

Fanghi di depurazione di nuova generazione: requisiti per elevate prestazioni agronomiche, sicurezza e riduzione degli impatti ambientali

Fabrizio Adani

GRUPPO RICICLA 
DiSAA

Fabrizio Adani, Università degli Studi di Milano - DiSAA

Agriculture and Environment Lab ; Biomass and Agroenergy Lab. ; of Bioeconomy and Green Chemistry Lab.

Via Celoria, 2 20133 Milano, Tel. 02-50316546, Fax. 02-50316521

Web site: <http://users.unimi.it/ricicla/>

Adjunct Professor, National Center for International Research of BioEnergy, Science and Technology (iBEST), China

Agricultural University (China)



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Le principali criticità individuate per gli agricoltori

- Forte aumento dei prezzi dei fertilizzanti.
- Rischio di riduzione dell'utilizzo dei concimi con conseguente:
 - diminuzione delle rese;
 - riduzione della qualità delle produzioni;
 - impoverimento della fertilità dei suoli.

Per l'industria

- Il gas naturale rappresenta circa **70-80% del costo di produzione dei fertilizzanti azotati.**
- Crescente rischio di:
 - chiusura degli impianti;
 - perdita di competitività;
 - delocalizzazione produttiva.



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Fertiliser Action Plan

- Il Fertiliser Action Plan adottato dalla Commissione il 19 maggio 2026 punta a **ridurre la dipendenza europea dalle importazioni, accelerare l'impiego di fertilizzanti circolari e recuperare azoto e fosforo (anche dai fanghi di depurazione)**. Prevede inoltre investimenti nelle infrastrutture per le acque reflue e nella valorizzazione dei fanghi.
- Recuperare singoli nutrienti non è sempre automaticamente l'opzione più sostenibile; occorre confrontarla con l'impiego diretto, sicuro e territoriale della matrice, considerando carbonio, energia, reagenti, residui e costi.



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



A mio avviso c'è uno **sbilanciamento concettuale**: il documento parla molto di **fertilizzanti** (come prodotti industriali e come mercato), ma molto meno di **gestione agronomica dei nutrienti** e del loro riciclo locale.

In altre parole, la Commissione ragiona soprattutto in termini di "**sostituire il fertilizzante minerale con un altro fertilizzante**", mentre dedica meno attenzione all'idea di **chiudere i cicli dei nutrienti sul territorio**, riducendo la necessità stessa di trasformare tutto in un prodotto fertilizzante commerciale.



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Voce di costo (€/t SS)

Uso diretto in agricoltura

Recupero N + P

Trattamento preliminare
(disidratazione/stabilizzazione)

60

60

Recupero N (stripping)

—

80

Recupero P (struvite)

—

100

Reagenti

—

60

Energia aggiuntiva

—

35

Gestione residuo dopo il recupero

—

60

Trasporto

60

20

Distribuzione

25

15

Costo totale

145 €/t SS

430 €/t SS

Pareggio ca. 450 km



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



**Sostenibilità
in Lombardia**



**Regione
Lombardia**



RECUPERO NUTRIENTI PER PRODURRE FERTILIZZANTI

Riferimento

Costo per kg di N

Significato del dato

Urea commerciale, 46% N

1,35–1,37 €/kg N

Prezzo di acquisto: 620–630 €/t,
Torino, 24 settembre 2026, IVA
esclusa

Recupero da digestato: stripping
sotto vuoto e produzione di solfato
ammonico

Circa 2,3–2,5 €/kg N recuperato

Costo calcolato dai dati industriali
dello studio, comprendente
investimento e gestione nel
perimetro analizzato

Recupero da digestato: stripping e
assorbimento acido

Circa 2,0–2,9 €/kg N

Costo prima del ricavo di vendita,
variabile con scala e disponibilità di
calore residuo



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Output	Uso diretto	Recupero nutrienti
Azoto	✓	✓
Fosforo	✓	✓
Potassio	✓	in gran parte nel residuo
Zolfo	✓	✓ (come solfato ammonico)
Calcio e magnesio	✓	parzialmente
Micronutrienti	✓	in gran parte nel residuo
Carbonio organico	✓	X
Sostanza organica	✓	X
Fertilizzante standardizzato	X	✓
Riduzione contaminanti nel prodotto	X	✓



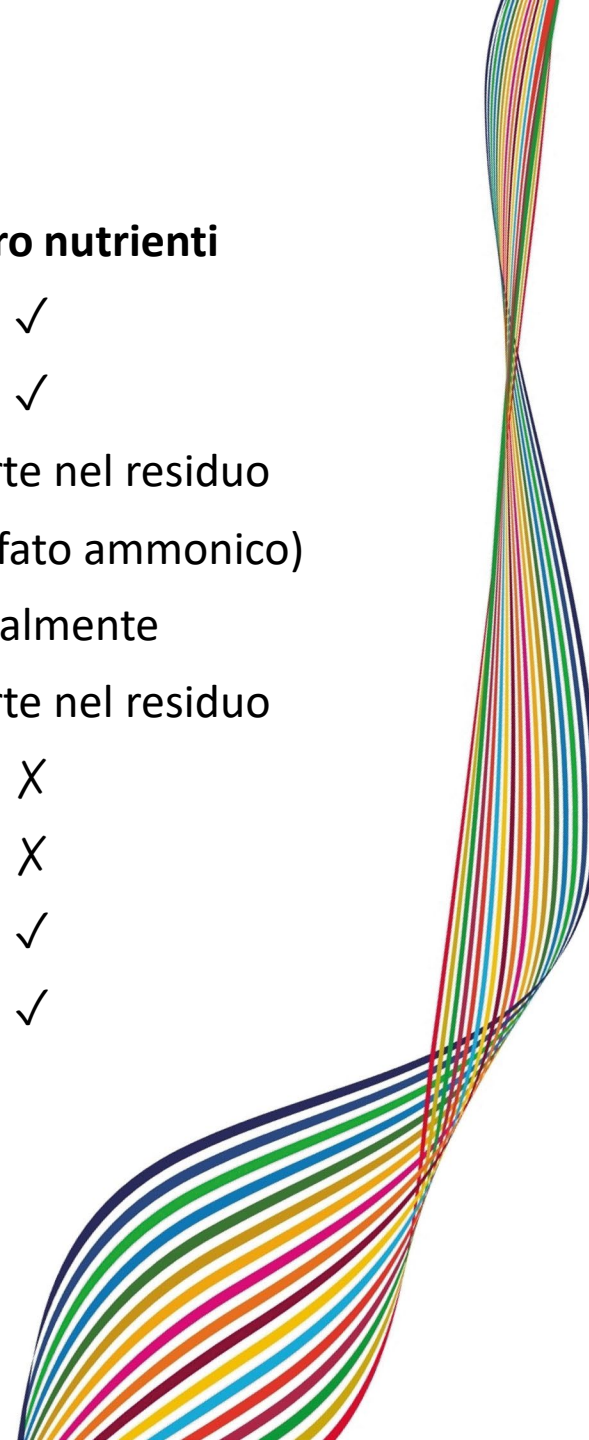
EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Surplus di azoto in Regione Lombardia

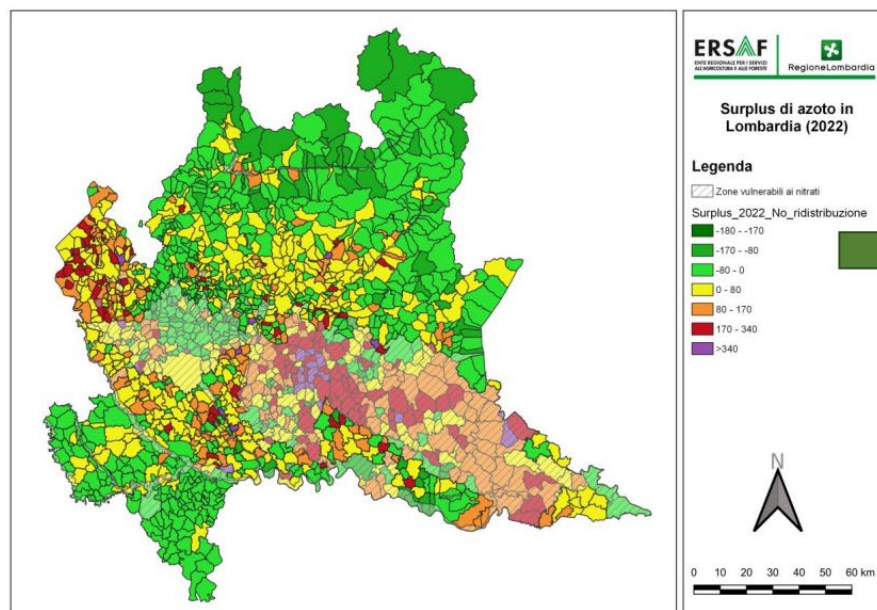
Anno di riferimento: 2022

$$\text{SurplusN} = N_{FC} - N_{ea} - N_{fm} - N_{fanghi} - N_{biogas}$$

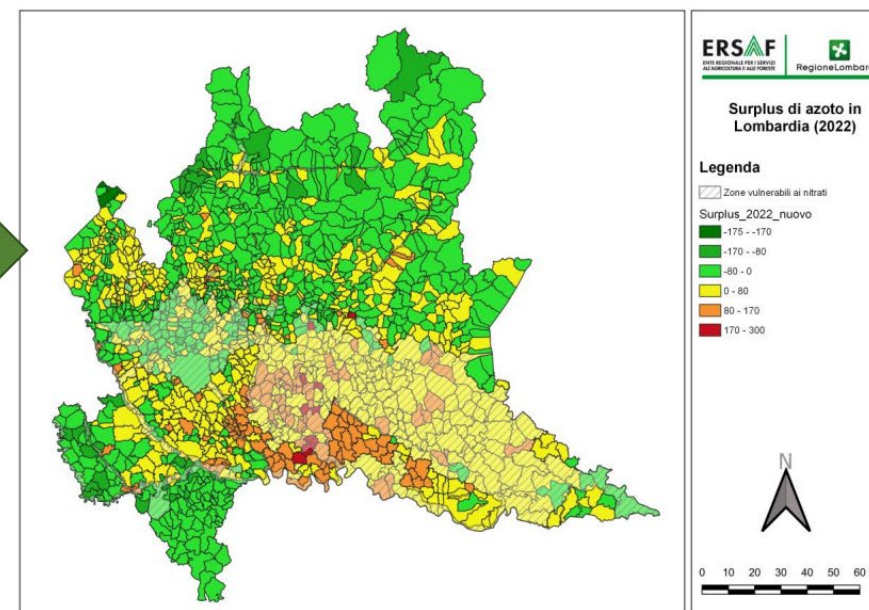
ton N	Surplus	Nasp	Nea	Nfert	Nfanghi	Nbio
nuovo	18.179	190.321	102.972	84.398	3.903	17.228
vecchio	50.228	172.121	120.968	89.261	3.903	8.217
differenze	-32.050	18.201	-17.997	-4.863	0	9.011

Fertilizzanti chimici

Vecchio metodo



Nuovo metodo



N_{FC} = azoto richiesto dalle colture
 N_{ea} = azoto da effluenti di allevamento
 N_{fm} = azoto da fertilizzanti minerali e organici
 N_{fanghi} = azoto da fanghi di depurazione
 N_{biogas} = azoto dalla componente vegetale immessa negli impianti a biogas

adattata da: Silvia R. Motta
Gardone Riviera, 10 ottobre 2024

Quindi ? : Favorire la via più breve che restituisce efficacemente nutrienti al sistema agricolo, quando garantisce:

- sicurezza della matrice e tutela del suolo nel tempo;
- sostituzione effettiva dei concimi acquistati;
- dosi e tempi coerenti con suolo, coltura e rotazione;
- un vantaggio economico e ambientale rispetto alle alternative.



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Fango di nuova generazione

- Un fango “di nuova generazione” non è semplicemente un fango conforme alla legge: è una matrice progettata, caratterizzata e utilizzata per fornire prestazioni agronomiche verificabili, con rischi e impatti misurabili e controllati.



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia

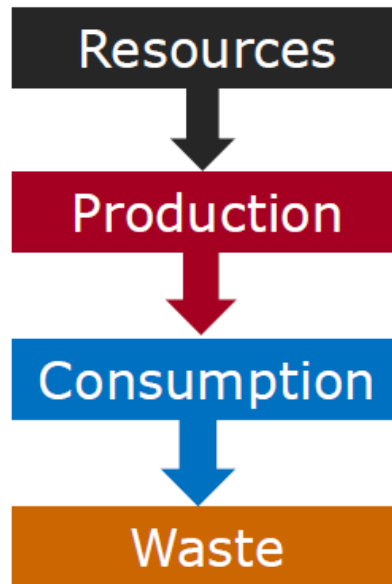


Regione
Lombardia



Circular economy = the way to go

Linear economy



CIRCULAR ECONOMY
saving resources, creating jobs
Green Week, Brussels > 3-5 June 2014

Obiettivo !!!

Chain economy



Circular economy



Noi siamo qui !!!!!



Quale la differenza ?

Approccio tradizionale

Gestire un residuo

Verificare limiti normativi

Quantificare N e P totali

Controllare pochi contaminanti

Considerare la singola applicazione

Ragionare per tonnellata smaltita

Un prodotto standard per ogni suolo

Fango di nuova generazione

Progettare una risorsa

Dimostrare sicurezza e prestazioni

Misurare nutrienti realmente disponibili

Valutare rischio chimico, biologico ed emergente

Valutare effetti cumulativi nel suolo

Ragionare per unità di fertilizzante sostituito

Prodotti e dosi coerenti con suolo e coltura



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Prestazione agronomica dimostrata

- Non basta conoscere il contenuto totale di azoto e fosforo. Bisogna dimostrare:
- quota di N immediatamente disponibile e quota mineralizzabile;
- sincronizzazione tra rilascio dell'azoto e fabbisogno della coltura;
- disponibilità reale del fosforo;
- valore del carbonio organico;
- effetti su fertilità, struttura, ritenzione idrica e attività biologica;
- capacità di sostituire fertilizzanti minerali.



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Conoscere è importante !!!!

Spesso siamo ancora ancorati a vecchi dogmi scientifici

.....la scienza corre e occorre aggiornare le conoscenze



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Tema

Sostanza organica

Microbioma del suolo

Ciclo dell'azoto

Emissioni e perdite

Fosforo

Trattamento e gestione

Domande da affrontare

Quali trasformazioni e meccanismi di persistenza? Quali effetti su struttura, aggregazione e ritenzione idrica?

Il fango modifica le comunità residenti o introduce microrganismi capaci di insediarsi? **“Trapianto di microbioma”**: ipotesi da verificare, distinguendo inoculo ed effetto nutritivo

Come interagiscono mineralizzazione, immobilizzazione, nitrificazione e denitrificazione? Quale ruolo hanno carbonio disponibile, ossigeno e umidità?

Quando l'N viene assorbito, trattenuto, lisciviato o perso come NH_3 , N_2O e N_2 ? Come cambiano anche le emissioni di CO_2 e CH_4 ?

Quali forme sono disponibili, immobilizzate o mobilizzabili? Distinguere accumulo, assorbimento e perdite per lisciviazione o ruscellamento

Quali caratteristiche ottenere e come scegliere dose, momento e modalità di applicazione? Quali effetti dopo apporti ripetuti?



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Progettazione del trattamento in funzione dell'uso finale:

- digestione anaerobica → stabilizzazione, energia e trasformazione dell'azoto;
 - compostaggio → stabilità, igienizzazione e qualità ammendante;
 - essiccamento o trattamento termico → sicurezza e concentrazione, ma possibile perdita di carbonio e azoto;
 - recupero di N e P → produzione di fertilizzanti standardizzati;
 - separazione delle frazioni → prodotti con funzioni agronomiche differenti;
 - trattamenti avanzati → rimozione o distruzione selettiva dei contaminanti.
 - La domanda da porre non è quindi «qual è la tecnologia migliore?», ma:
- **Quale combinazione di trattamenti produce la funzione fertilizzante richiesta con il minore impatto complessivo?**



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Riduzione degli impatti ambientali verificata

- emissioni di NH_3 e N_2O ;
- odori
- lisciviazione dei nitrati;
- perdite di fosforo;
- variazione del carbonio organico del suolo;
- energia e reagenti impiegati nei trattamenti;
- fertilizzanti minerali evitati;
- trasporti;
- destino degli scarti prodotti dal recupero dei nutrienti.



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Tracciabilità e idoneità territoriale

- Il fango di nuova generazione dovrebbe avere una sorta di **passaporto agronomico-ambientale digitale**, contenente:
- origine e trattamento;
- composizione e variabilità;
- nutrienti disponibili;
- stabilità della sostanza organica;
- contaminanti e indicatori microbiologici;
- colture e suoli compatibili;
- dose agronomica;
- impronta carbonica e nutrienti minerali sostituiti;
- monitoraggio degli effetti cumulativi.



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Il futuro dei fanghi in agricoltura non dipenderà dalla possibilità di dimostrare che possono essere utilizzati, ma dalla capacità di dimostrare che il loro utilizzo produce un beneficio agronomico e ambientale netto, misurabile e superiore alle alternative di utilizzo.



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia





Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

es. uso di fanghi vs. incenerimento

Measuring the environmental impacts of sewage sludge use in agriculture in comparison with the incineration alternative

Giuliana D'Imporzano^{*}, Fabrizio Adani

Gruppo Ricicla labs., Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali - Produzione, Territorio, Agroenergia (DiSAA), Università degli studi di Milano, Via Celoria 2, 20133, Italy



ACS
Sustainable
Chemistry & Engineering

pubs.acs.org/journal/ascecg

Research Article

Environmental Performance in the Production and Use of Recovered Fertilizers from Organic Wastes Treated by Anaerobic Digestion vs Synthetic Mineral Fertilizers

Axel Herrera, Giuliana D'Imporzano,^{*} Massimo Zilio, Ambrogio Pigoli, Bruno Rizzi, Erik Meers, Oscar Schouman, Micol Schepis, Federica Barone, Andrea Giordano, and Fabrizio Adani^{*}Cite This: *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2022, 10, 986–997

Read Online



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo per lo Sviluppo Sostenibile

Sostenibilità
in LombardiaRegione
Lombardia

Quindi ?

Fanghi di nuova generazione: dalla qualità della matrice alla fertilizzazione circolare di precisione.

Integrare progettazione dei trattamenti, conoscenze agronomiche e **tecnologie emergenti per valorizzare le proprietà fertilizzanti** dei fanghi in funzione del suolo e della coltura, aumentare la sostituzione dei concimi minerali e ridurre costi e impatti ambientali.



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Che cosa rende un fango “di nuova generazione”?

Qualità progettata e prestazioni verificate nel sistema suolo-pianta

1. EFFICACIA AGRONOMICA

N e P disponibili • Equilibrio dei nutrienti
Rilascio coerente con i fabbisogni



2. SICUREZZA

Qualità chimica e microbiologica
Controllo dei contaminanti e degli apporti cumulativi



FANGO DI NUOVA GENERAZIONE

4. TRATTAMENTO FINALIZZATO

Stabilità e caratteristiche adatte all'impiego
Processi scelti in funzione del risultato



3. IMPATTI MISURATI

Emissioni • Perdite di nutrienti • Carbonio
Beneficio ambientale da verificare



5. TRACCIABILITÀ E MONITORAGGIO

Passaporto del lotto • Storia del terreno
Risultati verificati nel tempo



La conformità è il requisito di accesso. La qualità si dimostra con i risultati.

Proposta scientifica: “nuova generazione” descrive un approccio, non una categoria normativa.

Progettare il fango a partire dal campo

Redesign della filiera: esigenze agronomiche, trattamenti e valore per l'agricoltore

IL PUNTO DI PARTENZA: SUOLO E COLTURA



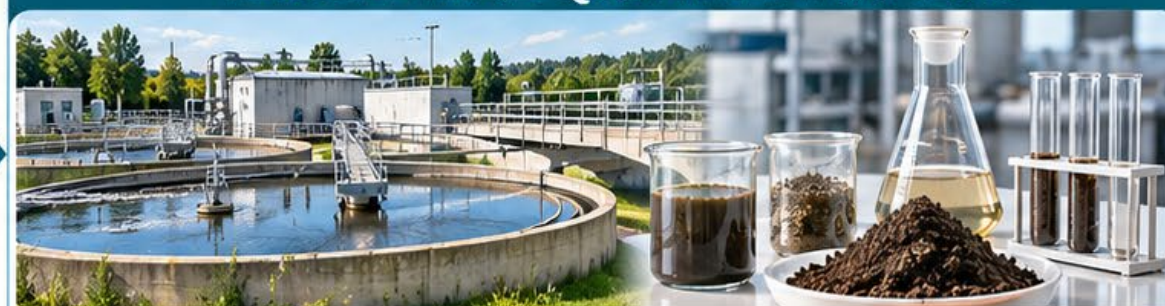
Fabbisogni

- Dotazione del suolo
- Rotazione



Quali caratteristiche servono?

PROGETTARE QUALITÀ E IMPIEGO



Selezionare matrici e trattamenti

Equilibrio dei nutrienti • Stabilità • Tempi di rilascio

Dalla domanda del campo alla preparazione della matrice

FILIERA CORTA, QUANDO CONVIENE



Valorizzare nutrienti e sostanza organica



Contenere trasporti e passaggi



Confrontare costi, impatti e alternative



Meno fertilizzanti acquistati



Resa e fertilità mantenute



Sicurezza e impatti verificati

Obiettivo: massima sostituzione utile dei fertilizzanti di sintesi

Integrazione minerale fino a zero solo dove agronomicamente sostenibile.

Schema concettuale: risultati da dimostrare nel contesto locale.

Fanghi di nuova generazione

Agricoltura di precisione e intelligenza artificiale

1. CONOSCERE IL FANGO

Nutrienti • Stabilità • Rilascio nel tempo



2. INTEGRARE I DATI

Suolo • Coltura • Meteo • Apporti precedenti



AI + modelli agronomici

Prevedere il rilascio dei nutrienti
Supportare le decisioni

3. APPLICARE CON PRECISIONE

Dove • Quanto • Quando



Dosi differenziate per zona

■ Zona A – dose bassa

■ Zona B – dose media

■ Zona C – dose alta

4. MISURARE I RISULTATI

Resa • Nutrienti nel suolo • Efficienza



I risultati del campo
orientano trattamenti
e impieghi successivi



Obiettivo: meno fertilizzanti acquistati, fertilità e sicurezza

Schema concettuale: previsioni da validare in campo

Agricoltura di precisione

Aspetto	Applicazione ai fanghi	Vantaggio atteso
Definizione	Gestire l'impiego del fango considerando la variabilità di suolo, coltura e matrice nello spazio e nel tempo	Interventi coerenti con le esigenze agronomiche
Quale fango	Caratterizzare ogni lotto: nutrienti, disponibilità, stabilità e qualità	Selezionare la matrice adatta all'impiego
Dove	Mappare dotazione di nutrienti, caratteristiche del terreno e zone di esclusione	Destinare il fango dove può produrre beneficio
Quanto	Definire dosi per zona, considerando fabbisogni e apporti precedenti	Evitare eccessi e carenze; ridurre le integrazioni minerali
Quando	Coordinare applicazione, rilascio dei nutrienti, ciclo colturale e condizioni meteorologiche	Favorire l'assorbimento e contenere le perdite
Come	Utilizzare mezzi calibrati, distribuzione a dose variabile e modalità di incorporazione appropriate	Migliorare l'accuratezza e contenere gli impatti
Verifica	Registrare gli apporti e misurare risposta colturale ed evoluzione del suolo	Quantificare risultati e migliorare le prescrizioni successive
Supporto dell'AI	Integrare dati e modelli agronomici validati	Migliorare le previsioni e confrontare alternative di gestione



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Intelligenza artificiale

Funzione

Contributo concreto dell'AI

Condizione necessaria

Prevedere il rilascio di N

Collegare caratteristiche del fango, trattamento, suolo, temperatura e umidità alla disponibilità nel tempo

Dati di incubazione e di campo rappresentativi

Stimare la risposta della coltura

Prevedere resa e assorbimento per diverse combinazioni di lotto, dose e terreno

Prove con dosi differenti e controlli

Supportare la scelta del trattamento

Individuare relazioni tra condizioni di processo e caratteristiche agronomiche ottenute

Dati tracciabili di impianto e analisi dei lotti

Riconoscere anomalie

Segnalare lotti o risposte del campo diversi da quelli attesi

Una base storica affidabile

Aggiornare le previsioni

Utilizzare i risultati delle applicazioni precedenti per migliorare le stime

Monitoraggio continuativo e verifica indipendente



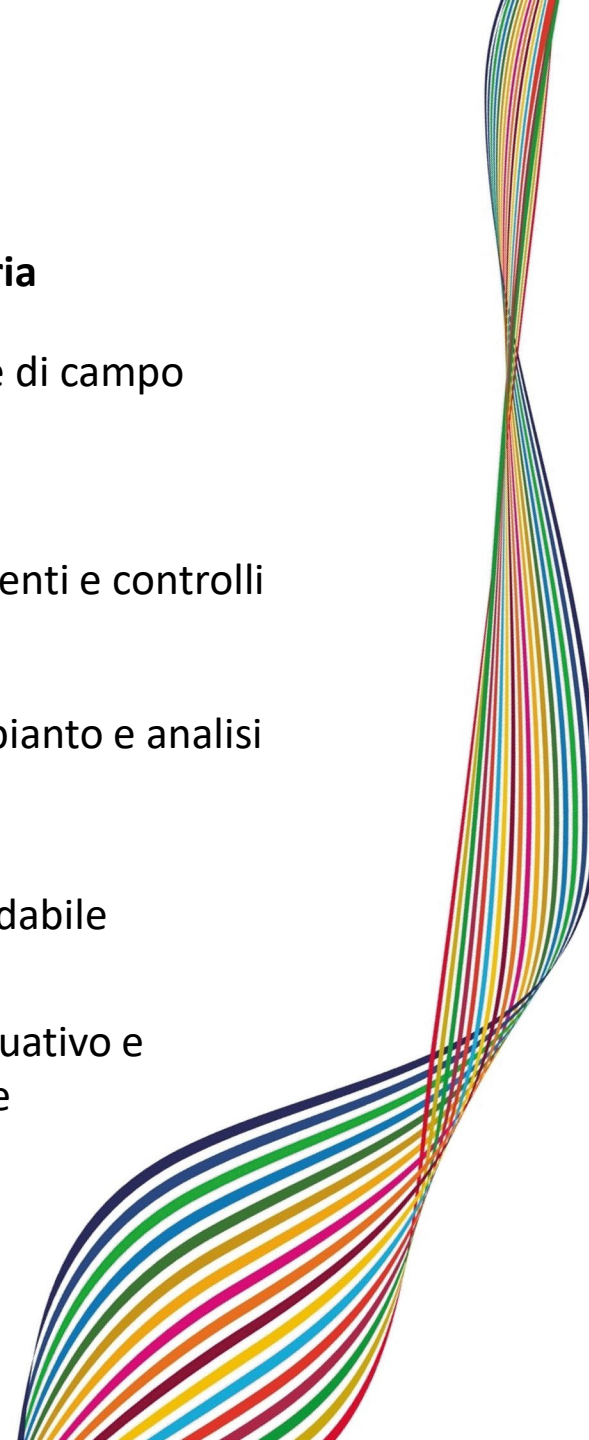
EFAR aderisce al Protocollo Lombardo per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità in Lombardia



Regione Lombardia



“AI: integrare i dati e migliorare la previsione della disponibilità dei nutrienti e della risposta colturale, con validazione in campo”.

“L’AI agronomica richiede dati sperimentali robusti, modelli scientificamente verificati e validazione indipendente in pieno campo.”



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



Fanghi di nuova generazione: un sistema integrato

QUALITÀ E SICUREZZA

Caratterizzazione e rischio



AGRICOLTURA DI PRECISIONE

Suolo e distribuzione di precisione



TRATTAMENTI MIRATI

Trattamento finalizzato all'impiego



FANGO DI NUOVA GENERAZIONE

Qualità della matrice + impiego adatto a suolo e coltura



AI + modelli agronomici: sviluppo da validare

Integrare i dati • Prevedere il rilascio • Migliorare le scelte

Obiettivo: meno concimi acquistati, fertilità e sicurezza

Schema concettuale: integrazione da validare in campo.

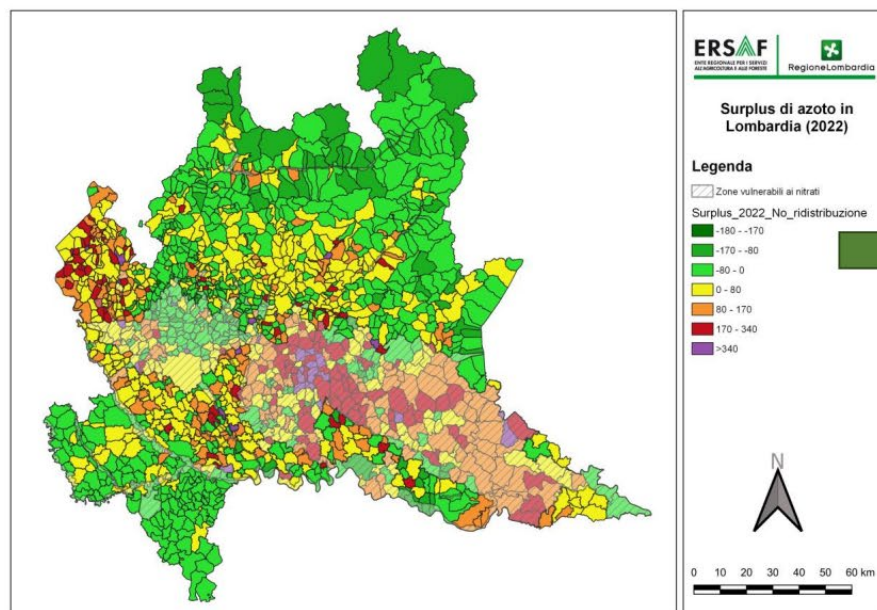
Surplus di azoto in Regione Lombardia

Anno di riferimento: 2022

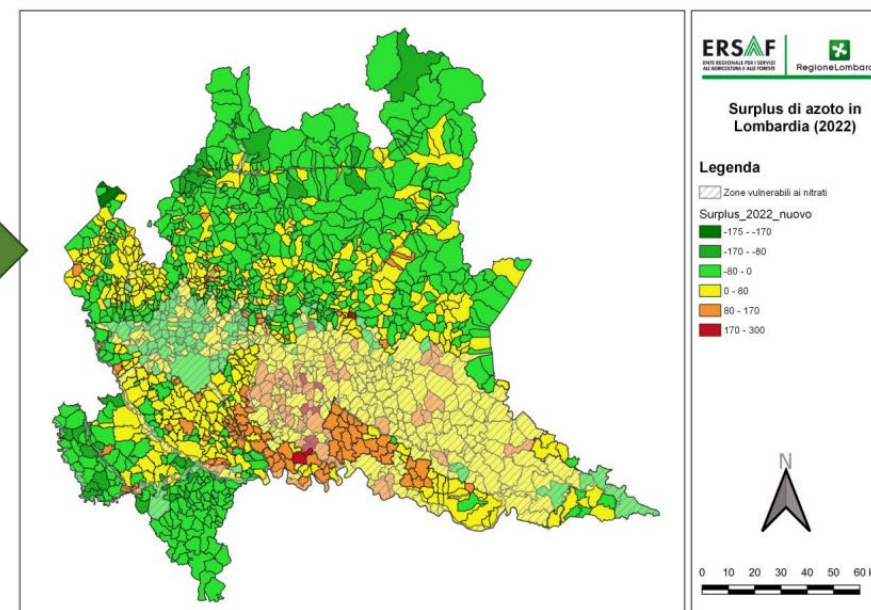
$$\text{SurplusN} = N_{FC} - N_{ea} - \cancel{N_{fm}} - N_{fanghi} - N_{biogas}$$

ton N	Surplus	Nasp	Nea	~~N_{fm}~~	Nfanghi	Nbio
nuovo	18.179	190.321	102.972	~~87.308~~	3.903	17.228
vecchio	50.228	172.121	120.968	~~89.263~~	3.903	8.217
differenze	-32.050	18.201	-17.997	~~-4.863~~	0	9.011

Vecchio metodo



Nuovo metodo



N_{FC} = azoto richiesto dalle colture
 N_{ea} = azoto da effluenti di allevamento
 N_{fm} = azoto da fertilizzanti minerali e organici
 N_{fanghi} = azoto da fanghi di depurazione
 N_{biogas} = azoto dalla componente vegetale immessa negli impianti a biogas

adattata da: Silvia R. Motta
 Gardone Riviera, 10 ottobre 2024

«Fango di precisione»

*Qualità progettata, impiego mirato,
prestazioni verificate.*



EFAR aderisce al Protocollo Lombardo
per lo Sviluppo Sostenibile



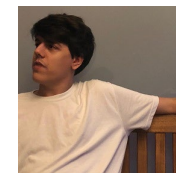
Sostenibilità
in Lombardia



Regione
Lombardia



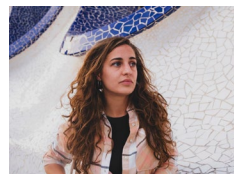
Fabrizio Adani
Full Professor



Filippo Donelli
*Biotechnologist for
the Bioeconomy*



Elisa Clagnan
Molecular biologist



Maria Francesca Polli
Plant Biotechnologist



Matteo Ceriani
Agronomist

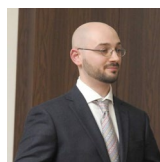


Marta Dell'Orto
Agronomist, Plant physiologist

GRUPPO RICICLA
web site: <http://users.unimi.it/ricicla/>



Michele Pesenti
Plant Physiologist



Federico Guglielmo Korner
Agronomist



Patrizia De Nisi
Agronomist; Chemist



Raveena Vilas Sajgule
Biotechnologist



Giuliana D'Imporzano
Agronomist, LCA expert

GRUPPO RICICLA
Università degli Studi di Milano - DiSAA
Lab. Agriculture and Environment
Lab. Biomass and Agroenergy
Lab. of Bioeconomy and Green Chemistry
*Via Celoria, 2 20133 Milan, Italy Tel. +39
02-50316545*
<http://site.unimi.it/ricicla/>