



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
FEDERICO II**

**Scuola Politecnica e delle Scienze di Base**

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale*



Corso di Laurea Triennale in:

**INGEGNERIA PER L'AMBIENTE ED IL TERRITORIO**

TESI DI LAUREA:

**“Recupero del fosforo dalle acque reflue”**

RELATORE

Ch.mo Prof. Ing.  
Francesco Pirozzi

CANDIDATO

Carmen Aerto  
matr. N49000727

# L'importanza del fosforo

- ▶ In questo particolare periodo della storia ci troviamo di fronte a una scarsità di materie prime e risorse fondamentali. Una tra queste è il fosforo (P), che esiste in natura solo all'interno di rocce (**fosforiti**). La quasi totalità delle miniere si trova in Cina, Marocco, Stati Uniti e Russia che sono sempre più sfruttate. Per questo motivo sono stati sperimentati dei processi che consentono recupero del fosforo da fonti alternative.



Fosforite



Miniera di fosforiti in Marocco

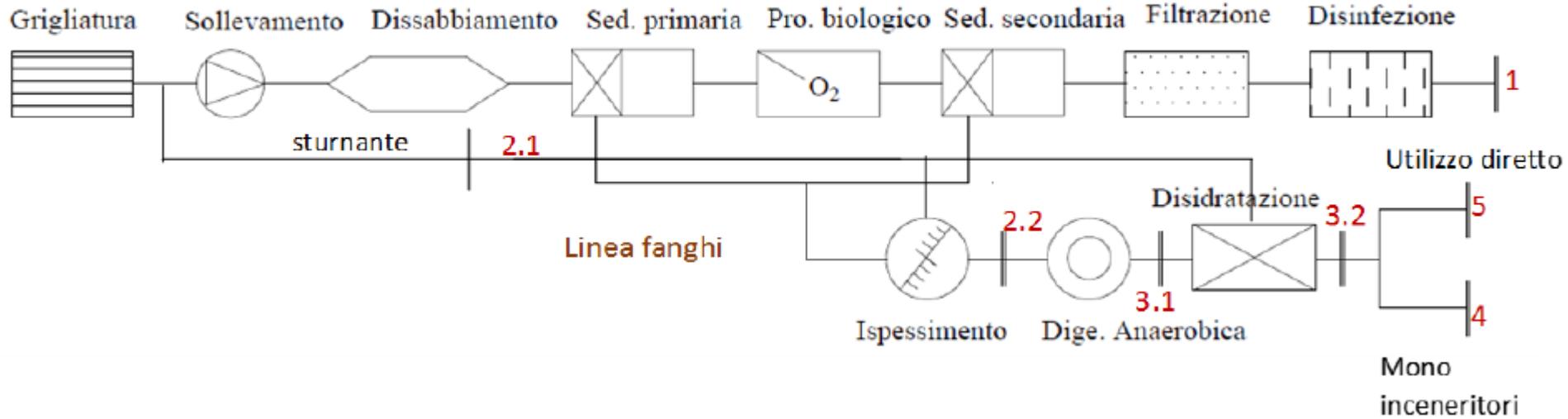
# Il consumo del fosforo

- Per porre un freno alla diminuzione esponenziale della materia prima, intesa come roccia fosfatica, si può ricorrere ad una **risorsa "secondaria"**, recuperata a valle dei trattamenti delle acque reflue provenienti dal ciclo antropico.

Settore di consumo	Quantitativo di P perso (Mt/anno)	
	2005	2016
Fanghi di depurazione	0,51	1,21
Effluente impianti di depurazione	0,08	0,2
Impianti di depurazione decentralizzati	0,08	0,19
Acque reflue non collettate	0,07	0,17
Acque reflue municipali non trattate	0,04	0,09
Acque reflue decentralizzate non trattate	0,02	0,06
Scarti alimentari (industriali e urbani)	0,39	0,94
Scarti di cartiera, non adatti all'agricoltura e lignei, altre attività industriali e di ruscellamento	0,09	0,21
Scarti di cibo per animali, deiezioni animali, decessi animali	0,18	0,43
P totale perso	1,46	3,5
P totale in ingresso	2,39	6,37
<b>% P perso nel ciclo antropico</b>	<b>61%</b>	<b>55%</b>

# Il processo di depurazione delle acque reflue

Linea acque



# Il contesto normativo italiano sul recupero dei fanghi

- ▶ Il **D.Lgs 99/1992** che ha lo scopo di disciplinare l'utilizzazione diretta dei fanghi di depurazione in agricoltura in modo da evitare effetti nocivi sul suolo, sulla vegetazione, sugli animali e sull'uomo, incoraggiandone nel contempo la corretta utilizzazione.
- **Uso diretto in agricoltura:** si effettua lo spandimento dei fanghi, in uscita dal loro trattamento, direttamente sul suolo. Questo può essere visto come una **prima possibilità di recupero** del fosforo in esso contenuto.

# Il contesto normativo italiano sul recupero dei fanghi

- ▶ Il **D.Lgs 75/2010** il quale riordina e revisiona la disciplina in materia di fertilizzanti e consente di produrre ammendante compostato e correttivi anche utilizzando fanghi di depurazione, purché il prodotto sia conforme ai limiti in esso riportati.
- **Trasformazione in correttivi:** il **correttivo gesso di defecazione**. Questo è ottenuto attraverso idrolisi basica della matrice biologica fatta reagire con Ossido di Calcio (CaO). Inizialmente viene aggiunto cloruro ferrico (FeCl<sub>3</sub>) e in seguito si immette **Acido Solforico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** per la precipitazione di solfato di calcio.

# Il contesto normativo italiano sul recupero dei fanghi

- ▶ Trasformazione in ammendante compostato con fango:  
presenta una serie di vincoli:
- il prodotto di qualità non prevede la presenza di fanghi da depurazione quindi il compost producibile con essi è percepito come di minore qualità.
- la percentuale di fanghi al suo interno non può superare un terzo del totale, pertanto, la produzione di questo ammendante presuppone una rilevante quantità di altro materiale ovvero la matrice dell'ammendante compostato verde e dell'ammendante compostato misto

# Il contesto normativo italiano sul recupero dei fanghi

- L'utilizzo agricolo dei fanghi, attualmente normato in Italia, costituisce la base di confronto per i processi di recupero del fosforo applicabili nelle sezioni dell'impianto.

<b>Processo</b>	<b>Prodotto recuperato</b>	<b>Caratteristiche richieste</b>	<b>Sezione dell'impianto</b>
<b>Spandimento diretto</b>	-	D.Lgs 99/92 e modifiche regionali specifiche	5 – fanghi disidratati
<b>Compostaggio</b>	Ammendante compostato con fango	D.Lgs 75/2010 per il prodotto finale end of waste	2.2-5 – fanghi biologici trattati o non trattati
<b>Idrolisi</b>	Correttivo bio-solfato	Punto 2.1 dell'allegato 3 del D.Lgs 75/2010	3.1-3.2-5 – fanghi digeriti/ ispessiti o fanghi disidratati

# Processi e tecnologie di recupero del fosforo

- Si può identificare un insieme di processi specifici per il recupero di prodotti fosfatici in funzione della sezione del impianto di depurazione scelta come fonte del recupero.

Linea acque		Linea Fanghi		Ceneri di fanghi mono-inceneriti	
Sezione	Processo	Sezione	Processo	Sezione	Processo
1	Precipitazione	3.1	Lisciviazione chimica a umido	4	Termo-chimico a base di cloruri (es: $MgCl_2$ )
1	Scambio ionico e adsorbimento	3.2	Ossidazione a umido		Termo-chimico a base di sali di sodio (es: $Na_2SO_4$ )
2.1; 2.2	Precipitazione/ Cristallizzazione				
2.2	Cristallizzazione	3.3	Gassificazione con fusione dei fanghi		Estrazione chimica per lisciviazione acida delle ceneri

# Processi e tecnologie di recupero di P dalla linea acque

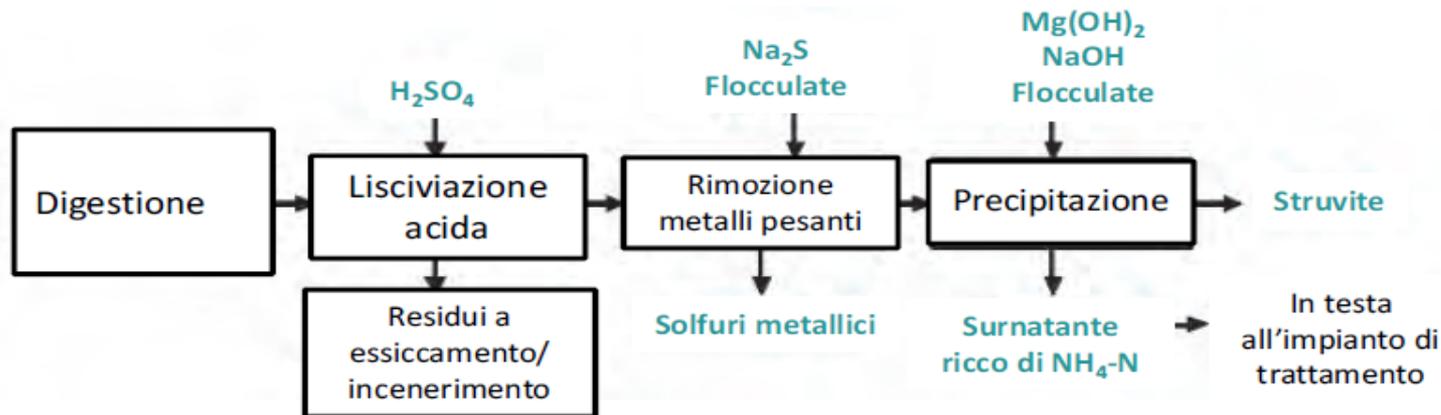
- ▶ **Precipitazione e cristallizzazione (P/C)**: Il fosforo recuperato può essere nella forma di **struvite**. Il processo di formazione è favorito da condizioni alcaline (pH 8.5-9.5) e da un dosaggio di sali magnesiaci, come il cloruro di magnesio ( $MgCl_2$ ) e l'idrossido di magnesio ( $Mg(OH)_2$ ). Il processo è applicabile in **impianti con rimozione biologica** nei quali il fosforo da recuperare non è legato con altri metalli. In questi impianti spesso la struvite cristallizza spontaneamente formando incrostazioni con **ostruzione delle tubazioni** a valle dei processi di digestione anaerobica.

# Processi e tecnologie di recupero di P dalla linea acque

- ▶ **Scambio ionico e adsorbimento:** È stato sperimentato l'utilizzo di materiale adsorbente composto da **perle ceramiche** sviluppato con alta specificità per il fosforo, che hanno la capacità di trattenerlo sulla loro superficie e lasciar passare le altre sostanze.
- ▶ Ulteriori tipologie di materiale adsorbente sono l'aggregato cementizio idrato con acqua e il silicato idrato di calcio chiamato **C.S.H.** (Calcium Silicate Hydrated).

# Processi e tecnologie di recupero di P dalla linea fanghi

- ▶ **Lisciviazione chimica a umido**: conosciuta come estrazione solido-liquido:
- ▶ Il processo Gifhorn:

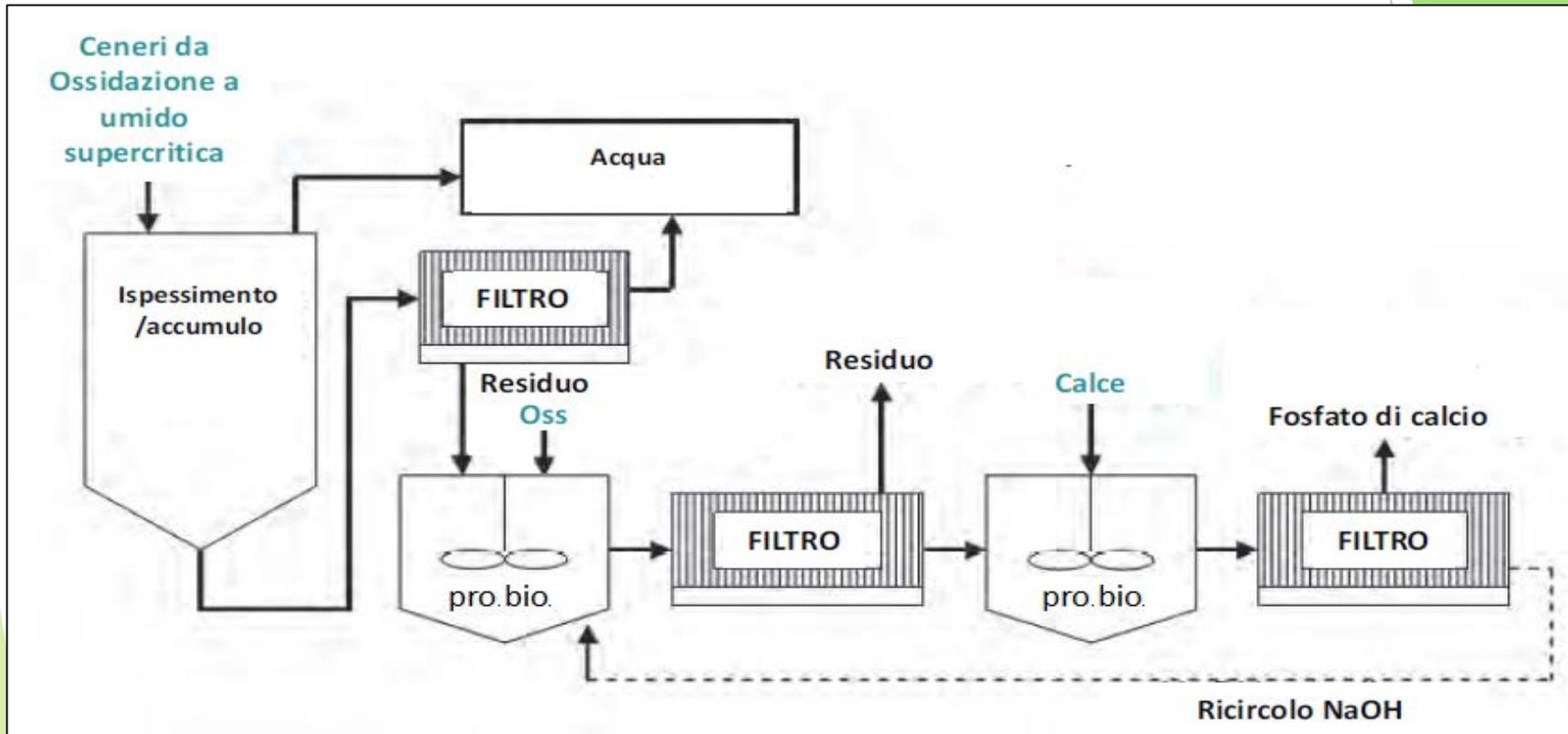


- ▶ Il processo Stuttgart: analogo al processo Gifhorn

# Processi e tecnologie di recupero di P dalla linea fanghi

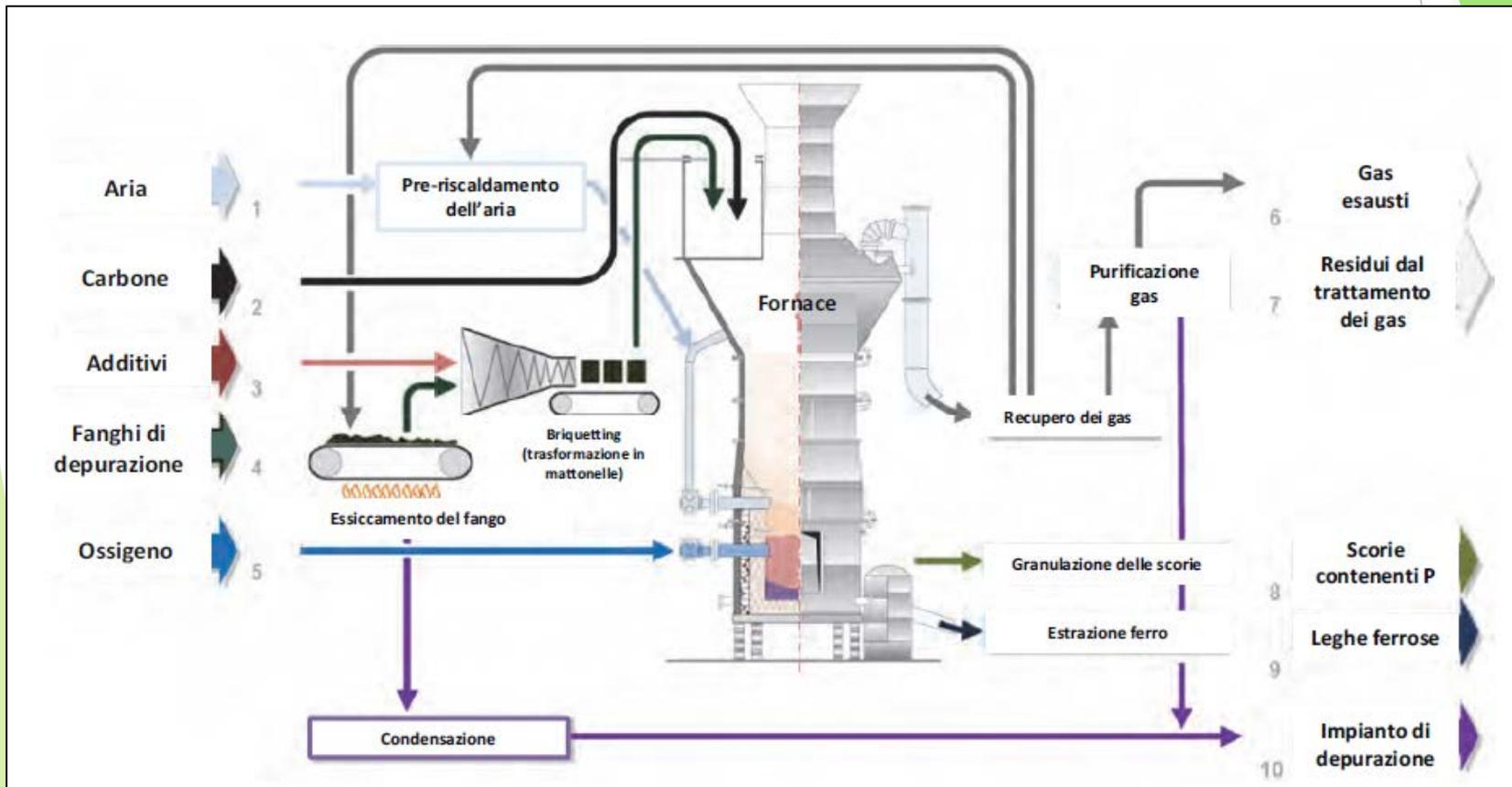
- ▶ **Carbonizzazione idro-termica dei fanghi:** costituita da un processo di **deidratazione** ( $T=180^{\circ}\text{C}-250^{\circ}\text{C}$  e  $P=10-20\text{bar}$ ). Contestualmente a tale processo può essere effettuata una **lisciviazione acida**. A valle del reattore di carbonizzazione è presente una fase di separazione mediante **filtrazione a pressione** che concentra un flusso di fango disidratato fino al 65% di sostanza secca e lascia nel filtrato una concentrazione di P nel range 8-10 g/l. Infine si effettua un processo di precipitazione mediante aggiunta di CSH che permette di recuperare **fosfato di calcio idrato**.

# Processi e tecnologie di recupero di P dalla linea fanghi



# Processi e tecnologie di recupero di P dalla linea fanghi

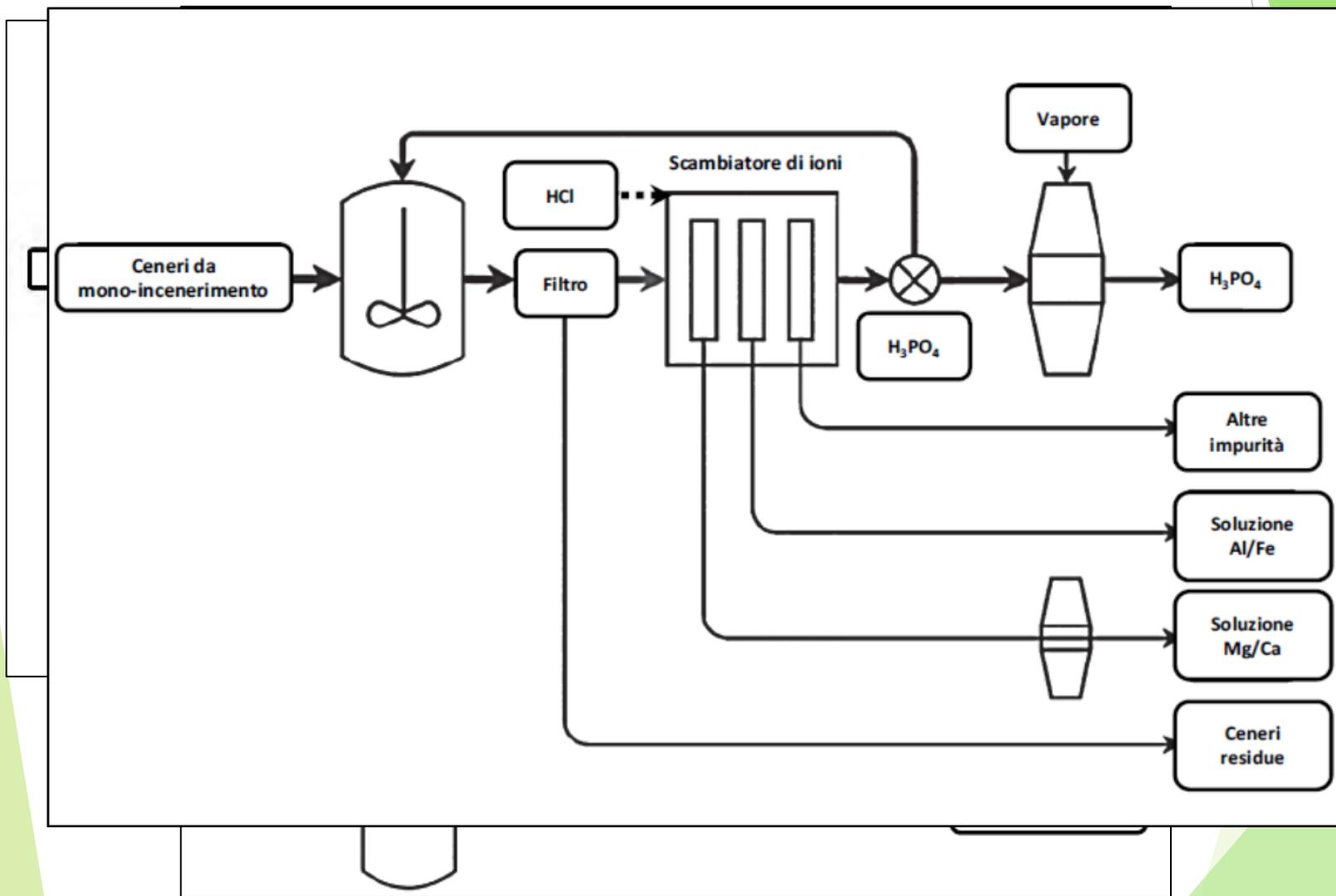
► **Gassificazione con fusione dei fanghi**: che avviene all'interno del **processo Mephrec**. In questa fase i fanghi disidratati sono inviati ai processi sinteticamente rappresentati:



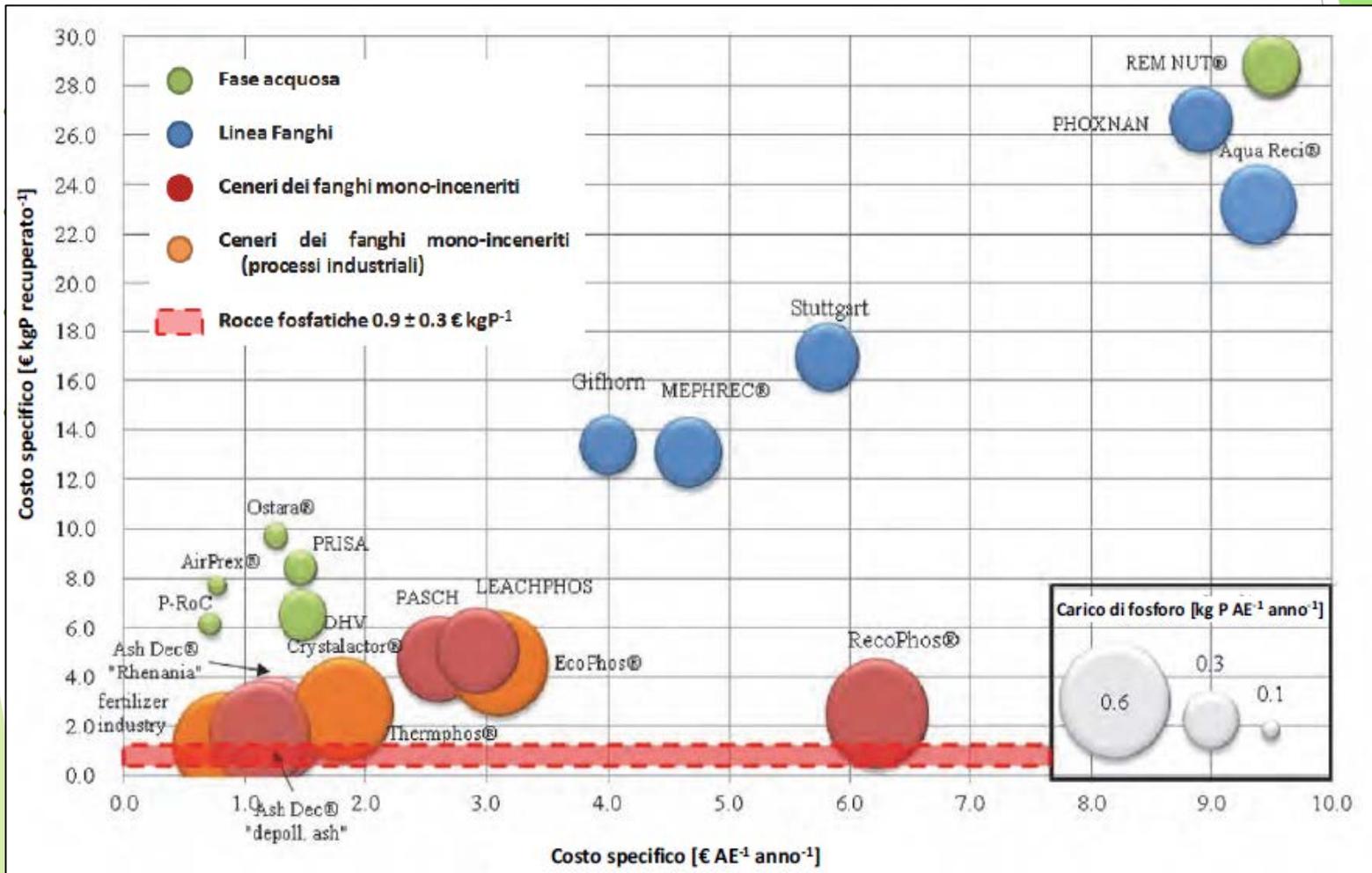
# Processi e tecnologie di recupero di P dalle ceneri

- ▶ **Processo termo-chimico:** costituito da un trattamento termico che avviene tra gli 850 e i 1000°C in modo da rimuovere i metalli pesanti. In questo forno le ceneri dei fanghi reagiscono con solfato di sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) o cloruro di magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ) lasciando evaporare i metalli e precipitare le ceneri contenenti fosfati con un quantitativo di  $\text{P}_2\text{O}_5$  medio del 20%, questo processo si chiama **AshDec**.

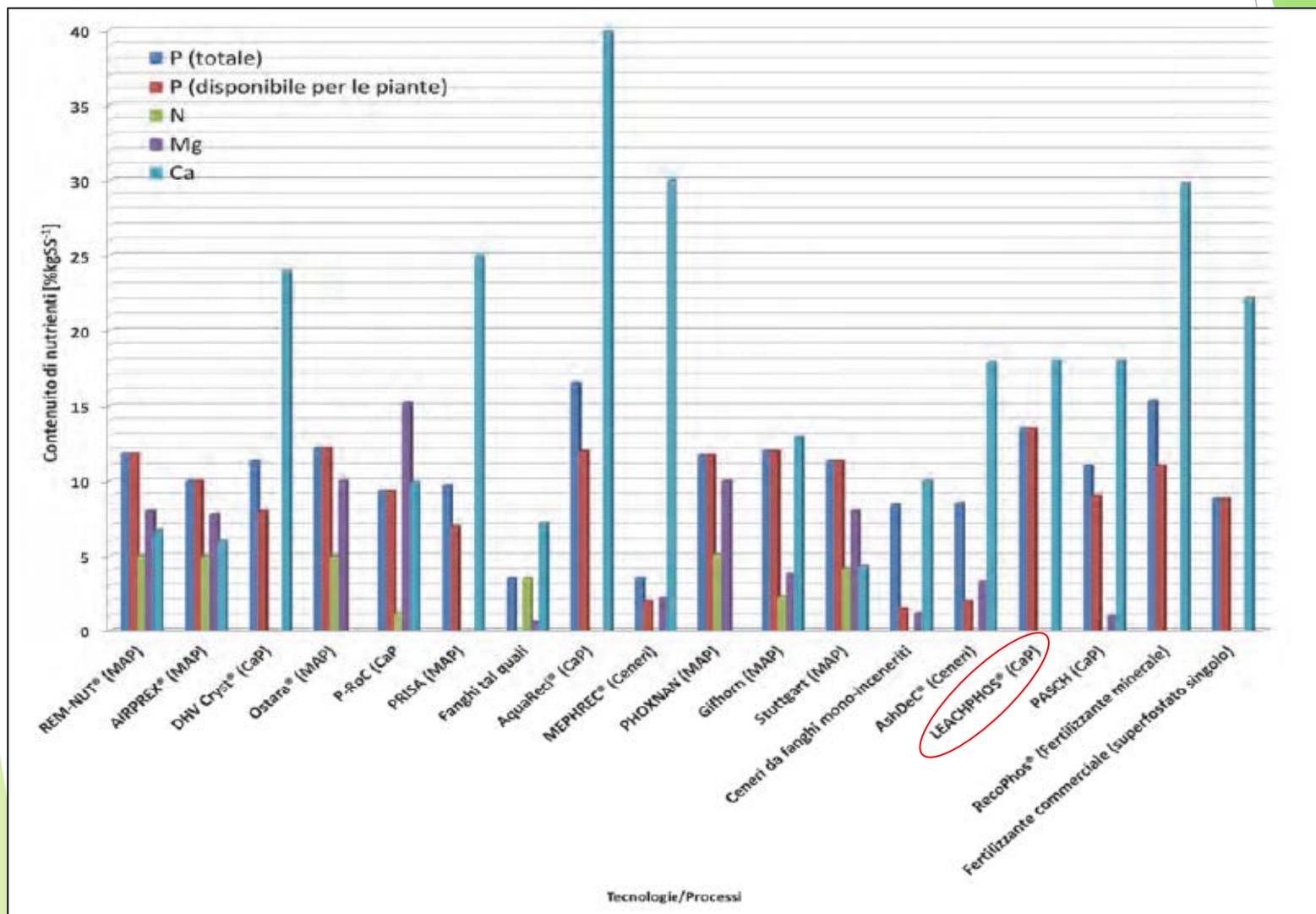
# Processi e tecnologie di recupero di P dalle ceneri



# Confronto tra i vari processi



# Potere fertilizzante dei prodotti recuperati



**GRAZIE PER  
L'ATTENZIONE!**