminio ecc. per applicazioni di tipo diverso. Tali processi sono in genere finalizzati al recupero di litio (sotto forma di carbonato o fosfato) e ferro (sotto forma di fosfato, ossido, idrossido) (Li et al., 2017; Yang et al., 2017). Il recupero del fosforo è raramente investigato, solitamente con risultati di modesta entità (Li et al., 2017).

1.5. Confronto delle diverse tecnologie per il recupero del fosforo

Una sintesi delle tecnologie disponibili sul mercato è stata realizzata nel 2019 (Tab. 2; PIF 2019a). E' possibile individuare per ogni soluzione tecnologica, il principio di funzionamento, il flusso su cui è applicata, la scala raggiunta (TRL) e i prodotti recuperati. Occorre sottolineare che le rese di recupero non sempre sono comparabili tra di loro, in quanto talvolta calcolate rispetto a contenuti di fosforo relativi a flussi differenti.

Tra le fonti non convenzionali per il recupero del fosforo sono comprese le acque reflue e i fanghi di depurazione, i rifiuti e/o sottoprodotti organici e altre matrici industriali, anche inorganiche, che riguardano principalmente il settore siderurgico, farmaceutico e dei RAEE. I flussi di massa per i quali è tecnicamente sostenibile il recupero sono rilevanti. Tuttavia, in genere, essi sono valorizzati solo in modo parziale. Nel caso di matrici industriali inorganiche le applicazioni sono sporadiche, e indagate in scala di laboratorio o pilota, e non sono pertanto fattibili considerazioni solide sull'attuale sostenibilità tecnica ed economica.

La maggior parte delle tecniche/tecnologie recuperano fosforo sotto forma di sali, principalmente struvite, e sono applicate ai flussi liquidi provenienti dal settore della depurazione delle acque reflue. Tuttavia, le tecniche di recupero mediante precipitazione possono applicarsi, in linea di principio, a tutti i reflui e/o matrici di scarto ricchi di fosforo.

Le tecnologie applicate sui flussi liquidi (principalmente surnatanti) e/o sui fanghi in fase liquida sono quelli che presentano il grado di sviluppo più elevato: tali processi sono applicati in scale significative con TRL compresi tra 7 e 9.

Le applicazioni su fanghi finali disidratati e/o su ceneri prevedono un'ampia complessità impiantistica e le fasi di ri-solubilizzazione del fosforo sono in fase di ottimizzazione in termini di utilizzo di reagenti e di controllo dei processi; le scale di applicazione sono principalmente pilota, con qualche caso in piena scala. Per essere utilizzato in agricoltura, il prodotto ottenuto deve superare i limiti imposti della legislazione vigente. Il contenuto in fosforo nei processi tecnologici applicati ai surnatanti o nelle frazioni liquide di fango è un parametro importante ai fini del raggiungimento di prestazioni più elevate di recupero e varia generalmente tra 50 e 150 mgP/L con minimi contenuti di 25 mgP/L.

Diverse sono le matrici inviate al trattamento per il recupero di fosforo e pertanto diversi sono i prodotti secondari recuperabili; il sale più comunemente recuperato dai processi che si applicano ai flussi liquidi è la struvite, mentre sali di calcio, (es. calcio fosfato) e diversi tipi di acido (es. acido fosforico) vengono recuperati principalmente dai trattamenti delle ceneri.

Le efficienze di recupero del fosforo sono di difficile comparazione in quanto fanno riferimento a flussi differenti (si noti la variabilità cromatica della tabella 2):

approssimativamente, il recupero di P sui flussi liquidi (surnatanti e fanghi liquidi) varia tra il 10% e il 40% se consideriamo le rese relative al P influente all'impianto di depurazione; oscillano invece tra il 70 e il 90% se consideriamo le rese relative al P influente al processo di recupero stesso e si attestano attorno a 10% se consideriamo la resa in relazione al P contenuto nei fanghi liquidi; le prestazioni dei trattamenti applicati alle ceneri sono invece tendenzialmente superiori al 70% fino a un massimo del 100%, espresse come $P \text{ recuperato} / P \text{ contenuto nelle ceneri in ingresso al processo}$ (PIF, 2019a).

I prodotti finali recuperati hanno un contenuto di fosforo nel range 8-15 P% (massa/massa); per la maggior parte dei prodotti, è risultato avere buona biodisponibilità per l'assimilazione delle piante: le prestazioni dei vari fertilizzanti secondari non sono di diretta comparazione, in quanto essi dipendono fortemente dalle modalità di applicazione, dalle caratteristiche dei suoli e dalle peculiarità delle colture.

Tabella 2. Sommario delle tecnologie disponibili per il recupero del fosforo (elaborazione UNIVPM; PIF, 2019a)

TECH	PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	SCALA/TRL	MATRICE	P-INFLUENTE	PRODOTTO RECUPERATO	RECUPERO di P	APPLICAZIONI
-	tipo di processo	-	tipologia	mgP/L	tipologia	%	
OSTARA PEARL	cristallizzazione	piena scala	surnatante anaerobico	100-900	struvite	10-30	USA, Inghilterra, Canada, Spagna, Olanda
NuReSys	cristallizzazione	piena scala	surnatante anaerobico	60-175	struvite	80-90	Germania, Belgio
DHV crystallactor	cristallizzazione	piena scala	surnatante anaerobico	>25	CaP, fosfato di magnesio, struvite	10-40	Cina, Germania
Multiform Harvest	cristallizzazione	piena scala	surnatante anaerobico		struvite	80	USA
Phosphogreen	precipitazione/cristallizzazione	piena scala	surnatante anaerobico	70	struvite	fino a 90	Danimarca, Francia
Struvia	cristallizzazione	piena scala	surnatante anaerobico	>50	struvite, CaP	11	Danimarca
ANPHOS	cristallizzazione	piena scala	surnatante anaerobico	>50	struvite	80-90	Olanda
AIRPREX	precipitazione/cristallizzazione	piena scala	surnatante anaerobico	150-250	struvite	10-25	Germania, Olanda, Cina
PHOSPAQ	cristallizzazione	piena scala	surnatante anaerobico	50-65	struvite	70-95	Olanda, Inghilterra
PHOSNIX	cristallizzazione	piena scala	surnatante anaerobico	100-150	struvite	80-90	Giappone
REM-NUT	scambio ionico+precipitazione	scala pilota	effluente secondario		struvite, CaP	45-60	Italia
PRISA	precipitazione/cristallizzazione	scala pilota	surnatante anaerobico		struvite	10-25	Germania
P-Roc	cristallizzazione	scala pilota	surnatante anaerobico		struvite; CaP	10-30	Germania
AIRPREX	precipitazione/cristallizzazione	9	fango anaerobico		struvite	7	
PHOSPAQ	cristallizzazione	9	fango anaerobico		struvite	70-95	
SEABORNE		7	fango anaerobico		struvite	>90	
GIFHORN	lisciviazione chimica umida+precipitazione	piena scala	fango anaerobico		struvite	49	Germania
STUTTGART	lisciviazione chimica umida+precipitazione	piena scala	fango anaerobico		struvite	45	Germania
RAVITA	post-precipitazione, dissoluzione	scala pilota	fango/ceneri		ammonio fosfato	95	Finlandia
ASHDEC	termo-chimico	7	ceneri		calcined ash with CaNaPO phase	98	
ASH2PHOS	processo chimico umido (lisciviazione acida)+precipitazione	scala pilota	ceneri		calcio fosfato, dicalcio fosfato, ammonio fosfato, diammonio fosfato	90	Svezia
ECOPHOS	processo chimico umido (lisciviazione acida)	piena scala	ceneri		dicalcio fosfato, acido fosforico	95	Bulgaria, Francia
LEACHPHOS	processo chimico umido (lisciviazione acida)+precipitazione	scala pilota	ceneri		CaP o Wet Struvite	70-80	Svizzera
SEPHOS	processo chimico umido (lisciviazione acida)+precipitazione	scala laboratori	ceneri		CaPO ₄ , AlP, CaP	90	Germania
PASCH	processo chimico umido (lisciviazione acida)	scala pilota	ceneri		CaPO ₄ , AlP, CaP	70-80	Svizzera
RecoPhos	processo chimico umido (lisciviazione acida)	scala pilota	ceneri		H3PO ₄ , P ₄	100	Germania, Belgio, Austria
ThermPhos	processo termoelettrico	piena scala	ceneri	0.09 ton P/ton ash	P ₄	95	Olanda
TetraPhos	estrazione chimica acida	scala pilota	ceneri		H3PO ₄	n.d.	Germania
Mephrec	gasificazione	scala pilota	fango anaerobico		10-25%P rich slag	80	Germania

LEGENDA:

ROSSO %recupero di P rispetto al fosforo in ingresso all'impianto di depurazione

BLU %recupero di P rispetto al fosforo in ingresso al processo di recupero

VERDE %recupero di P rispetto al fosforo contenuto nel fango e/o ceneri in ingresso al trattamento per il recupero

2. Fosforo e produzione scientifica (aggiornamento a gennaio 2026)

La produzione scientifica inerente il recupero e la gestione del fosforo ha visto una crescita circa esponenziale negli ultimi venticinque anni a ragione dell'interesse nazionale ed internazionale della materia. Le figure 3 e 4 presentano i valori aggiornati al 2025 (consultazione banca dati Scopus eseguita il 16 gennaio 2026).

In circa venti anni la produzione scientifica del recupero (recovery) del fosforo è aumentata di oltre dieci volte. L'interesse scientifico sul recupero del fosforo è mostrato anche dalla presenza di termini legati ai rifiuti (waste) e alle acque reflue (wastewater). Occorre sottolineare che la percentuale della produzione scientifica sul recupero del fosforo da rifiuti sembra dominare l'interesse nel settore. Infatti, la percentuale dei lavori che includono i rifiuti passa da meno del 10 a circa il 50% nel periodo analizzato (Fig. 3).

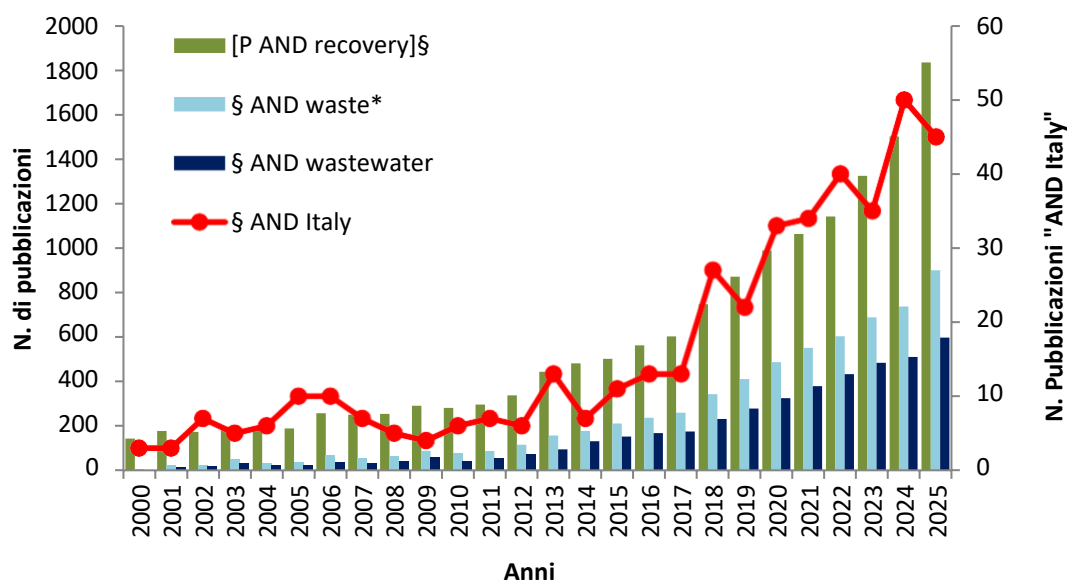


Figura 3. Andamento della produzione scientifica riguardante il recupero del fosforo (da Scopus, www.scopus.com). Si noti che nella legenda è da intendersi P come <<phosphorus OR phosphorous>> e i confronti sono sempre rispetto alla prima serie di dati (cioè P AND recovery AND waste*; P AND recovery AND wastewater; P AND recovery AND Italy). L'asterisco (*) indica qualsiasi lettere. Tutti i termini cercati in "Article title, Abstract, Keywords", tranne "Italy" in "Affiliation country". Consultazione Scopus eseguita il 16 gennaio 2026.

Lo stesso interesse è mostrato anche dalle ricerche inerenti la gestione (management) del fosforo (Fig. 4). Quest'ultima mostra una produzione scientifica circa doppia rispetto il recupero del fosforo, a ragione dell'ancora molto attuale interesse internazionale. È da notare che il recupero del fosforo è certamente incluso nella sua gestione.

In generale, dal 2019, anno del lancio della PIF, ad oggi (gennaio 2026), la produzione scientifica è circa raddoppiata a dimostrazione del continuo e crescente interesse nel settore.

Questo interesse scientifico lascia ben presagire per il futuro dell'applicazioni di tecnologie per il recupero e strategie per la gestione del fosforo che sono ancora in evoluzione. Ciononostante, occorre ricordare che ad oggi, nonostante si osservino significative esperienze nel recupero e nella gestione del fosforo, la maggior parte della risorsa secondaria (potenzialmente di recupero, si veda Introduzione) viene persa e le applicazioni in piena scala, sebbene di notevole interesse, sono ancora piuttosto limitate, specialmente in Italia.

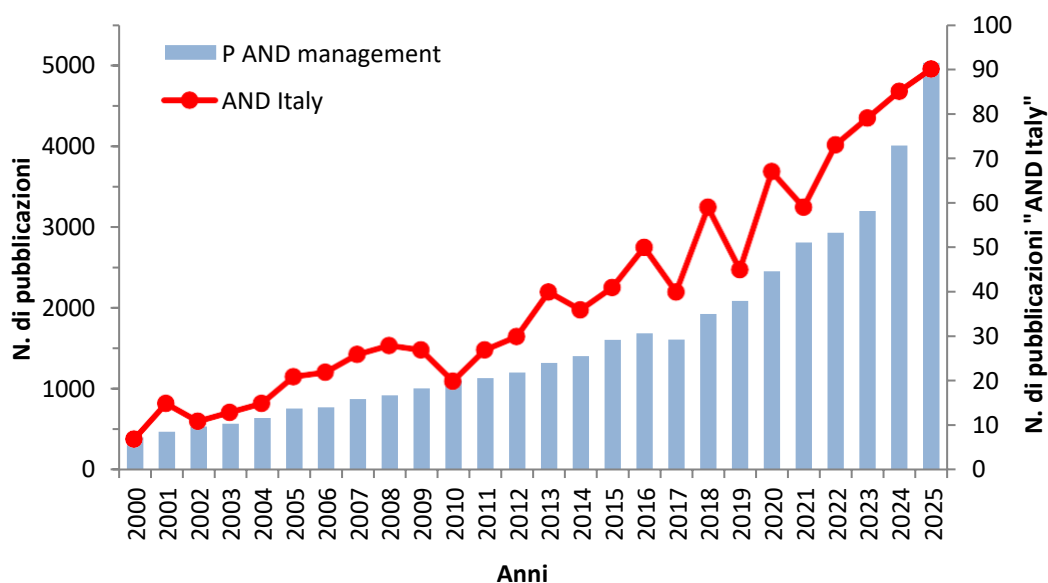


Figura 4. Andamento della produzione scientifica riguardante la gestione del fosforo (da Scopus, www.scopus.com). Si noti che nella legenda è da intendersi P come <<phosphorus OR phosphorous>> e i confronti sono sempre rispetto alla prima serie di dati (cioè P AND management AND Italy). Tutti i termini cercati in “Article title, Abstract, Keywords”, tranne “Italy” in “Affiliation country”. Consultazione Scopus eseguita il 16 gennaio 2026.

3. Evoluzione dell'applicazione delle tecnologie per il recupero del fosforo a livello internazionale

Le tecnologie applicate nel recupero del fosforo sono state inventariate e descritte con un certo dettaglio nel Report del 2019 (PIF, 2019) e pertanto, il lettore può fare riferimento a tale documento per avere maggiori dettagli. Di seguito è descritta l'evoluzione dell'applicazione delle tecnologie a livello internazionale avvenuta negli ultimi anni.

La grande maggioranza delle tecnologie ad oggi in uso per il recupero del fosforo vedono la loro applicazione al flusso dei rifiuti, ed in particolare delle acque reflue (Kabbe, 2019). Nonostante diverse tecnologie siano oggi applicate in piena scala, il recupero di fosforo non ha ancora trovato larga applicazione (Canziani e Di Cosmo, 2018; Egle et al., 2015; P-REX, 2017). Ciononostante, il numero di applicazioni a livello internazionale è in continuo aumento.

L'indagine condotta all'interno del progetto P-REX (2017, https://www.phosphorusplatform.eu/images/download/Kabbe_Tech_implementation-Table_20170208.pdf) aveva prodotto un inventario di 28 tecnologie per un totale di 98 impianti (di diverse dimensioni) per il recupero del fosforo dai reflui, distribuiti in modo piuttosto eterogeneo nel pianeta. Delle 98 esperienze 45 erano in Europa, delle quali circa la metà in Germania ed Olanda.

L'indagine non aveva individuato l'unica esperienza presente in Italia a Budrio (BO) presso Pizzoli spa. La realizzazione dell'impianto in piena scala presso Pizzoli ha avuto inizio nel 2010. Il recupero del fosforo è effettuato tramite applicazione del Sistema ANPHOS® (sviluppato da Colsen s.r.l.), basato sulla defosfatazione per precipitazione del fosforo e della frazione ammoniacale dell'azoto con applicazione di magnesio idrossido allo scopo di ottenere struvite. Il sistema di recupero del fosforo è disposto in coda ad un UASB (Upflow ANaerobic Sludge Blanket) per la produzione di biogas attraverso il trattamento dei reflui agro-industriali aziendali. Il sistema, tratta un flusso di circa 490 m³/giorno con concentrazioni di fosforo in ingresso ed uscita pari rispettivamente a circa 134 e 20 mg/L P_{totale}, raggiungendo una capacità di produzione di struvite di circa 400kg/giorno.

Anche l'indagine di Cosmo e Canziani (2018), con il pregio di aver individuato l'unico esempio presente in Italia, confermava la eterogenea distribuzione degli impianti di recupero del fosforo in Europa, con una maggiore distribuzione nei paesi europei centro-settentrionali (in primis Germania ed Olanda).

Tra le 28 tecnologie identificate nel 2017 dal progetto P-REX (2017), la larga maggioranza operava sui fanghi di depurazione. Inoltre, la struvite è il di gran lunga il principale prodotto recuperato. Le tecnologie che vedevano un maggior numero di applicazioni

erano AirPrex, NuReSys e Pearl con 8, 9 e 14 applicazioni, tutte con produzione di struvite come materiale recuperato.

L'inventario delle applicazioni del recupero del fosforo è stato aggiornato nel 2023 (Kabbe, 2023; https://phosphorusplatform.eu/images/download/Kabbe_P-recovery_tech_implementation%20Table_2021_07.pdf). Questo riporta un elenco di 35 tecnologie per 124 applicazioni (Tab. 3).

Le tecnologie maggiormente utilizzate rimangono le stesse dell'inventario precedente, come lo sono sia la matrice di partenza (fanghi di depurazione) e il materiale prodotto (struvite).

Occorre sottolineare che le tecnologie riportate nell'inventario (Kabbe, 2023) applicate alle ceneri sono di gran lunga le meno numerose. Ciononostante, come riportato nello stesso documento, sono le uniche per le quali sono riportati valori di produzione di materiale recuperato superiore alle 10 000 Ton/anno per impianto. Occorre ricordare che, come per i dati della tabella 2, i valori di efficienza di produzione del materiale recuperato sono difficilmente confrontabili tra le differenti tecnologie, sia per la diversa matrice di origine sia per il prodotto finale (diverso materiale, purezza, ecc.).

Tabella 3 Riassunto delle principali tecnologie ed applicazioni per il recupero di fosforo dalle acque reflue (Fonte: Kabbe, 2023; https://www.phosphorusplatform.eu/images/download/Kabbe_P-recovery_tech_implementation%20Table_2023-01-04.pdf).

Tecnologia	N° Installazioni	Materiale recuperato	Produzione (Ton/a)	totale	Ton/a/impianto	Principale localizzazione
AD-HAP	6	HAP		83	14	Giappone
AirPrex®/MagPrex	19	Struvite	1050 (dati da 5 impianti)		210	Germania/USA
ANPHOS®	10	Struvite	2070 (dati da 6 impianti)		345	Olanda
NuReSys	11	Struvite	4430 (dati da 7 impianti)		633	Belgio
Pearl	20	struvite		33640	1682	USA
PHOSNIX	8	Struvite	125 (dati da 1 impianto)		125	Giappone
PHOSPAQ	11	Struvite		6950	632	Olanda/Cina
PhosphoGREEN	5	Struvite		649	130	Danimarca

Al momento, l'impianto di gestione reflui di Budrio (BO) è in fase di ammodernamento. Alla sede di Budrio (BO) è stato realizzato un secondo impianto, non ancora in funzione, con una tecnologia a ciclo continuo con sistema UPHOS fornito da COLSEN b.v.

Nonostante le tecnologie per il recupero del fosforo da ceneri siano piuttosto numerose (si veda Tab. 2), e in linea di principio queste permettano una maggiore resa di estrazione di fosforo (considerando le acque reflue come matrice di partenza; Tab. 2), la larghissima maggioranza degli impianti installati a livello internazionale utilizza fanghi

come materiale iniziale. Tale limitata applicazione delle tecnologie applicabili alle ceneri è probabilmente da imputare alla altrettanto scarsa applicazione dei processi di mono-incenerimento dei fanghi di depurazione. In Italia, al momento, in funzione, ci sono solo due impianti di mono-incenerimento fanghi, almeno per le conoscenze del GdL. In entrambi, si sta valutando l'opportunità di recuperare il fosforo, anche in funzione dell'evoluzione della normativa delle acque reflue di riferimento (si veda capitolo 4). Un nuovo grosso impianto è in progettazione/realizzazione in Lombardia.

3.1. Panoramica delle tecnologie di recupero esistenti del fosforo dalle acque reflue urbane e dai fanghi

La European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP) pubblica da diversi anni un inventario degli impianti di recupero del fosforo conosciuti. La prima versione è del 2017 come risultato del progetto P-REX. L'ultima versione è del 2023. Questa riporta per le tecnologie, la localizzazione l'operatore, anno di inizio funzionamento, il materiale recuperato e la quantità prodotta (quando questi dati sono disponibili).

Nel seguito sono descritte alcuni degli impianti in piena presenza in Europa come descritte nella documentazione più recente.

Come verrà meglio descritto nel seguito del presente documento, la Direttiva Europea sulle acque reflue urbane (Direttiva EU 2024/3019) ha posto limiti più stringenti agli scarichi degli impianti di depurazione urbani.

Nonostante il fosforo presente nelle acque reflue possa essere rimosso utilizzando numerosi metodi, questo avviene principalmente attraverso i seguenti metodi:

- Trattamenti primari quali la sedimentazione primaria;
- Accumulo nella biomassa dei processi biologici inclusi per la rimozione della sostanza organica;
- Processi specifici di rimozione biologica del fosforo (Enhanced biological phosphorous removal, EBPR);
- Precipitazione chimica.

In Italia, almeno a conoscenza della presente Piattaforma, al momento non sono presenti impianti specificatamente progettati per la rimozione biologica del fosforo (EBPR); questo significa che il fosforo accumula nei fanghi di depurazione in quanto presente nella biomassa rimossa o a seguito di precipitazione chimica. A tale quantità si aggiunge la frazione (tipicamente sospesa organica) rimossa tramite sedimentatore primario, quando tale processo è presente nella linea di trattamento.

La precipitazione chimica è il metodo più comune di rimozione del fosforo dalle acque reflue. La precipitazione avviene tramite addizione di sali di ferro (oppure di alluminio o calce viva) ed il composto viene rimosso attraverso il processo di sedimentazione secondaria ed allontanamento dei fanghi di supero.

Ai metodi appena introdotti, può essere aggiunta la filtrazione che, nonostante oggi non sia di larga applicazione, si presenta come una tecnologia emergente che sta prendendo sempre più diffusione sia a livello nazionale che internazionale.

Il fango prodotto negli impianti di depurazione generalmente subisce dei successivi trattamenti, generalmente di stabilizzazione. I processi più comuni di stabilizzazione del fango includono:

- Stabilizzazione biologica aerobica e/o anaerobica;
- Stabilizzazione chimica tramite addizione di calce;
- Disidratazione meccanica, anche tramite aggiunta di flocculanti, in modo da ridurre i volumi ed aumentare frazione secca la 20-45%
- Essiccamento per incrementare ulteriormente la frazione secca.

Il metodo di rimozione del fosforo dalle acque reflue e della successiva stabilizzazione del fango influiscono sulle tecniche di recupero dell'elemento dai fanghi.

Valorizzazione del fosforo presente nei fanghi di depurazione

Il metodo più semplice e di largo utilizzo per i costi ridotti di valorizzazione del fosforo presente nei fanghi, è costituito dalla loro applicazione sui suoli agricoli. L'applicazione diretta in agricoltura dei fanghi di depurazione è infatti una pratica comune in Italia e nell'Unione Europea.

Anche il fango compostato può essere utilizzato in agricoltura. Nel compostaggio il fango viene stabilizzato tramite processi aerobici.

Il mono-incenerimento dei fanghi produce una matrice con elevate concentrazioni di fosforo. Le elevate concentrazioni di P rendono il mono-incenerimento di particolare interesse per il recupero dell'elemento. Tale processo, che è ancora poco diffuso in Italia, potrebbe subire importanti cambiamenti nel prossimo futuro a seguito dell'interessamento di diverse municipalizzate (si veda precedenti Documenti della PIF). Al contrario, il co-incenerimento con altre matrici, procedimento attualmente di maggiore applicazione, riducono considerevolmente le possibilità di recupero del fosforo.

Il fosforo può essere recuperato in differenti punti nella linea acque e fanghi di un impianto di depurazione (Fig. 5). Nonostante i numerosi punti in cui il fosforo possa essere recuperato nella linea acque e fanghi di un impianto di depurazione (si veda precedenti documenti prodotti dalla PIF), la maggior parte delle tecnologie oggi disponibili agiscono sulla linea fanghi (fanghi umidi o ceneri).

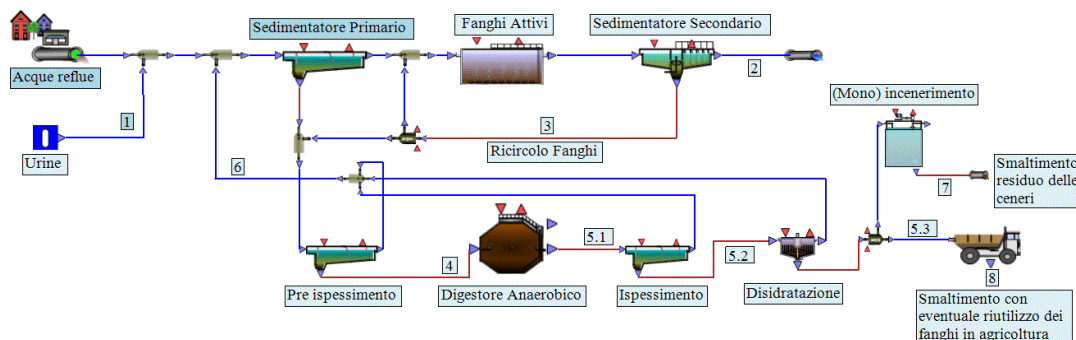


Figura 5 Schema di flusso semplificato di un impianto di trattamento reflui dove sono riportati (coi numeri) i punti potenziali per il recupero del fosforo.

3.2. Panoramica delle tecnologie in piena scala per il recupero del fosforo localizzate in Europa – aggiornamento gennaio 2026

Di seguito viene presentata una panoramica dei più recenti dati a disposizione delle applicazioni di tecnologie per il recupero del fosforo dai fanghi prodotti negli impianti di trattamento acque reflue.

Le informazioni e i dati presentati nel seguito provengono da recenti lavori prodotti da Kabbe (2023. https://www.phosphorusplatform.eu/images/download/Kabbe_P-recovery_tech_implementation%20Table_2023-01-04.pdf) o altri documenti presenti nel sito della ESPP (<https://www.phosphorusplatform.eu/>). Dei dati disponibili, di seguito sono presentati solo quelli riferiti ad **impianti in piena scala o a esperienze con TRL significativi** (Piena scala; in costruzione o fase di autorizzazione; TRL 8-9) **localizzate in Europa**.

Tecnologie di recupero di fosforo dal fosfato disciolto nei surnatanti dei digestati dei fanghi di depurazione come monoammio fosfato

Il monoammio fosfato (MAP) può essere precipitato nel fango digerito, nel surnatante del digestore o in entrambi.

Il MAP viene precipitato nel fango digerito tramite digestione anaerobica a seguito di incremento del pH ed aggiunta di sali di magnesio. Il precipitato si trova direttamente inserito nel fango. Questo processo ha trovato larga applicazione per la rimozione della struvite dalla linea di trattamento per ridurre l'occlusione delle tubazioni. Il fango così prodotto può essere applicato sui suoli agricoli.

L'efficienza del recupero di fosforo in relazione all'ingresso del processo è di circa il 50%, mentre è del 10-15% in relazione all'influente dell'impianto di depurazione.

La tecnologia NuReSys (<https://nuresys.com/>) è applicata al fango digerito anaerobicamente e al surnatante. Il fango contenente fosforo può essere applicato sui suoli agricoli. L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è maggiore del 90%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è del 15-25%. Si è a conoscenza di otto impianti in piena scala per un recupero di fosforo pari a 1730 Ton di struvite per anno.

Numerosi sono invece i processi che recuperano il fosforo dal surnatante dei digestori.

Il processo PHOSPAQ™ (<https://www.paquesglobal.com/products/phospaq>) avviene in un reattore aerato. L'aerazione garantisce la miscelazione delle particelle di struvite, fornendo contemporaneamente ossigeno per la conversione biologica della sostanza organica. Lo stripping dell'anidride carbonica aumenta il pH e favorisce la precipitazione della struvite. L'ossido di magnesio viene aggiunto per rimuovere il fosfato, che viene recuperato per precipitazione come fosfato di magnesio-ammonio (struvite). Il reattore PHOSPAQ™ è dotato di separatori che trattengono la struvite e scaricano l'effluente purificato. La struvite viene raccolta dal fondo del reattore e, a seconda delle esigenze, può essere ulteriormente trattata, purificata e disidratata. L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è maggiore del 90%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è del 15-25%. Si è a conoscenza di sei impianti in piena scala per un recupero di fosforo pari a 3560 Ton di struvite per anno.

Nel processo WASSTRIP (Waste Activated Sludge Stripping to Recover Internal Phosphate) sono rilasciate quantità significative di P, N, Mg, K dai fanghi attivi prodotti in un processo di rimozione biologica avanzata del fosforo (EBPR) prima della digestione anaerobica (<https://www.ostara.com/nutrient-recovery/nutrient-recovery-solutions/>; https://ostara.com/wp-content/uploads/2018/08/Ostara_WASSTRIP_Handout_170411.pdf). L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui può raggiungere il 40-50%.

Ostara realizza un reattore a letto fluido per recupero del fosforo come fertilizzante. I nutrienti N e P cristallizzano nel reattore in un ambiente a pH controllato con l'aggiunta di precipitanti. I granuli di MAP vengono raccolti e distribuiti come Crystal Green Pearl (<https://www.ostara.com/>; <https://www.ostara.com/nutrient-recovery/crystal-green-pearl/>). L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è maggiore del 90%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è del 15-25%. Si è a conoscenza di sei impianti in piena scala per un recupero di fosforo pari a 11500 Ton di struvite per anno. La tecnologia ha avuto anche significativa applicazione in nord America.

I flussi ricchi di fosforo sono introdotti nel reattore PhosphoGREEN (<https://www.suez.com/en/denmark/wastewater/phosphorus-recovery-via-struvite-precipitation>) dove sono aerati ed alcalinizzati tramite NaOH per ottimizzare le condizioni di reazione. Il cloruro di magnesio viene utilizzato per ottenere la precipitazione-cristallizzazione del MAP. Il MAP viene quindi estratto dal fondo del reattore, lavato ed essiccato. L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è maggiore del 90%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è del 15-25%. Si è a conoscenza di cinque impianti in piena scala per un recupero di fosforo pari a 650 Ton di struvite per anno.

I flussi provenienti dagli impianti di trattamento delle acque reflue con elevate concentrazioni di P sono alimentati a un reattore a vasca completamente miscelata, in cui è applicata una miscelazione rapida (Turbomix, Struvia™). La precipitazione della struvite viene avviata aumentando il pH e mediante l'aggiunta di un sale di magnesio (https://www.veoliawatertechnologies.com/sites/g/files/dvc2476/files/document/2019/02/3351%2C150354_Mkt_Mun_Brochure_STRUVIA_EN_.pdf). L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è maggiore del 90%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è del 15-25%. Si è a conoscenza di un impianto in piena scala per un recupero di fosforo pari a 40 Ton di struvite per anno.

Il fango di depurazione può essere sottoposto a un processo di acidificazione biologica prima della digestione. A un valore di pH compreso tra 4 e 5.5, il P viene rilasciato nel surnatante dal fango ispessito del digestore dopo la digestione e la disidratazione. Il fosforo disciolto viene quindi precipitato sotto forma di struvite o fosfato di calcio (PhosForce; <https://koch-next-cms.azurewebsites.net/phosforce>). L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è maggiore del 90%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è del 40-50%. Si è a conoscenza di un impianto in piena scala per un recupero di fosforo pari a circa 1000 Ton di struvite o fosfato di calcio per anno.

Tecnologie di recupero di fosforo dai fanghi di depurazione

Alcune tecnologie vedono i fanghi come matrice di origine del processo. Mentre per alcuni impianti in piena scala si conoscono i quantitativi di fango trattato, di nessuno si conosce quanto fosforo è recuperato.

Il processo EuPhoRe (<https://www.euphore.de/>) utilizza un trattamento termo-chimico in un inceneritore a forno rotante. In funzione della qualità del materiale in ingresso (fango disidratato, biomassa), possono essere aggiunti cloruri alcalini e/o alcalino-terrosi per favorire la rimozione di una parte dei metalli pesanti (ad esempio Cd, Hg, Cr(VI), Cu). L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è del 95%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è dei circa 80-85%. Secondo le informazioni del sito <https://www.euphore.de/>, sono al momento in uso due

impianti in piena scala della capacità di trattamento di 15000 to 30000 Ton di fango disidratato per anno, e altri sei (30000 to 135000 Ton/anno) sono in progettazione.

Il processo PYREG produce biochar tramite pirolisi a temperature comprese tra 500 e 800 °C (<https://pyreg.com/>). Il biochar prodotto da fanghi di depurazione è registrato come fertilizzante in Svezia (PYREGphos). L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è maggiore del 95%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è dei circa 85-90%. Sono stati realizzati diversi impianti in piena scala con la capacità di trattare 7300 Ton di fango secco per anno.

Nel processo CarboREM (<https://carborem.greenthesisgroup.com/>) è applicata la carbonizzazione idrotermica al fango. Dopo separazione solido-liquido l'idrochar è acidificato e il fosforo precipitato nella fase liquida. L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è del 90%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è di circa 80%. Secondo il Sito della piattaforma europea del fosforo (https://phosphorusplatform.eu/images/download/ESPP-NNP-DPP_P-recovery_tech_catalogue_v_3_9_21.pdf) nell'impianto di Mezzocorona in provincia di Trento, CarboREM si è occupata di trattare e convertire i fanghi delle cantine vitivinicole e dei caseifici del Trentino. L'impianto è stato reso operativo fra il 2019 e il 2020, rimanendo attivo dal 2020 al 2023. L'impianto in scala industriale ha un input di 5000 Ton di fango umido per anno. Secondo il sito <https://carborem.greenthesisgroup.com/case-history/> sono presenti altri due impianti che applicano la tecnologia in Italia, a Liscate (MI) ed a Teglio (SO) entrambi al momento operativi. Non si conoscono le quantità e il destino dell'eventuale fosforo recuperato.

Tecnologie di recupero di fosforo da ceneri di mono-incenerimento fanghi

Il mono-incenerimento dei fanghi di depurazione è ancora una pratica poco diffusa in Italia. Ciononostante, le ceneri presentano un contenuto elevato di fosforo che lo rendono una matrice di interesse per il recupero (si veda report precedenti).

Mediante lisciviazione chimica umida acida, nel processo Ash2Phos/Easymining (<https://www.easymining.com/technologies/ash2phos2/ash2phos/>) il fosforo viene lisciviato dalle ceneri dei fanghi con HCl e H_3PO_4 e quindi separato. I contaminanti che passano in soluzione insieme al P vengono successivamente rimossi attraverso specifici processi. L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è maggiore del 90%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è circa l'80%. Per un impianto a Helsingborg in Svezia ed uno a Schkopau in Germania sono state concesse le autorizzazioni. L'impianto a Schkopau dovrebbe entrare in funzione nel 2027 con un input previsto di 30 mila Ton di ceneri per anno ed una produzione di 15 mila Ton di CaP per anno. L'impianto a Helsingborg dovrebbe entrare in funzione nel 2028 con stessi valori di carico e produzione.

La lisciviazione chimica umida acida è applicata anche nel processo SusPhos (<https://www.susphos.com/>) dove il P viene lisciviato dalle ceneri con H_2SO_4 . I prodotti recuperati sono acido fosforico, acido solforico e sali di ferro e alluminio, oltre a materiale cementizio. L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è dell'80%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è di circa il 70%. SusPhos collabora con l'impianto Sluiverwerking Noord-Brabant, in Olanda, il più grosso inceneritore di fanghi in Europa. L'installazione è iniziata nel 2025 e dovrebbe entrare in funzione nel 2027 con un carico di 50 mila Ton di ceneri per anno.

Nella lisciviazione chimica umida acida mediante TetraPhos/Remondis (<https://www.remondis-sustainability.com/sustainability-from-a-to-z/phosphorus-recovery/>), il P viene lisciviato dalle ceneri con HCl e H_3PO_4 e quindi separato. I contaminanti che passano in soluzione insieme al P vengono rimossi tramite scambio ionico, separazione liquido-liquido o precipitazione. L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è dell'80-95%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è di circa il 75%. L'impianto Amburgo è entrato in funzione nel 2021 trattando 20 mila Ton di cenere per anno con una produzione di 7000 Ton di acido fosforico per anno. Altri impianti in piena scala sono in fase di progettazione a Kiel e Lünen in Germania con una produzione prevista di acido fosforico di 5800 Ton per anno. Un ulteriore impianto è in fase di progettazione a Moerdijk (Olanda).

Alcuni processi prevedono di integrare le ceneri nei processi esistenti di produzione dei fertilizzanti.

ICL-Fertilizers miscela le ceneri dei fanghi con roccia fosfatica e tramite aggiunta di acido solforico o acido fosforico realizza un prodotto commercializzato con il nome Puraloop, dove tutti i composti delle ceneri sono incorporati nel fertilizzante (<https://icl-growingsolutions.com/agriculture/products/puraloop-38/>; <https://www.icl-group.com/blog/from-waste-to-growth-puraloop-fertilizer/>). L'efficienza di recupero del fosforo in relazione all'ingresso al processo è del 100%, mentre in relazione all'ingresso all'impianto trattamento reflui è di circa l'87%. In Olanda sono trattate circa 10 mila Ton di ceneri all'anno.

Borealis LAT miscela le ceneri con roccia fosfatica e liscivia P, Ca e altri elementi con acido nitrico in una soluzione liquida di acido fosforico-nitrico. L'acido lisciviato viene utilizzato per produrre un fertilizzante NPK multicomponente e un fertilizzante di azoto e calcio. A causa di limitazioni tecniche, le ceneri possono sostituire solo il 3-5% dell'apporto di roccia fosfatica come materia prima (<https://www.borealisgroup.com/>). In Austria è attivo un impianto che tratta circa 3-4 mila Ton di ceneri per anno.

4. Nuova Direttiva Europea acque reflue urbane

Il Consiglio europeo ha recentemente adottato nuove norme per il trattamento delle acque reflue urbane e di scarichi di reflui biodegradabili di particolari settori industriali. La Direttiva sul trattamento delle acque reflue urbane è stata introdotta nel 1991 (Direttiva 91/271/CEE del Consiglio, del 21 maggio 1991, concernente il trattamento delle acque reflue urbane). Il suo scopo era di proteggere l'ambiente dagli effetti provocati dagli scarichi di acque reflue urbane.

La modifica della Direttiva è stata stimolata dalla DG Ambiente e dalla risultante valutazione (EC, 2019) della direttiva 91/271/CEE. Tale valutazione ha evidenziato la necessità di revisione per meglio implementare le politiche di protezione dell'ambiente. In particolare, è stato sottolineato come servisse prestare attenzione agli scarichi provenienti da piccoli agglomerati, affrontare inquinanti emergenti e valutare le implicazioni energetiche legate ai processi di trattamento.

In data 6 novembre 2024 il Consiglio europeo ha dato il via libera definitivo alla revisione della Direttiva. La revisione estende l'ambito di applicazione ad agglomerati più piccoli, copre un maggior numero di inquinanti, compresi i microinquinanti, e spinge verso la neutralità energetica. Con l'ambizione di un trattamento più efficiente delle acque reflue urbane, le nuove norme sono uno degli obiettivi chiave del piano d'azione dell'UE "inquinamento zero". La Direttiva entrerà in vigore il 20-simo giorno dopo la pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea; gli stati membri avranno, quindi 31 mesi per adeguare la legislazione nazionale.

La revisione, in generale, si propone di:

- ridurre l'inquinamento, i consumi energetici e le emissioni di gas serra;
- migliorare la qualità dell'acqua affrontando la questione dell'inquinamento residuo delle acque reflue urbane;
- migliorare l'accesso ai servizi, soprattutto per i più vulnerabili ed emarginati;
- far pagare all'industria il trattamento dei microinquinanti;
- obbligare i paesi dell'UE a monitorare gli organismi patogeni nelle acque reflue;
- portare a un settore più circolare.

La direttiva riveduta impone agli Stati membri di raccogliere e trattare le acque reflue provenienti da tutti gli agglomerati con almeno 1 000 abitanti equivalenti (a.e., precedentemente la soglia era di 2 000 a.e.) secondo le norme minime. Per tali agglomerati, entro il 2035 gli Stati membri dovranno rimuovere la materia organica biodegradabile dalle acque reflue urbane (trattamento secondario) prima dello scarico nell'ambiente.

Inoltre, entro il 2039 sarà obbligatoria la rimozione dell'azoto e del fosforo (trattamento terziario) per gli impianti di trattamento delle acque reflue urbane con carico uguale o maggiore di 150 000 a.e. Per questi stessi impianti, gli Stati membri dovranno applicare un ulteriore trattamento (quaternario) per rimuovere i microinquinanti entro il 2045. I produttori di prodotti farmaceutici e cosmetici (in quanto individuati come la fonte principale dei microinquinanti presenti nelle acque reflue urbane) dovranno contribuire almeno all'80% dei costi aggiuntivi del trattamento quaternario mediante un regime di responsabilità estesa del produttore conformemente al principio "chi inquina paga".

Le nuove norme introducono un obiettivo di neutralità energetica con l'intento di ridurre le emissioni di gas a effetto serra. Entro il 2045 gli impianti di trattamento delle acque reflue urbane che trattano un carico uguale o maggiore di 10 000 a.e. dovranno utilizzare energia da fonti rinnovabili generata dai rispettivi impianti.

4.1. Implicazioni della evoluzione della Direttiva Europea acque reflue sulla gestione del fosforo

La valutazione (EC, 2019) condotta dalla Commissione Europea sulla Direttiva 91/271/CEE ha prodotto alcune considerazioni che sono rilevanti per la gestione del fosforo. Infatti, tale valutazione ha evidenziato che gli impianti di trattamento delle acque reflue urbane rimangono un'importante sorgente di azoto e fosforo nell'ambiente, cause principali dei fenomeni di eutrofizzazione dei corpi idrici e dei mari. Il progresso tecnologico ha dimostrato che i valori limite di emissione stabiliti dalla direttiva 91/271/CEE per azoto e fosforo possono essere resi più stringenti, soprattutto per gli impianti di trattamento più grandi. I trattamenti terziari dovrebbero essere, quindi, imposti a tutti gli impianti con capacità di almeno 150 000 a.e. I trattamenti terziari dovrebbero essere resi obbligatori anche per agglomerati di almeno 10 000 a.e. che scaricano in aree soggette o a rischio eutrofizzazione. Le aree sensibili dovranno essere identificate in funzione della limitazione da azoto e/o fosforo (area sensibili per l'azoto, per il fosforo o entrambi). Entro il 31 dicembre 2027, gli Stati membri dovranno identificare le aree sul loro territorio che sono sensibili all'eutrofizzazione, includendo informazioni sul fatto che le aree siano sensibili al fosforo o all'azoto o a entrambi. L'elenco dovrà essere aggiornato ogni sei anni a partire dal 31 dicembre 2033.

La valutazione conclude che la gestione dei fanghi può essere migliorata allineandola ai principi dell'economia circolare ed alla gerarchia dei rifiuti come definiti nell'Articolo 4 della Direttiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio (prevenzione; preparazione per il riutilizzo; riciclaggio; recupero di altro tipo, per esempio il recupero di energia; smaltimento). Per garantire il recupero corretto e sicuro dei nutrienti dai fanghi (tra cui la sostanza critica fosforo), dovrebbe essere stabilito a livello di Unione un tasso minimo di riutilizzo e riciclaggio. Gli Stati membri dovrebbero indicare se

riutilizzare o riciclare le acque reflue urbane e/o i fanghi al fine di recuperare il fosforo, tenendo in considerazione le tecnologie e le risorse disponibili nonché la fattibilità economica. Il tasso minimo di riutilizzo e riciclaggio dovrebbe tenere conto del contenuto di fosforo dei fanghi. Dovrebbe inoltre considerare la situazione di ciascun mercato nazionale, ad esempio la disponibilità di altre fonti di fosforo da fonti organiche, quali l'allevamento di bestiame, e le possibilità del suo assorbimento in agricoltura. Il recupero corretto e sicuro dei nutrienti e il loro riutilizzo in agricoltura devono essere incoraggiati al fine di sostenere la resilienza e la sostenibilità del settore agricolo e contribuire all'autonomia strategica dell'industria dei fertilizzanti dell'Unione. In tale contesto, gli Stati membri dovrebbero adottare misure per incoraggiare la produzione e l'acquisto di nutrienti recuperati dalle acque reflue urbane e dai fanghi.

I valori per la rimozione dei nutrienti riportati nella Direttiva approvata il 6 novembre 2024 sono riportati in tabella 4.

Tabella 4 Requisiti per il trattamento terziario degli scarichi provenienti dagli impianti di trattamento delle acque reflue urbane di cui all'articolo 7(1) [cioè $\geq 150\,000$ a.e.] o dagli impianti di trattamento delle acque reflue urbane che servono gli agglomerati di cui all'articolo 7(3) [cioè $\geq 10\,000$ a.e. che scaricano in aree sensibili]. Per gli scarichi provenienti dagli impianti di trattamento delle acque reflue urbane di cui all'articolo 7(1), si applicano entrambi i parametri. Per gli agglomerati di cui all'articolo 7(3), possono essere applicati uno o entrambi i parametri a seconda della situazione locale. Si applicano i valori per la concentrazione o per la percentuale di riduzione. [Nota: la tabella Direttiva riporta alcune note di maggiore specificità per l'applicazione dei valori sotto riportati: per maggiori dettagli si faccia riferimento alla Direttiva]

Parametro	Concentrazione	Percentuale minima di riduzione
Fosforo totale	0,7 mg/l ($\geq 10\,000$ a.e.; $< 150\,000$ a.e.) 0,5 mg/l ($\geq 150\,000$ a.e.)	87,5 ($\geq 10\,000$ a.e.; $< 150\,000$ a.e.) 90 ($\geq 150\,000$ a.e.)
Azoto totale	10 mg/l ($\geq 10\,000$ a.e. $< 150\,000$ a.e.) 8 mg/l ($\geq 150\,000$ a.e.)	80

L'obbligo della rimozione del fosforo dalle acque reflue urbane offre un'importante opportunità per il recupero dell'elemento critico, in quanto i fanghi di depurazione costituiscono una delle principali fonti potenziali di fosforo secondario sia per gli specifici flussi, sia per le concentrazioni.

Occorre ribadire che la Direttiva, nonostante evidenzi la necessità del recupero del fosforo secondo quanto sopra riassunto molto brevemente (si faccia riferimento alla Direttiva per un'analisi completa), ha come imperativo la protezione dell'ambiente e della salute, per cui sottolinea la necessità di un monitoraggio appropriato per diversi

inquinanti (anche le microplastiche) quando si attuano procedure di recupero, riuso e/o riciclaggio.

5. Bilancio semplificato del fosforo a livello nazionale ed opportunità di recupero dalle acque reflue

Negli anni sono stati eseguiti diversi studi sui flussi di fosforo utilizzando diverse boundaries (confini, limiti di contorno) che trovano diffusione in lavori di letteratura (Chowdhury et al., 2014; Egle et al., 2014; Ott e Rechberger, 2012; Van Dijk et al., 2016). Dall'analisi dei flussi di fosforo per l'Italia (Van Dijk et al., 2016), emerge che a ragione di importazioni pari 273 kTon/a di fosforo (unità di misura in migliaia di tonnellate/anno di P elementare) si misurano 96 kTon/a di perdite e 68 kTon/a di esportazione (anno di riferimento per la valutazione, 2005; Fig. 5). Tra le perdite, la parte di gran lunga maggiore è costituita dai rifiuti organici solidi e liquidi (79 kTon/a), dei quali circa il 50 % (40 kTon/a) sono costituiti dai fanghi di depurazione. I reflui civili costituiscono quindi la parte più rilevante delle perdite di fosforo; per tale ragione, la maggior parte delle tecnologie hanno visto la loro applicazione su tali matrici (Canziani e Di Cosmo, 2018; Egle et al., 2016; Kabbe. 2019; PIF, 2019a; PIF, 2019b).

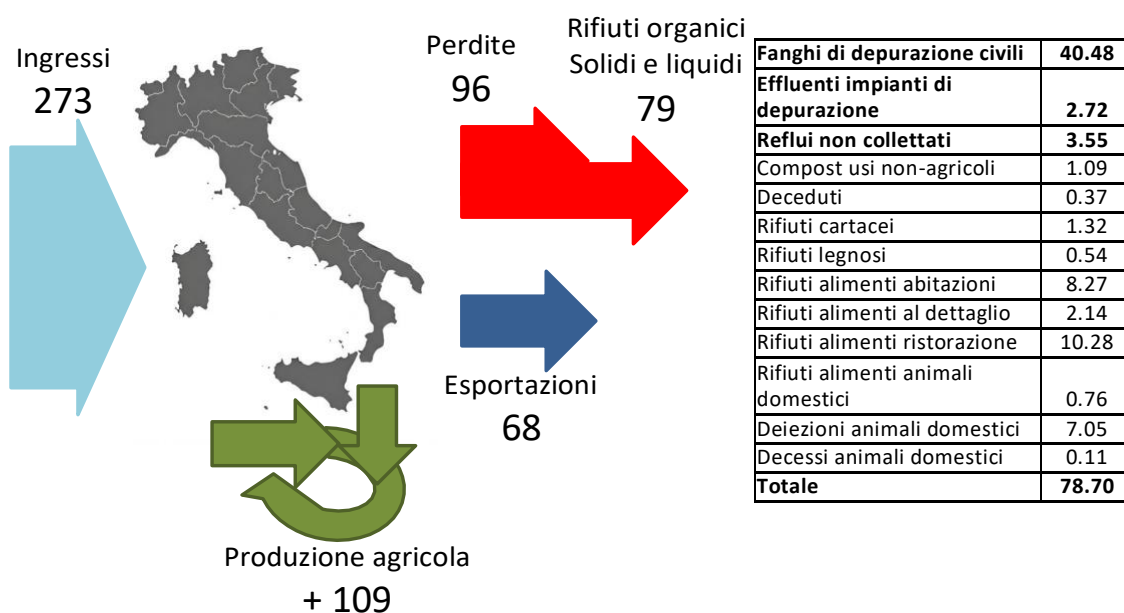


Figura 6 Bilancio semplificato dei flussi del fosforo in Italia. Valori in kTon/a di P. Dati da Van Dijk et al., 2016. Anno di riferimento per la valutazione, 2005. La tabella riporta le principali perdite misurate nei rifiuti organici solidi e liquidi. Il valore per la produzione agricola riporta l'accumulo.

In Italia sono presenti un totale di quasi 18 mila impianti di depurazione (Dati ISTAT, 2015; <http://dati.istat.it>, Impianti di depurazione delle acque reflue urbane). Di questi solo circa 2 300 hanno implementato un trattamento terziario (ovvero per la rimozione dei nutrienti). Nonostante la ridotta numerosità, dei 75 milioni abitanti equivalenti (a.e.) serviti in Italia, un trattamento terziario è previsto per oltre 50 milioni a.e. (dati ISTAT), che suggerisce (assieme al ridotto numero di impianti con trattamento terziario) che la rimozione dei nutrienti sia principalmente implementato negli impianti di maggiori dimensioni (come prevedibile, data la maggiore richiesta tecnologica).

Se consideriamo il carico specifico di fosforo di 1.1-2.5 g P/(persona*giorno) (Masotti, 2011), ovvero 402-913 g P/(persona*a) come carico annuo, si ottiene 30-68 kTonP/a (valore riferito a 75 milioni a.e.) di fosforo che confluisce negli impianti di trattamento acque di scarico, valore che approssima le valutazioni di Van Dijk et al. (2016, Fig. 5).

Se assumiamo che tutti gli impianti che implementano un trattamento terziario includano la rimozione del fosforo (e così non è) e che la rimozione sia pressoché totale, allora si può stimare una rimozione dai processi di depurazione reflui pari a circa 2/3 del flusso negli impianti (20-45 kTon/a).

Stime simili possono anche essere ottenute dalla produzione teorica di fango. Il fango secco di depurazione prodotto giornalmente è di 30-80 g/pers/giorno, con contenuto pari a 1.0-1.8 di P in % sul secco (Masotti, 2011). La recente rilevazione eseguita da Utilitalia sulle caratteristiche dei fanghi di depurazione restituisce dati incoraggianti, riportando contenuti variabili di fosforo, ma con valori medi prossimi a 2.0-2.4 % (P sul secco), almeno per gli impianti di maggiore capacità (Mininni et al., 2023). Come anticipato, la rimozione del fosforo non è sempre presente anche quando implementato un trattamento terziario. Occorre ricordare che la percentuale di fosforo nei fanghi potrebbe essere aumentata, con una maggiore inclusione della rimozione del P nella linea acque dei trattamenti reflui. Valori di letteratura riportano contenuti di P pari a 3-4% quando è implementata la rimozione biologica del fosforo (Henze et al., 2008).

Il flusso di P di 40-50 kTon/a contenuto dei reflui è quindi pari al a circa 15-20 % delle importazioni nazionali di P (Fig. 5). Le tecnologie disponibili per il recupero del P dai reflui presentano efficienze molto differenti (Tab. 2). Occorre ricordare, come ribadito in precedenza in questo documento, che è difficile confrontare le efficienze di recupero P delle differenti tecnologie in quanto i valori riportati fanno riferimento a differenti flussi in ingresso al processo (si presti attenzione ai differenti colori della tabella 2). E' però evidente che le rese maggiori (generalmente superiori al 90%) sono ottenute utilizzando le ceneri dei fanghi in ingresso al processo di recupero del fosforo (Tab.2). A conoscenza del GdL, occorre però ribadire che in Italia sono al momento in funzione solo due inceneritori che trattano fanghi di depurazione (mono-incenerimento) che, per quantità, sebbene importanti, sono al momento poco significative rispetto al totale dei fanghi prodotti a livello nazionale (un nuovo impianto è in progettazione/realizzazione in

Lombardia). Per tale ragione, al momento risulta maggiormente fattibile l'applicazione dei processi che utilizzano il fango umido in ingresso. Per tali tecnologie, però, le efficienze di recupero P sono più modeste (ragionevolmente 20-40%). Inoltre, in Italia i processi biologici di rimozione del fosforo sono, sfortunatamente, poco diffusi, preferendo i processi chimici.

Con le considerazioni appena tratte, è ragionevole, ipotizzare che il recupero del P dai fanghi di depurazione nell'immediato futuro (ovvero considerando lo stato attuale della depurazione delle acque a livello nazionale) possa raggiungere valori ottimistici di circa 10-20 kTon/a.

La normativa in evoluzione raccomanda nuovi paradigmi di trattamento acque (recupero energetico, trattamento terziario diffuso, recupero del P, ecc.), a cui gli impianti dovranno adeguarsi nel prossimo futuro. Una maggiore ottimizzazione dei processi di trattamento della linea acque, assieme a diffuse implementazioni di tecnologie per il recupero del fosforo potranno migliorare la gestione del fosforo, aumentandone le potenzialità di recupero.

E' importante sottolineare che il flusso di fosforo verso il terreno per supportare la produzione agricola misura valori rilevanti determinando per l'anno oggetto della valutazione (2005; Van Dijk et al., 2016) un accumulo sul suolo pari a 109 kTon/a (Fig. 5). Per tale ragione, i tentativi per recuperare il P dai reflui zootecnici, che costituiscono un importante flusso verso il terreno pari a 135 kTon/a (Van Dijk et al., 2016), sembrano promettenti laddove il diretto spandimento sul terreno potrebbe essere limitato (si veda come esempio le esperienze condotte da CRPA e descritte nel capitolo 7). Mentre però i gestori degli impianti di depurazione sono generalmente avvezzi a processi tecnologici, lo stesso non si può dire per le aziende agricole, per cui il recupero del fosforo dai reflui zootecnici sembra al momento meno applicabile, almeno in tempi brevi e su impianti di grande scala.

Per migliorare il flusso di P sul suolo, interessante sembra l'utilizzo di strategie per migliorare l'assimilazione dell'elemento delle piante, come l'utilizzo di specifici fertilizzanti o di consorzi microbici adattati (PIF, 2019a).

Una migliore gestione del fosforo dovrebbe, quindi, coinvolgere valutazioni su numerosi flussi dell'elemento a livello nazionale.

NOTA alla presente raccolta di tecnologie e progetti

*Le tecnologie e i progetti di seguito presentati (prossimi capitoli), **non** sono da intendere in sostituzione a quanto già riportato nei Report precedenti (PIF, 2019a; 2019b), ma, anzi, come integrazione di quanto già intercettato nelle indagini del 2019.*

Gli stessi, sono stati presentati alla Piattaforma dai partecipanti al GdL 2 (Tecnologie e Buone Pratiche). Per questa ragione è riportato il partecipante che l'ha introdotta al Gruppo di lavoro. Il GdL2 non ha avuto modo di effettuarne una valutazione tecnico-scientifica. Non si può, quindi, ritenere che la PIF attraverso questo Rapporto abbia avallato o selezionato alcune tecnologie a discapito di altre eventualmente non ancora intercettate, citate o descritte nel presente documento. Ne consegue, quindi, che le tecnologie/progetti/attività di seguito riassunti non possono essere considerati come "certificati" dalla PIF.

Il nome della Istituzione riportata in testa alla tecnologia e/o al progetto fa riferimento esclusivamente a quella che ha fornito la documentazione. Nei casi in cui siano presenti per la stessa tecnologia o progetto altri partner, si faccia riferimento al link inclusi.

6. Tecnologie per il recupero del fosforo sviluppate dai partecipanti alla Piattaforma

6.1. Tecnologia termochimica innovativa di recupero del fosforo

Università degli Studi di Brescia

Le ceneri di fanghi di depurazione sono trattate tramite un processo termochimico utilizzando microonde abbinate ad una apposita camera brevettata. Tale trattamento promuove la formazione di CaNaPO_4 biodisponibile, offrendo una innovativa opportunità di recupero del fosforo in accordo con gli obiettivi di sostenibilità.

La tecnologia è stata al momento applicata con TRL 4.

Riferimenti

Fiameni L., Fahimi A., Federici S., Cornelio A., Depero L.E., Bontempi E., 2022. A new breakthrough in the P recovery from sewage sludge ash by thermochemical processes. Green Chemistry, 24:6836-6839. <https://doi.org/10.1039/D2GC02328H>
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/gc/d2gc02328h>

6.2. Processo termochimico integrato per recupero di fosforo e biocarbone

RE-CORD

RE-CORD ha sviluppato e brevettato un processo integrato basato su pirolisi lenta e lisciviazione chimica per la conversione di matrici organiche residuali in biocarbone e fertilizzante inorganico. Il processo consiste nel pre-processamento del materiale biogenico tramite pirolisi lenta tra 450 e 550°C, dove viene trasformato in bioenergia e char. Successivamente, il char viene processato tramite lisciviazione chimica in temperature e con specifici reagenti. Tale trattamento permette di estrarre gli inorganici dal char, producendo due prodotti in combinazione: un biocarbone con ridotto tenore di ceneri ed un fertilizzante inorganico ricco in fosforo e altri nutrienti. L'efficienza di estrazione del fosforo ottenuta con questo processo è risultata superiore al 95% con tutti i materiali testate, inclusi fanghi di depurazione.

La tecnologia è stata applicata con TRL 5 e sono in corso valutazioni per un dimensionamento a TRL 7.

Riferimenti

Salimbeni A., Di Bianca M., Rizzo A.M., Chiaramonti D., 2023. Activated Carbon and P-rich fertilizer production from industrial sludge by application of an integrated thermochemical treatment. *Sustainability*, 15(19): 14620.
<https://doi.org/10.3390/su151914620>

7. Progetti inerenti il fosforo dei partecipanti alla Piattaforma

7.1. DEASPHOR: Recupero del P per via chimica da ceneri di pollina

Università degli Studi di Brescia

Il progetto DEASPHOR - Design Of A Product For SUBSTITUTION Of Phosphate Rocks mira al riciclo di fosforo dalle ceneri della pollina in quanto questa contiene otto volte più P di quanto necessitano le piante, limitando il loro utilizzo diretto sul terreno agricolo. Tuttavia, è necessaria un'ulteriore concentrazione di P per rendere la pollina capace di sostituire le rocce fosfatiche. Il progetto indaga soluzioni esplorative e innovative. Il progetto è finanziato all'interno dei bandi ERA-MIN (<https://www.era-learn.eu/network-information/networks/era-min-2>).

Riferimenti

<https://www.unibs.it/en/node/6476>

<https://www.fc.up.pt/deasphor/>

<https://www.era-learn.eu/network-information/networks/era-min-2/era-min-joint-call-2017/design-of-a-product-for-substitution-of-phosphate-rocks>

7.2. PHIGO: Recupero del fosforo per via termochimica da ceneri di rifiuti organici

Università degli Studi di Brescia

Il progetto Thermal Processing of P-rich ashes aiming for HIGH-GRADE PHOSPHORUS Products (PHIGO) si pone l'obiettivo di recupero del fosforo da ceneri di scarto derivanti dalla termovalorizzazione di bio-waste (soprattutto ceneri di pollina e fanghi di depurazione), allo scopo di destinarlo a possibili riuti come quello agricolo. Il progetto si propone di utilizzare una nuova metodologia di estrazione del fosforo basata su un innovativo processo termico.

Il progetto è finanziato all'interno dei bandi ERA-MIN3 (<https://www.era-min.eu/about-era-min-3>; <https://www.era-learn.eu/network-information/networks/era-min3>).

Riferimenti

<https://www.swerim.se/en/phigo>

<https://www.era-learn.eu/network-information/networks/era-min3/eu-co-funded-era-min-joint-call-2021/thermal-processing-of-p-rich-ashes-aiming-for-high-grade-phosphorus-products>

<https://www.unibs.it/it/ateneo/comunicazione/tutte-le-news/phigo-il-progetto-il-recupero-di-fosforo-da-scarti-di-ceneri-anche-unibs-nel-nuovo-progetto-di>

7.3. FLASHPHOS - The complete thermochemical recycling of sewage sludge

Italmatch

Il progetto è finanziato dalla Unione Europea Horizon 2020 e coinvolge 17 partner.

Il progetto FlashPhos si pone l'obiettivo di recuperare su larga scala fosforo bianco (P4) di alta qualità e altre materie prime utilizzando i fanghi di depurazione come materiale in ingresso. Il progetto mira a produrre P4 per l'industria chimica, fornendo allo stesso tempo una soluzione al problema dello smaltimento dei fanghi di depurazione. Si prevede che gli impianti FlashPhos saranno in grado di coprire il 50% della domanda europea di P4 entro il 2040. Ciò sarà possibile riciclando il 15% dei fanghi attualmente generati in Europa.

Riferimenti

<https://flashphos-project.eu/>

<https://cordis.europa.eu/project/id/958267>

7.4. PHOSTER – Recupero di fosforo e magnesio da flussi di rifiuti per la produzione di fertilizzanti rinnovabili di alta qualità

Politecnico di Milano

Il progetto PHOSTER - Phosphorus and magnesium recovery from waste streams for production of high-value renewable fertilizers, è co-finanziato nell'ambito del programma europeo ERA-MIN 3 (<https://www.era-min.eu/about-era-min-3>; <https://www.era-learn.eu/network-information/networks/era-min3>).

Il progetto è coordinato dal Politecnico di Milano, in partenariato con MM Spa, University of Ljubljana, Timac Agro Italia S.p.A., Magnesitas Navarras e REA Dalmine SpA. Obiettivo del progetto è sviluppare una soluzione sostenibile, replicabile e scalabile per riutilizzare minerali e metalli secondari derivanti dalle ceneri dei fanghi di depurazione e dai sottoprodotti dell'industria mineraria per sostituire le materie prime critiche primarie (fosforo, magnesio) utilizzate nella produzione di fertilizzanti, in un'ottica di economia circolare.

In particolare, il Politecnico di Milano si occupa dell'ottimizzazione del processo di estrazione chimica a umido del fosforo dalle ceneri e di quello di co-precipitazione di fosforo e magnesio dai sottoprodotti minerari.

Riferimenti

<https://phoster-project.eu/>

<https://www.linkedin.com/company/phoster-eu/>

<https://www.era-learn.eu/network-information/networks/era-min3/eu-co-funded-era-min-joint-call-2021/phosphorus-and-magnesium-recovery-from-waste-streams-for-production-of-high-value-renewable-fertilizers?SearchTerm=phoster>

7.5. Struvite – Trattamento degli effluenti e digestati zootecnici per ridurre le emissioni e produrre Struvite

CRPA (Centro Ricerche Produzioni Animali)

Il progetto è una iniziativa realizzata nell’ambito del Programma regionale di sviluppo rurale 2014-2020 dell’Emilia-Romagna — Tipo di operazione 16.1.01 — Gruppi operativi del partenariato europeo per l’innovazione: Produttività e sostenibilità dell’agricoltura — Focus Area 5D - Ridurre le emissioni di gas a effetto serra e di ammoniaca prodotte dall’agricoltura.

Il Gruppo Operativo Struvite ha l’obiettivo di sviluppare un sistema prototipale in grado di trattare gli effluenti e digestati suinicoli allo scopo di produrre un fertilizzante di recupero ad elevata concentrazione di nutrienti presenti in forma salina e stabile (struvite) ed una frazione liquida a ridotto tenore di azoto e fosforo.

Il progetto vuole promuovere la delocalizzazione del surplus di nutrienti dalle aree ad elevata presenza zootecnica verso aree caratterizzate da richiesta di concimi chimici di sintesi, in raccordo coi principi del Nutrient Recovery and Reuse e con i target del Farm to Fork (https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en).

Nel 2024 l’attività vede l’evoluzione nel progetto “Struvite - Trattamento dei digestati per ridurre le emissioni e recuperare un fertilizzante, la Struvite”, all’interno della iniziativa PR-FESR EMILIA ROMAGNA 2021-2027.

I partner includono i laboratori della Rete Alta Tecnologia (CRPA LAB - capofila, CIRI FRAME, Terra&AcquaTech) insieme al Cluster Greentech e alle imprese Biorg srl, Wamgroup spa, Diemme Soil Washing srl e Azienda Agricola Colombaro srl. Le attività sono supportate da CIB - Consorzio Italiano Biogas.

Obiettivo del progetto è quello di produrre il fertilizzante struvite attraverso il recupero di azoto e fosforo dai digestati agrozootecnici e da Forsu, al fine di ridurre le emissioni in atmosfera di ammoniaca, metano e protossido d’azoto sia dalla fase di stoccaggio che di spandimento.

Verrà messo a punto un sistema prototipale a scala aziendale costituito da: filtri zeolitici per ridurre la concentrazione d’ammoniaca del digestato, avvicinandolo ad un rapporto stechiometrico N:P ottimale per la precipitazione/cristallizzazione della struvite, e da un microfiltro per ridurre la presenza di sostanza organica sospesa che ostacolerebbe la precipitazione della struvite.

Riferimenti



<https://struvite.it/>

<https://agricoltura.regione.emilia-romagna.it/progetti-innovazione/raccolta-progetti-innovazione/qualita-aria/bando-2020/trattamento-degli-effluenti-e-digestati-zootecnici-per-ridurre-le-emissioni-e-produrre-struvite-struvite>

<https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/find-connect/projects/trattamento-degli-effluenti-e-digestati-zootecnici.html>

https://crpalab.crupa.it/nqcontent.cfm?a_id=32669&tt=t_bt_app1_www
<https://greentech.clust-er.it/progetto-struvite/>

8. Altri progetti dei partecipanti al GdL2 che sono di interesse per la Piattaforma Italiana del Fosforo

8.1. Progetto CN AGRITECH

Il Progetto CN Agritech (Centro Nazionale per le Tecnologie dell'Agricoltura) si inserisce nell'ambito del Bando PNRR "Avviso pubblico per presentazione proposte di intervento per il potenziamento di strutture di ricerca e creazione di "campioni nazionali" di R&S su alcune Key Enabling Technologies da finanziare nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, Missione 4-Componente 2 -Investimento 1.4 finanziato dall'Unione Europea.- Next Generation EU. Area Tematica: Tecnologie dell'Agricoltura. Il coordinatore della proposta progettuale è l'Università degli studi di Napoli Federico II (UNINA). Coinvolge un totale di 51 partner.

Lo scopo del progetto è la creazione di un Hub nazionale per contribuire a preservare lo stock di capitale naturale e raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 con particolare riferimento al settore agricolo, in accordo con il Green Deal europeo.

Coerentemente con questa prospettiva, lo Standing Committee on Agricultural Research, evidenzia tre obiettivi principali quali la garanzia della nutrizione per tutti con cibi sani attraverso filiere sostenibili, la realizzazione della circolarità dei sistemi agroalimentari, il ripristino della diversità dei sistemi alimentari, agricoli e sociali.

Il progetto CN Agritech, basandosi sulla ricerca collaborativa preesistente, punta alla creazione di reti di infrastrutture e condivisione di grandi attrezzature con lo scopo di: combinare competenze necessarie per affrontare adeguatamente in un contesto multidisciplinare i molteplici problemi associati all'agricoltura sostenibile; integrare le infrastrutture e le attrezzature di ricerca disponibili in ciascun sito; sfruttare ed applicare le tecnologie abilitanti chiave (KET) più idonee consentendo un progresso proficuo in termini di produttività, sostenibilità, transizione ecologica e digitale nel settore agricolo; collaborare con aziende e agricoltori per aumentare la resilienza e la competitività economica delle filiere agroalimentari; sviluppare e diffondere nuovi modelli e capacità organizzative per creare e implementare programmi di ricerca strategica su larga scala.

Il progetto è articolato in 9 Spokes:

1 - Risorse genetiche vegetali, animali e microbiche e adattamento ai cambiamenti climatici (Plant, animal and microbial genetic resources and adaptation to climatic changes);

- 2 – Produzione agricola attraverso un approccio sistemico multidisciplinare per ridurre l'uso di agrofarmaci (Crop Health: a multidisciplinary system approach to reduce the use of agrochemicals);
- 3 - Tecnologie abilitanti e strategie sostenibili per la gestione intelligente dei sistemi agricoli e del loro impatto ambientale (Enabling technologies and sustainable strategies for the smart management of agricultural systems and their environmental impact);
- 4 - Sistemi agricoli e forestali multifunzionali e resilienti per la mitigazione dei rischi del cambiamento climatico (Multifunctional and resilient agriculture and forestry systems for the mitigation of climate change risks);
- 5 - Produttività sostenibile e mitigazione dell'impatto ambientale nei sistemi zootecnici (Sustainable productivity and mitigation of environmental impact in livestock systems);
- 6 - Modelli di gestione per promuovere la sostenibilità e la resilienza dei sistemi agricoli (Management models to promote sustainability and resilience of agricultural systems);
- 7 - Modelli integrati per lo sviluppo delle aree marginali per promuovere sistemi produttivi multifunzionali che accrescano la sostenibilità agro-ecologica e socio-economica (Integrated models for the development of marginal areas to promote multifunctional production systems enhancing agro-ecological and socio-economic sustainability);
- 8 - Nuovi modelli di economia circolare in agricoltura attraverso la valorizzazione e il riciclo dei rifiuti (Circular economy in agriculture through waste valorization and recycling);
- 9 - Nuove tecnologie e metodologie per la tracciabilità, la qualità, la sicurezza, le misurazioni e le certificazioni per valorizzare e tutelare i tratti tipici delle filiere agroalimentari (New technologies and methodologies for traceability, quality, safety, measurements and certifications to enhance the value and protect the typical traits in agri-food chains).

Il programma di ricerca Agritech nasce dall'unione funzionale delle attività pianificate dai referenti di ciascuna delle nove specifiche aree tematiche rappresentate dagli Spokes, mentre nella sua interezza il progetto è organizzato in 32 pacchetti di lavoro (WP), organizzati in 9 moduli interagenti con gli Spokes nazionali definiti.

In questo panorama, gli Spokes 6 e 8 risultano i più coerenti alle tematiche relative al recupero e riutilizzo di fosforo.

Molto brevemente gli spoke 6 e 8 si concentrano sulle seguenti attività (<https://agritechcenter.it/spokes/>).

Spoke 6 (Leader UniTO) – Management models to promote sustainability and resilience of agricultural systems (Modelli di gestione per promuovere la sostenibilità e la resilienza dei sistemi agricoli)

6.1 Farm management models to enhance sustainability and resilience from intensive to marginal areas

6.2 Circular management models to recover and enhance value of waste materials
Socio-economic and cultural models to link farm production to consumer expectations

Il task 6.2.1 prevede l'identificazione e l'adattamento delle nuove tecnologie più promettenti per combinare il riciclo di rifiuti organici per nuovi modelli di agricoltura.

Il task 6.2.2. progetta e pianifica sistemi circolari combinando differenti tipologie di aziende agricole, aziende alimentari con impianti di trasformazione di rifiuti.

Il task 6.2.3 valida i sistemi circolari per la loro capacità di invertire i cambiamenti climatici, aumentare la bioeconomia, proteggere la qualità di aria, acqua e suolo, e la salute.

Le attività dello spoke 6, con collegamento con l'8, prevede tra le attività, non in modo esclusivo, di sviluppare e validare nuove strategie di recupero e gestione del fosforo da scarti organici.

Spoke 8 (Leader UniMI), Circular economy in agriculture through waste valorization and recycling

-WP 8.1 Producing new products to upgrade waste value

-WP 8.2 Agroenergy production from wastes to reduce energy dependence;

-WP 8.3 Nutrient and organic matter recovery from wastes to reduce the use of agrochemicals and closing waste cycle;

- WP 8.4 Sustainability assessment of the technologies and their integration in agriculture.

All'interno del WP 8.3, il Task 8.3.1, nello specifico, presenta molteplici attività dedicate al recupero del fosforo.

-Task 8.3.1 Nutrient recovery from wastes to produce mineral fertilizers and promoting water recovery

In particolare, i partner del Task 8.3.1 sviluppano, in maniera sinergica, metodologie e tecnologie, diverse fra di loro per tipologia e scala, per il recupero di P da matrici di scarto per la produzione di prodotti fertilizzanti.

In maggiore dettaglio le attività prevedono, tra le tante, la produzione di fertilizzanti a base di struvite, mediante co-precipitazione, in un cristallizzatore su scala di laboratorio, alimentato da digestato zootecnico, come fonte di ammonio e fosfato, e fonti di magnesio alternative (Università di Milano).

Vi sono attività di recupero di azoto, fosforo e nutrienti da acque reflue e fanghi di depurazione mediante pratiche di riutilizzo idrico, nell'ottica della circolarità e del recupero di materia da scarti. Gli estratti così ottenuti, contenenti il fosforo di recuperato, sono stati testati in prove agronomiche in condizioni controllate, per sostituire i fertilizzanti fosfatici tradizionali con questi nuovi prodotti ricchi di P.

Inoltre, sono previste attività di estrazione di P da ceneri di fanghi da mono-incenerimento per l'ottenimento di prodotti fertilizzanti quali K-struvite, fosfati di Ca e fosfati di Mg. Parallelamente, l'attività riguarda anche l'estrazione di N, P e K da digestati di origine agro-alimentare sia per l'estrazione di ortofosfato sia per la precipitazione come struvite (Politecnico di Milano).

I prodotti ottenuti saranno validati in campo (anche in collegamento allo spoke 6).

Riferimenti

https://www.mur.gov.it/sites/default/files/2022-06/22_06_28%20Scheda_centro%20nazionale%20agritech_PNRR_MUR.pdf
<https://agritechcenter.it/>

8.2. Progetto Econutri - Innovative concepts and technologies for Ecologically sustainable Nutrient management in agriculture aiming to prevent, mitigate and eliminate pollution in soils, water and air

Università di Torino

Il progetto è finanziato dall'Unione Europea (Horizon Europe) ed ha l'obiettivo generale di ottimizzare, validare e dimostrare nuove soluzioni nature-base adattate in un concetto globale che siano capaci di contribuire a ridurre la lisciviazione di nitrati e fosforo, controllare le perdite di azoto dovute alla volatilizzazione dell'ammoniaca, mitigare l'emissione di gas serra.

Tra le numerose attività previste nel progetto, il lavoro di ricerca di UNITO si focalizza sulla precipitazione di struvite dalla frazione liquida del digestato di letame.

Il sistema pilota prevede un trattamento a cascata basato su tecnologie quali separazione meccanica, osmosi inversa, essiccazione della frazione solida e produzione di pellet. Le attività di ricerca sono finalizzate all'ottimizzazione del sistema di trattamento del digestato, con particolare attenzione al miglioramento delle tecnologie di riciclo dei nutrienti.

Riferimenti

<https://econutri-project.eu/>

8.3. Progetto GRIP – Processi Verdi per la produzione industriale e conveniente valorizzazione degli effluenti

Università di Torino

Nodes – Nord Ovest Digitale e Sostenibile prevede diversi spoke. L'attività è svolta all'interno dello SPOKE N2 - Green Technologies And Sustainable Industries. Il leader del progetto è l'Università di Torino.

Il nome del progetto è Green processes for Industrial Production and cost-effective effluents valorisation. L'obiettivo del progetto GRIP è di dimostrare la possibilità di supportare lo sviluppo di un ecosistema integrato dal punto di vista ambientale, economico e sociale, capace di convertire i territori coinvolti in NODI in territori basati sull'Economia Circolare, riducendo le emissioni di CO₂, concentrandosi su bio-prodotti industriali, materie prime seconde e concetti di simbiosi industriale.

Per quanto riguarda il recupero di fosforo, il lavoro di ricerca si focalizza sulla precipitazione di struvite dalla frazione liquida del digestato di FORSU (frazione organica del rifiuto solido urbano).

Riferimenti

<https://www.ecs-nodes.eu/>

8.4. Progetto IPCEI Batteries (2) - EuBatIn

Italmatch

IPCEI è l'abbreviazione di Important Project of Common European Interest.

Il Fondo IPCEI è lo strumento agevolativo che supporta le attività svolte dai soggetti italiani coinvolti nella realizzazione degli Important Progetti di Comune Interesse Europeo (IPCEI, <https://www.mimit.gov.it/it/incentivi/fondo-ipcei-importanti-progetti-di-comune-interesse-europeo>).

La Commissione Europea (2021) ha autorizzato gli aiuti di Stato di dodici paesi a sostegno della realizzazione del secondo importante progetto di comune interesse europeo nel settore delle batterie (IPCEI Batterie 2). L'IPCEI Batterie 2 sostiene attività di ricerca, sviluppo e innovazione, anche comprese nella prima applicazione industriale, lungo l'intera catena del valore, dall'estrazione delle materie prime, alla progettazione e produzione di batterie, al riciclaggio e immissione nel circuito dell'economia circolare, con un forte accento sulla sostenibilità ambientale (<https://www.mimit.gov.it/it/incentivi/ipcei-batterie-2>).

Il progetto denominato European Battery Innovation (EuBatIn) mira a garantire un vantaggio competitivo dell'innovazione europea sulle batterie. L'obiettivo del progetto è di sostenere un'economia circolare delle batterie.

Dei quattro technology fields, il quarto, il Workstream 4: Recycling and Sustainability, si concentra sullo sviluppo di soluzioni per il riciclo in accordo con i principi di sostenibilità. All'interno di questo gruppo di lavoro sono anche previste attività per il riciclo del fosforo contenuto nelle batterie.

Riferimenti

<https://www.ipcei-batteries.eu/>

<https://www.mimit.gov.it/it/incentivi/ipcei-batterie-2>

<https://www.mimit.gov.it/it/incentivi/fondo-ipcei-importanti-progetti-di-comune-interesse-europeo>

8.5. Progetto Idro.Smart

RE-CORD

Il progetto è stato co-finanziato dal POR FESR Toscana 2014-2020, asse 1 - azione 1.1.5 SUB A1. L'attività integra una tecnologia di depurazione delle acque, che prevede l'utilizzo di biomasse granulari aerobiche (Aerobic granular sludge, AGS) con un processo di pirolisi del fango essiccato, che si svolge a pressione atmosferica e temperature tra 450 e 550°C.

I fanghi di supero prodotti dagli impianti di depurazione attualmente gestiti da Publiacqua S.p.A., sono stati pretrattati con il processo di pirolisi producendo sia gas/oli utilizzabili direttamente come combustibili, che biochar. Lo stesso biochar è stato poi sottoposto a processi di lisciviazione per il recupero di nutrienti e altri metalli (P, K, N, Mg, Ca, K, Fe). Dal processo di lisciviazione sono stati ottenuti due prodotti: un precipitato contenente più del 90% del fosforo presente nel fango iniziale, ed un biocarbone utilizzabile in successive applicazioni (carboni attivi, metallurgia).

Nell'ambito del progetto RE-CORD ha costruito e validato un impianto di lisciviazione batch su scala reale con capacità pari a 50 lt. Un impianto da 500 lt è in fase di costruzione.

Il processo è stato brevettato da RE-CORD.

Riferimenti

<https://www.publiacqua.it/idrosmart-investiamo-sullinnovazione>

<https://ngs-sensors.it/2022/07/07/idro-smart-soluzioni-avanzate-per-la-gestione-e-il-recupero-di-materia-negli-impianti-di-trattamento-acque-reflue/>

<https://www.re-cord.org/proj-35.php>

<https://www.mdpi.com/2073-4441/15/6/1060>

8.6. Progetto P2Green

IRIDRA

P2Green (Closing the gap between fork and farm for circular nutrient flows) è un progetto quadriennale dell'UE, con un consorzio di 32 partner europei (PMI, ONG, università, istituti di ricerca, governi locali e partner di rete). Il progetto ha ricevuto fondi dell'Unione Europea nell'ambito della call Horizon 2020.

Il progetto sviluppa, testa e adatta l'uso dei rifiuti sanitari umani per produrre fertilizzanti sicuri e a base biologica per l'agricoltura. P2Green mira a sviluppare e dimostrare approcci praticabili e sostenibili al recupero dei nutrienti (incluso il fosforo) dai rifiuti sanitari. Tre regioni pilota di P2Green, Gotland (Svezia), la regione metropolitana di Amburgo-Hannover (Germania) e la regione Axarquia di Malaga (Spagna), svilupperanno e dimostreranno la conversione dei rifiuti sanitari umani in fertilizzanti biologici sicuri in un innovativo sistema a ciclo chiuso. Le lezioni apprese saranno condivise con le quattro regioni follower di P2Green: Ungheria, Grecia, Francia e Italia.

La partecipazione al progetto da parte di IRIDRA si concentra sull'applicazione di tecnologie innovative su scala nazionale: il cluster regionale italiano porterà due importanti opzioni di replica delle soluzioni P2Green: (i) una grande azienda italiana proprietaria di circa 150 stazioni di rifornimento autostradali, interessata a indagare il potenziale mercato per i prodotti generati dalla segregazione delle urine; (ii) una grande azienda agricola cooperativa del Sud Italia, interessata all'uso di fertilizzanti recuperati dalle urine e di schemi innovativi di fertirrigazione con acque reflue trattate.

Riferimenti

<https://p2green.eu/>

<https://www.igidra.eu/it/ricerca-e-sviluppo/progetti-europei-in-corso/p2green>

<https://circular-cities-and-regions.ec.europa.eu/ccri-projects/p2green-closing-gap-between-fork-and-farm-circular-nutrient-flows>

9. Nuovi Progetti ed attività di interesse della Piattaforma Italiana del Fosforo nell'anno 2025

I partecipanti alla Piattaforma Italiana del fosforo hanno riportato l'esistenza di nuovi progetti e attività in corso per l'anno 2025.

9.1. Nuovi progetti

UPCYCLE

UPCYCLE - Upscaling Deep Conversion Routes For Hard-To-Recycle Biogenic Waste, (<https://www.upcycle-project.eu/>) è un MSCA (Marie Skłodowska-Curie Action) Doctoral Network finanziato dalla Commissione Europea, in cui partecipano di sei università (Politecnico di Milano, Università di Lubiana, KU Leuven, Università Re San Carlo, La Sapienza, Università Tecnica di Darmstadt) e diverse aziende (CAP, CarboREM, Indaver, Ingelia, IOS, Sulzer, Vyncke) di sei paesi europei. L'obiettivo del progetto è quello di formare una coorte di 15 giovani ricercatori altamente qualificati, dotati di un insieme di competenze multidisciplinari, non limitate a quelle tecniche, con l'obiettivo di trasformarli in futuri leader della ricerca o imprenditori in grado di promuovere un cambiamento di paradigma nel trattamento e nella valorizzazione dei rifiuti di origine biologica che sono difficili da riciclare.

Il progetto vuole formare la prossima generazione di professionisti nell'ottimizzazione delle tecnologie di conversione per rifiuti biogenici difficili da riciclare e fornire strumenti innovativi per la progettazione di soluzioni per il riciclo di tali rifiuti in materie prime seconde di alto valore. Tale obiettivo sarà raggiunto attraverso lo sviluppo di una metodologia integrata che combina tecniche sperimentali e di modellazione a varie scale (molecolare, reattori e di processo), coprendo l'intera catena del valore in continuità con gli stakeholder di riferimento. Nel progetto saranno individuati diversi flussi prioritari di rifiuti, in particolare fanghi di depurazione altamente contaminati e altre matrici derivanti dal trattamento delle acque reflue, nonché materiali lignocellulosici.

Nel progetto sono previste linee di ricerca anche rivolte allo studio del recupero di fosforo.

L'attività prevede l'utilizzo della gassificazione e la descrizione del trasferimento di calore e massa in fase solida e delle relative interazioni con la fase gassosa, nonché l'inclusione di meccanismi cinetici bio/chimici per i componenti organici ed inorganici allo scopo di descrivere il destino del fosforo e di altre materie prime seconde. Sarà prodotto, infine, un modello in grado di supportare la progettazione e l'ottimizzazione delle condizioni di processo nel recupero di materie prime seconde.

I rifiuti biogenici contaminati saranno valorizzati attraverso la liquefazione idrotermica (HTL) e la carbonizzazione idrotermica (HTC). La ricerca mira a valutare e ottimizzare la progettazione di un impianto HTL semi-continuo, perfezionare le condizioni operative per ottimizzare la resa dei prodotti e caratterizzare le proprietà del biochar e delle fasi solide, liquide e gassose. Ancora, sarà migliorata la comprensione del destino dei contaminanti riducendo al minimo la loro presenza nel biochar e garantendo un recupero sufficiente di composti inorganici (ad esempio, fosforo).

NEOFOS

Il progetto NEOFOS - Tecnologie innovative per un approccio olistico di recupero di fosforo da acque reflue e fanghi urbani - è finanziato dal MASE a seguito di avviso pubblico per la presentazione di progetti di ricerca, sviluppo e innovazione tecnologica riguardanti l'intera catena del valore delle materie prime critiche (MPC) e delle materie prime strategiche (MPS), finanziabili nell'ambito dell'iniziativa "Mission Innovation 2.0". Il progetto inserito nell'ambito della call per l'urban mining è coordinato da CAP Holding Spa, in partenariato con MM Spa, Politecnico di Milano e Università di Bologna.

Il progetto NEOFOS ha l'obiettivo primario di sviluppare approcci circolari innovativi basati sull'implementazione di soluzioni tecnologiche e di strategie integrate alla scala di impianto in grado di abilitare la rimozione efficiente del fosforo dalle acque reflue e il relativo recupero di materie prime seconde sostenibili che possano essere utilizzate in diversi processi produttivi.

In particolare, ha l'obiettivo di testare a scala di impianto la tecnologia S2EBPR di rimozione biologica del fosforo dalla linea acque conformemente ai nuovi limiti allo scarico della normativa europea e valutarne la sostenibilità economica ed ambientale (maggiori efficienze, riduzione uso reagenti chimici, minori consumi energetici, migliore purezza fanghi).

I dimostrativi verranno installati in due differenti impianti (CAP e MM) valutandone e modellizzandone l'ottimizzazione.

Inoltre si approfondirà e ottimizzerà a scala pilota la produzione di Sali di fosfato dalla linea fanghi degli impianti di depurazione in logica di EoW. Con la collaborazione delle università si cercherà un'ottimizzazione a scala laboratorio/pilota dei processi di recupero del fosforo dalle ceneri da mono-incenerimento dei fanghi garantendo maggiore purezza del prodotto finale e minore consumo di acidi per una migliore sostenibilità di processo.

F.O.S.F.O.R.O.

Il progetto F.O.S.F.O.R.O. – Fanghi Organici Sostenibili per il Futuro: Ottimizzazione del Recupero di Ortofosfati e altri nutrienti” è finanziato dal Bando "Collabora & Innova" di Regione Lombardia e nasce con l’obiettivo di trasformare i fanghi da depurazione in una risorsa strategica per l’ambiente e l’industria, promuovendo l'economia circolare e la sostenibilità. Attraverso un approccio innovativo e multidisciplinare, il progetto intende superare la tradizionale visione dei fanghi come semplice scarto, valorizzandoli invece come fonte preziosa di nutrienti fondamentali, come il fosforo, indispensabile per l’agricoltura e numerosi processi industriali.

Il progetto è coordinato da A2A Ambiente Spa, in partenariato con MM Spa, Arcadia Consulting, Isinnova, SEAM Engineering, VOMM Impianti e Processi, Università degli Studi di Brescia, con il supporto del Lombardy Energy Cleantech Cluster (LE2C).

<https://www.gruppoa2a.it/it/progetti/partnership/fosforo-fanghi-nuova-risorsa-economia-circolare>

9.2. Evoluzione dei progetti in corso ed Ulteriori attività

In RE-CORD è in fase di ultimazione la realizzazione dell'impianto di lisciviazione fosforo da char, con una portata di 50 kg/h di materiale.

Inoltre, sempre in RE-CORD è stato messo a punto un nuovo sistema di estrazione da fanghi di depurazione, che combina pirolisi/leaching in grado di produrre un sale fertilizzante solubile con contenuto di fosforo maggiore del 20%, privo di alluminio e ferro. RE-CORD ha sviluppato un processo combinato di pirolisi e lisciviazione chimica (CHARLENE), attualmente brevettato, che permette di trasformare gli scarti biogenici in due prodotti distinti: un biocarbone privato del fosforo e di altri inorganici, utilizzabile in diversi settori industriali ed un sale ricco in fosforo ed altri nutrienti, con qualità di fertilizzante inorganico.

Tra le principali attività di applicazione del processo, ci sono due progetti finanziati dal programma RFCS (Research For Coal and Steel): BIORECAST e THELMA. In entrambi i progetti, RE-CORD ha l’obiettivo di produrre decine di tonnellate di biocarbone da utilizzare in fornaci ad arco elettrico al posto del carbone fossile attraverso impianti dimostrativi di pirolisi e lisciviazione appositamente progettati e realizzati internamente. I metalli pesanti, contaminanti per un fertilizzante, ma non per la metallurgia, rimangono principalmente nel biocarbone.

Il processo sviluppato è in grado di recuperare più del 98% di fosforo a partire da fanghi di depurazione o da digestato, producendo un biocarbone di grado siderurgico, e un sale fertilizzante con una concentrazione di P_2O_5 variabile tra 15% e 30% di sostanza secca. Da entrambi i progetti in corso, si stima di produrre più di 30 ton di fertilizzante,

disponibile per prove sperimentali o nuovi progetti di ricerca (<https://www.biorecast.eu/>).

Le attività di CRPA sul recupero di fosforo dai digestati di reflui zootecnici iniziati con il progetto GOi Struvite hanno visto la prosecuzione tramite un finanziamento PR FESR 2021-2027 Emilia-Romagna. La proposta progettuale mira a diminuire il contenuto di azoto e fosforo nei digestati (biomassa in uscita dai digestori anaerobici), sia agricoli derivanti da biomasse agricole e agroindustriali, sia municipali derivanti dalla digestione anaerobica di frazioni organiche urbane, al fine di recuperare elementi fertilizzanti e ridurre le emissioni in atmosfera di ammoniaca, metano e protossido di azoto, sia nella fase di stoccaggio che durante l'utilizzo agronomico.

L'azoto e il fosforo recuperati dai digestati produrranno un fertilizzante di recupero rinnovabile e a lento rilascio (Struvite) che si prevede possano sostituire i fertilizzanti minerali e di sintesi, come promosso dal nuovo Regolamento Europeo sui Fertilizzanti 2019/1009. E' stato installato un prototipo a valle di un digestore anaerobico reflui zootecnici che tratta la frazione liquida, ottenuta tramite processi di separazione meccanica che sono solitamente già utilizzati.

Per il raggiungimento degli obiettivi, verrà messo a punto un sistema prototipale a scala aziendale costituito da: filtri zeolitici per ridurre la concentrazione d'ammoniaca del digestato, avvicinandolo ad un rapporto stechiometrico N:P ottimale per la precipitazione/cristallizzazione della struvite, e da un microfiltro per ridurre la presenza di sostanza organica sospesa che ostacolerebbe la precipitazione della struvite.

Con una durata prevista di 30 mesi (07/02/2024 - 06/08/2026) vede come beneficiari il Centro Ricerche Produzioni Animali - CRPA Soc. Cons. P.A, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, CIRI FRAME Laboratorio Terra&AcquaTech, ASSOCIAZIONE CLUST-ER ENERGIA E SVILUPPO SOSTENIBILE. (<https://www.struvite.it>).

HBI ha progettato, in collaborazione con la Libera Università di Bolzano, un prototipo innovativo di gassificatore, finalizzato all'ottimizzazione della qualità e delle caratteristiche chimico-fisiche delle ceneri prodotte. Entro aprile 2026, l'azienda completerà presso la propria sede operativa di Zero Branco (TV) l'installazione della versione 3.0 del proprio impianto dimostrativo-industriale, con una capacità di trattamento fino a 1.000 tonnellate annue di fango disidratato (pari a circa 22–25% di sostanza secca). Successivamente, entro la fine del 2027, è prevista l'installazione di un impianto di scala superiore, pari a circa 7.000 tonnellate annue, presso un depuratore del Nord Italia. Per le ceneri prodotte in tale contesto, HBI intende richiedere un End of Waste sperimentale, al fine di dimostrare in modo definitivo la possibilità di utilizzo delle

stesse come materia prima seconda in sostituzione delle rocce fosfatiche, aprendo la strada a un'integrazione strutturale nel settore dei fertilizzanti.

10. Conclusioni

L'indagine conoscitiva delle tecnologie e buone pratiche condotta all'interno del Gruppo di Lavoro N. 2 (GdL2) della Piattaforma confermano una vivace attività nel campo della gestione e del recupero del fosforo da fonti non convenzionali.

La produzione nel settore da parte della comunità scientifica nazionale è piuttosto intensa e in linea con quanto avviene a livello internazionale.

Anche le attività progettuali sono piuttosto intense e, se confrontate con quanto intercettato nel 2019, sembrano in sensibile aumento anche nell'ultimo anno oggetto di questa indagine.

Le attività e i progetti che coinvolgono i partecipanti alla PIF ed inerenti il recupero e la gestione del fosforo sono in prosecuzione.

L'ultimo anno ha visto l'inizio di ulteriori progetti a diverso livello di finanziamento. Tra questi progetti con obiettivi specifici sul recupero del fosforo, per la maggior parte vede un finanziamento internazionale (per lo più co-finanziamento europeo).

Diversi progetti, invece, presentano tematiche più ampie (Batterie, Agrifood, materie prime seconde, gestione reflui e rifiuti, ecc.), ma con un contenuto rilevante di attività legate alla gestione ed al recupero del fosforo.

La maggior parte dei progetti individuano matrici organiche come fonte non convenzionale di fosforo.

Confrontando quanto raccolto in questa consultazione, con quanto presente nel 2019 (PIF 2019a; 2019b) si conferma che, nonostante la vivace attività nel settore, le esperienze in piena scala risultano ancora limitate specialmente in Italia.

11. Riferimenti bibliografici

- Breiter A., Horetsky E., Linder M., Rettig R., 2022. Power spike: how battery makers can respond to surging demand from EVs. McKinsey & Company, McKinsey Global Publishing, 7 pp. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/power-spike-how-battery-makers-can-respond-to-surging-demand-from-evs>.
- Canziani R., Di Cosmo R., 2018. Stato dell'arte e potenzialità delle tecnologie di recupero del fosforo dai fanghi di depurazione. *Ingegneria dell'Ambiente* 5(3): 149-170. doi.org/10.32024/ida.v5i3.p01.
- Carpenter S.R., Caraco N.F., Correll D.L., Howarth R.W., Sharpley A.N., Smith V.H., 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological Applications*, 8(3): 559-568.
- CE, 2002. Regolamento (CE) n. 1774/2002 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 3 ottobre 2002 recante norme sanitarie relative ai sottoprodotti di origine animale non destinati al consumo umano (GU L 273 del 10.10.2002).
- Chowdhury R.B., Moore G.A., Weatherley A.J., Arora M., 2014. A review of recent substance flow analyses of phosphorus to identify priority management areas at different geographical scales. *Resource, Conservation and recycling*, 83: 213-228.
- Commissione Europea, 2011. Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni. Affrontare le sfide relative ai mercati dei prodotti di base e alle materie prime. Bruxelles, 2.2.2011 COM(2011) 25 definitivo.
- Commissione Europea, 2014. Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni Concernente la revisione dell'elenco delle materie prime essenziali per l'UE e l'attuazione dell'iniziativa "materie prime". Bruxelles, 26.5.2014 Com(2014) 297 definitivo.
- Commissione Europea, 2017. Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni Concernente l'elenco 2017 delle materie prime essenziali per l'UE. Bruxelles, 13.9.2017 Com(2017) 490 final.
- Commissione Europea, 2020. Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni. Resilienza delle materie prime critiche: tracciare un percorso verso una maggiore sicurezza e sostenibilità. Bruxelles, 3.9.2020 Com(2020) 474 final.
- Commissione Europea, 2021. Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea, C 494, Document C:2021: 494 final.
- Commissione Europea, 2022. Implementation Report of the Sewage Sludge Directive 86/278/EEC. Final implementation report.
- Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives (OJ L 312, 22.11.2008, p. 3).
- EC 2019. European Commission, COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT EVALUATION of the Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991, concerning urban waste-water treatment.
- EEA, European Environment Agency, 2020. Bio-waste in Europe – tuning challenges into opportunities. EEA Report N. 04/2020.
- Egle L., Zoboli O., Thaler S., Rechberger H., Zessner M., 2014. The Austrian P budget as a basis for resource optimization. *Resource, Conservation and recycling*, 83: 152-162.
- Egle L., Rechberger H., Kramp J., Zessner M., 2016. Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies, *Science of the Total Environment*, 571, 522-542.
- European Commission, Directorate-General for Environment, Support to the evaluation of the Sewage Sludge Directive – Final implementation report, Publications Office of the European Union, 2022, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/758730>
- Fiameni L., Fahimi A., Federici S., Cornelio A., Depero L.E., Bontempi E., 2022. A new breakthrough in the P recovery from sewage sludge ash by thermochemical processes. *Green Chemistry*, 24:6836-6839. <https://doi.org/10.1039/D2GC02328H>
- Forte F., Pietrantonio M., Pucciarmati S., Puzone M., Fontana D., 2021. Lithium iron phosphate batteries recycling: an assessment of current status. *Critical Review in Environmental Science and Technology*, 51(19): 2232-2259. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1776053>.

- Henze M., van Loosdrecht M.C.M., Ekama G., Brdjanovic D., 2008. Biological wastewater treatment: principles, modelling and design. IWA Publishing, 517 pagg.
- Htfmarketreport, 2018. <https://www.htfmarketreport.com/reports/966145-united-states-li-ion-battery-market-2>. <https://doi.org/10.3390/su151914620>
- Kabbe C., 2019. Global Compendium on Phosphorus Recovery from Sewage/Sludge/Ash. Global Water Research Coalition.
- Kalmykova Y., Fedje Karlfeldt K., 2013. Phosphorus recovery from municipal solid waste incineration fly ash. Waste Management, 33: 1403-1410.
- La Marca F., Ferrini M., Scoppettuolo A., 2015. Pre-trattamento delle batterie litio-ione in scala di laboratorio con particolare riferimento alle modalità di apertura delle celle. Report RdS/PAR2014/187.
- Laga, 2015. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall. LAGA Ad-hoc-AG (Joint Ad Hoc Working Group of the Federal Government and the Länder on Waste). Resource conservation through phosphorus recovery. Final Report, July 2015. 47 pagg.
- Li H., Xing S., Liu Y., Li F., Guo H., Kuang G., 2017. Recovery of Lithium, Iron, and Phosphorus from Spent LiFePO₄ Batteries Using Stoichiometric Sulfuric Acid Leaching System. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 5, 8017–8024.
- Mininni G., Mauro E., Tellini T., Gianico A., 2023. Tecnologie di recupero del fosforo dai fanghi di depurazione. Utilitalia, 52 pagg.
- Nätörp A., Kabbe C., Matsubae K., Ohtake H., 2019. Development of Phosphorus Recycling in Europe and Japan. In Ohtake H., Tsuneda S. eds. Phosphorus recovery and recycling. Springer.
- Ott C., Rechberger H., 2012. The European phosphorus balance. Resource, Conservation and Recycling, 60: 159-172.
- PIF, Piattaforma Italiana del Fosforo, 2019a. Le tecnologie disponibili per il recupero del fosforo. <https://www.piattaformaitalianafosforo.it/it/prodotti.html>.
- PIF, Piattaforma Italiana del Fosforo, 2019b. Le buone pratiche esistenti e casi studio del recupero e gestione del fosforo. <https://www.piattaformaitalianafosforo.it/it/prodotti.html>
- P-REX, 2015. Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery and energy efficiency. P-REX Project Final Report. ENV.2012.6.5-2. Report, 66 pagg.
- P-REX, 2017. Main P-REX deliverables. Recycling-now! Building on full-scale practical experiences to tap the potential in European municipal wastewater. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.242550>
- Phosphorus
- Salimbeni A., Di Bianca M., Rizzo A.M., Chiaramonti D., 2023. Activated Carbon and P-rich fertilizer production from industrial sludge by application of an integrated thermo-chemical treatment. Sustainability, 15(19): 14620.
- Utilitalia, 2019. Gestione dei fanghi di depurazione, position paper Utilitalia.
- Van Dijk K.C., Lesschen J.P., Oenema O., 2016. Phosphorus flows and balance of the European Union member states. Science of Total Environment, 542: 1078-1093.
- Wang W., Wu Y., 2017. An overview of recycling and treatment of spent LiFePO₄ batteries in China. Resources, Conservation & Recycling 127, 233–243.
- Yang Y., Zheng X., Cao H., Zhao C., Lin X., Ning P., Zhang Y., Jin W., Sun Z., 2017. A Closed-Loop Process for Selective Metal Recovery from Spent Lithium Iron Phosphate Batteries through Mechanochemical Activation. ACS Sustainable Chemistry & Engineering 5, 9972–9980.

12. Sitografia

<http://dati.istat.it>
<https://agricoltura.regione.emilia-romagna.it/progetti-innovazione/raccolta-progetti-innovazione/qualita-aria/bando-2020/trattamento-degli-effluenti-e-digestati-zootecnici-per-ridurre-le-emissioni-e-produrre-struvite-struvite>
<https://agritechcenter.it/>
<https://agritechcenter.it/spokes/>
<https://carborem.greenthesisgroup.com>
<https://carborem.greenthesisgroup.com/case-history>
<https://circular-cities-and-regions.ec.europa.eu/ccri-projects/p2green-closing-gap-between-fork-and-farm-circular-nutrient-flows>
<https://cordis.europa.eu/project/id/958267>
<https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-85-2024-INIT/en/pdf>
<https://doi.org/10.1039/D2GC02328H>
<https://doi.org/10.5281/zenodo.242550>
<https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/find-connect/projects/trattamento-degli-effluenti-e-digestati-zootecnici.html>
https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/2018-2020/annexes/h2020-wp1820-annex-g-trl_en.pdf
<https://econutri-project.eu/>
<https://flashphos-project.eu/>
https://food.ec.europa.eu/horizontal-topics/farm-fork-strategy_en
<https://icl-growingsolutions.com/agriculture/products/puraloop-38>
<https://koch-next-cms.azurewebsites.net/phosforce>
<https://ngs-sensors.it/2022/07/07/idro-smart-soluzioni-avanzate-per-la-gestione-e-il-recupero-di-materia-negli-impianti-di-trattamento-acque-reflue/>
<https://nuresys.com>
https://ostara.com/wp-content/uploads/2018/08/Ostara_WASSTRIP_Handout_170411.pdf
<https://p2green.eu/>
https://phosphorusplatform.eu/images/download/ESPP-NNP-DPP_P-recovery_tech_catalogue_v_3_9_21.pdf
https://phosphorusplatform.eu/images/download/Kabbe_P-recovery_tech_implementation%20Table_2021_07.pdf
<https://phoster-project.eu/>
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/gc/d2gc02328h>
<https://pyreg.com>

<https://struvite.crpa.it/>
<https://www.aquapublica.eu/article/news/european-parliament-adopts-provisional-agreement-urban-wastewater-treatment-directive>
<https://www.biorecast.eu/>
<https://www.borealisgroup.com>
<https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/11/05/urban-wastewater-council-adopts-new-rules-for-more-efficient-treatment/>
<https://www.consilium.europa.eu/it/press/press-releases/2024/11/05/urban-wastewater-council-adopts-new-rules-for-more-efficient-treatment/>
<https://www.easymining.com/technologies/ash2phos2/ash2phos>
<https://www.ecs-nodes.eu/>
<https://www.era-learn.eu/network-information/networks/era-min-2>
<https://www.era-learn.eu/network-information/networks/era-min-2/era-min-joint-call-2017/design-of-a-product-for-substitution-of-phosphate-rocks>
<https://www.era-learn.eu/network-information/networks/era-min3>
<https://www.era-learn.eu/network-information/networks/era-min3/eu-co-funded-era-min-joint-call-2021/phosphorus-and-magnesium-recovery-from-waste-streams-for-production-of-high-value-renewable-fertilizers?SearchTerm=phoster>
<https://www.era-learn.eu/network-information/networks/era-min3/eu-co-funded-era-min-joint-call-2021/thermal-processing-of-p-rich-ashes-aiming-for-high-grade-phosphorus-products>
[https://www.era-min.eu/about-era-min-3;](https://www.era-min.eu/about-era-min-3)
<https://www.euphore.de>
<https://www.fc.up.pt/deasphor/>
<https://www.gruppoa2a.it/it/progetti/partnership/fosforo-fanghi-nuova-risorsa-economia-circolare>
<https://www.icl-group.com/blog/from-waste-to-growth-puraloop-fertilizer>
<https://www.ipcei-batteries.eu/>
<https://www.iridra.eu/it/ricerca-e-sviluppo/progetti-europei-in-corso/p2green>
<https://www.linkedin.com/company/phoster-eu/>
<https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/power-spike-how-battery-makers-can-respond-to-surging-demand-from-evs>
<https://www.mdpi.com/2073-4441/15/6/1060>
<https://www.mimit.gov.it/it/incentivi/fondo-ipcei-importanti-progetti-di-comune-interesse-europeo>
<https://www.mimit.gov.it/it/incentivi/ipcei-batterie-2>
https://www.mur.gov.it/sites/default/files/2022-06/22_06_28%20Scheda_centro%20nazionale%20agritech_PNRR_MUR.pdf
<https://www.ostara.com>
<https://www.ostara.com/nutrient-recovery/crystal-green-pearl>

<https://www.ostara.com/nutrient-recovery/nutrient-recovery-solutions/>
<https://www.paquesglobal.com/products/phospaq>
<https://www.phosphorusplatform.eu>
https://www.phosphorusplatform.eu/images/download/Kabbe_P-recovery_tech_implementation%20Table_2023-01-04.pdf
https://www.phosphorusplatform.eu/images/download/Kabbe_Tech_implementation-Table_20170208.pdf
<https://www.publiacqua.it/idrosmart-investiamo-sullinnovazione>
<https://www.re-cord.org/proj-35.php>
<https://www.remondis-sustainability.com/sustainability-from-a-to-z/phosphorus-recovery>
https://www.struvite.it/nqcontent.cfm?a_id=32669&tt=t_bt_app1_www
<https://www.suez.com/en/denmark/wastewater/phosphorus-recovery-via-struvite-precipitation>
<https://www.susphos.com>
<https://www.swerim.se/en/phigo>
<https://www.unibs.it/en/node/6476>
<https://www.unibs.it/it/ateneo/comunicazione/tutte-le-news/phigo-il-progetto-il-recupero-di-fosforo-da-scarti-di-ceneri-anche-unibs-nel-nuovo-progetto-di>
<https://www.upcycle-project.eu/>
https://www.veoliawatertechnologies.com/sites/g/files/dvc2476/files/document/2019/02/3351%2C150354_Mkt_Mun_Brochure_STRUVIA_EN_.pdf

Appendice A – TRL

HORIZON 2020 – WORK PROGRAMME 2018-2020

General Annexes Page 1 of 1 Extract from Part 19 – Commission Decision
C(2017)7124

G. Technology readiness levels (TRL)

Where a topic description refers to a TRL, the following definitions apply, unless otherwise specified:

- TRL 1 – basic principles observed
- TRL 2 – technology concept formulated
- TRL 3 – experimental proof of concept
- TRL 4 – technology validated in lab
- TRL 5 – technology validated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
- TRL 6 – technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)
- TRL 7 – system prototype demonstration in operational environment • TRL 8 – system complete and qualified
- TRL 9 – actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)

Da: https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/2018-2020/annexes/h2020-wp1820-annex-g-trl_en.pdf