

Valorizzazione dei reflui zootecnici a sostituzione della nutrizione minerale

Mais e sfide per la sostenibilità: mercati, micotossine e nutrizione azotata

Messaggio chiave: sostituzione possibile, ma contano logistica, finestre operative ed emissioni

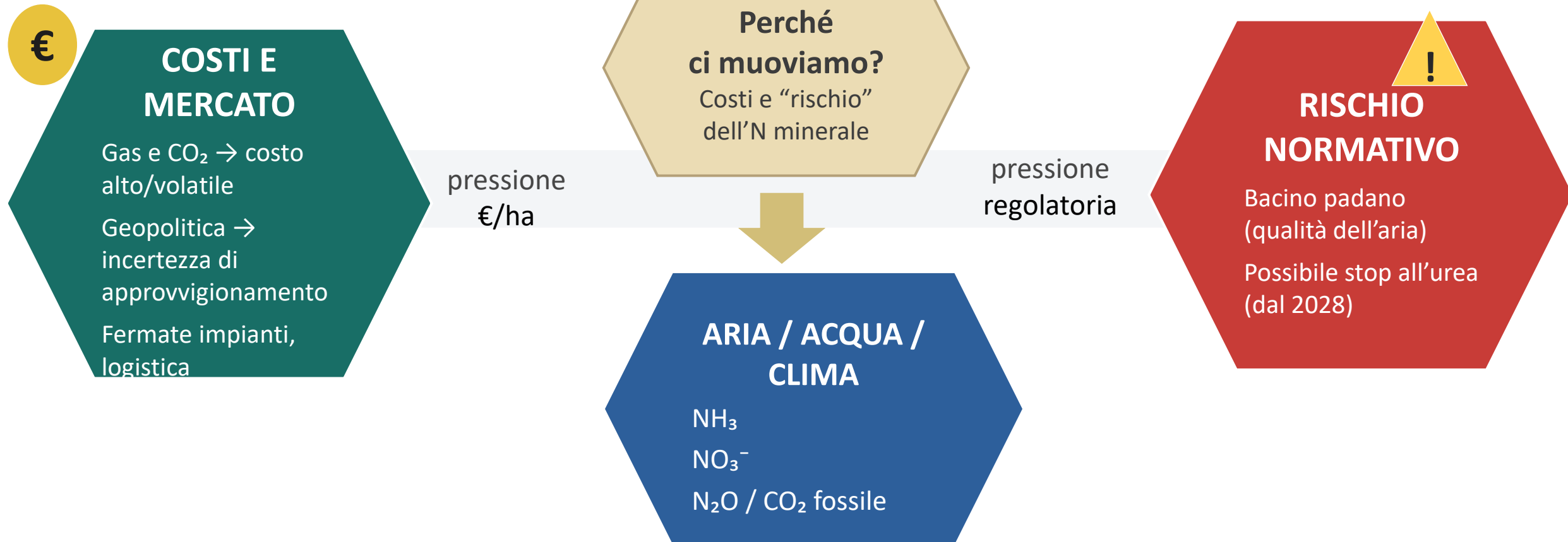
Marco Acutis, Unimi (retired)

Perché oggi: sostituzione dell'N minerale e vincoli

- Pressione su costi e volatilità del prezzo dei concimi minerali
- Piano nazionale di miglioramento della qualità dell'aria
- Vincoli ambientali: NH_3 (aria), NO_3^- (acqua- lisciviazione), N_2O (clima)
- Reflui: riciclo di N(e anche P-K) e valorizzazione territoriale
- Ma: volumi elevati, variabilità e logistica condizionano la riuscita

Perché sostituire almeno parte dell'N minerale: fattori chiave

- **L'azoto c'è:** la differenza la fa l'efficienza d'uso (N disponibile al momento giusto)
- **Le perdite** (soprattutto NH_3 nelle prime ore) possono annullare il vantaggio
- La sostituzione "1:1" richiede cantieri, accesso in campo e tecniche a bassa emissione



Liquame e digestato: cosa cambia

Liquame

- Variabilità elevata (diluizione, stoccaggio, dieta)
- Quota ammoniacale spesso alta → rischio NH_3 se superficiale
- Vincoli di trasporto (m^3/ha) e compattamento del terreno

Digestato (e frazioni)

- Maggiore “prontezza” dell'N (quota NH_4^+ spesso elevata)
- Separazione S/L: liquido più N- NH_4^+ ; solido più C e P
- Gestione più “da fertilizzante”, ma serve tecnica adeguata

| Caratteristica | Compost | Letame (solido) | Liquame (tal quale) | Liquame (palabile) | Liquame (liquido) | Digestato (tal quale) | Digestato (palabile) | Digestato (liquido) |
|---------------------------|--------------------|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| Stato fisico | Solido, stabile | Solido, fibroso | Liquido pompabile | Solido/semi-solido | Liquido scorrevole | Liquido/semi-liquido | Solido/semi-solido | Liquido scorrevole |
| Sostanza secca (%) | ~40–60 | ~20–35 | ~4–10 | ~20–30 | ~1–4 | ~3–10 | ~20–30 | ~1–4 |
| N totale | basso–medio | medio | medio | medio | basso–medio | medio | medio | basso–medio |
| TAN su N totale | molto bassa | bassa | alta | bassa–media | alta | alta (spesso elevata) | bassa–media | alta |
| Prontezza dell’N | lenta | lenta | rapida | lenta–media | rapida | rapida | lenta–media | molto rapida |
| So. Org. / ammenda | molto alto | alto | basso–medio | Medio-alto | basso | medio-basso | alto | basso |
| pH (tendenza) | neutro–subalcalino | ~neutro | neutro–subalcalino | neutro–subalcalino | neutro–subalcalino | spesso subalcalino | subalcalino | subalcalino |

| Caratteristica | Compost | Letame (solido) | Liquame (tal quale) | Liquame (palabile) | Liquame (liquido) | Digestato (tal quale) | Digestato (palabile) | Digestato (liquido) |
|---|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--|
| pH (tendenza) | neutro–subalcalino | ~neutro | neutro–subalcalino | neutro–subalcalino | neutro–subalcalino | spesso subalcalino | subalcalino | subalcalino |
| Rischio NH₃ se superficiale | basso | medio | alto | medio | alto | alto | medio | alto |
| P (tendenza) | medio | medio–alto | medio | alto (si concentra) | basso | medio | alto (si concentra) | basso |
| K (tendenza) | medio | medio | alto | medio | alto | alto | medio | alto |
| Uso agronomico tipico | Ammendante/fondo, miglioramento suolo | Fondo, struttura, rilascio graduale | Fondo + (con tecnica) copertura | Fondo, copertura iniezione fertirrigaz. | Copertura mirata (tecnica!) | Fondo + (con tecnica) copertura | Fondo, gestione P/SS | Copertura iniezione; talvolta fertirrigaz. |

Azoto nei reflui: forme e implicazioni

- $N = N-NH_4^+$ (pronto effetto) + N organico (rilascio graduale)
- $N-NH_4^+$: aumenta l'efficacia fertilizzante ma è anche la principale sorgente di NH_3
- N organico: utile per scale medio-lunghe, meno per coperture rapide
- Implicazione: stimare N disponibile (non solo N totale)

Dal m³/ha ai kg N/ha: il passaggio che cambia tutto

- Gestire le dosi su: N totale e soprattutto TAN/N-NH₄⁺
- Definire coefficienti operativi di efficienza (tecnica + meteo + suolo)
- Obiettivo: massimizzare N utile al mais e minimizzare perdite
- Requisito minimo: analisi regolari + taratura della distribuzione

Dove si perde azoto: NH_3 , NO_3^- , N_2O

- NH_3 (ore–giorni): perdita rapida dopo applicazione superficiale (dipende da vento/temperatura)
- NO_3^- (settimane): rischio lisciviazione con anticipo eccessivo e piogge, soprattutto su suoli leggeri
- N_2O (giorni–settimane): rischio su suoli umidi/compattati e surplus di N disponibile
- Sostituire significa: stessa resa con minori perdite (non solo stessa dose)

Tecniche di distribuzione: impatto su efficienza ed emissioni

- Superficiale (piatto/irrigatore): semplice ma maggior rischio NH_3 e uniformità critica
- Rasoterra / bande (manichetta): riduzione intermedia di NH_3 , buona per coperture
- Interramento / iniezione / strip-till: massima ritenzione di TAN → più N disponibile
- Trade-off: potenza/complessità e gestione del traffico in campo



Esempio: barra rasoterra (trailing shoe)

Minerale vs organico: il discriminante è la tecnica

Messaggio 1 (resa):

- Con tecniche a bassa emissione (iniezione/interramento), digestato/derivati → rese uguali a urea

Messaggio 2 (NH₃):

- Superficie = TAN perso → efficienza N ↓
- Iniezione/interramento = TAN conservato → N disponibile ↑

Applicazione superficiale

TAN → NH₃ ↑↑

N utile al mais ↓

Iniezione / interrimento

TAN → NH₃ ↓↓

N utile al mais ↑

Take-home: la tecnica converte TAN in nutrizione, non in emissione.

Dati (Riva 2016): fattori di emissione NH₃ e implicazione sulla resa

Fattore di emissione (EF) = N–NH₃ emesso / TAN applicato

| Gestione / trattamento (sintesi) | EF NH ₃ (% TAN) | Messaggio tecnico |
|---|----------------------------|--|
| Digestato/derivati superficiali (media riportata) | 38 ± 11 | Perdite elevate → cala l'efficienza dell'N |
| Digestato iniettato (media riportata) | 5.4 ± 5.4 | Drastica riduzione NH ₃ |
| Frazione liquida iniettata (media riportata) | 9.75 ± 4.2 | Iniezione rende l'uso "competitivo" |
| Urea (media riportata) | 7.8 ± 5.2 | Riferimento della pratica comune |
| Esempio puntuale: digestato superficiale (pre-semina) | 30.4 | Ordine di grandezza "alto" |
| Esempio puntuale: frazione liquida superficiale | 46.3 | Caso peggiore se non incorporato |

- Interpretazione: in superficie si perde una quota rilevante di TAN; con iniezione gli EF diventano paragonabili all'urea
- Implica sulla resa: quando il TAN è conservato (iniezione), l'N torna disponibile e le rese risultano comparabili

Mais: strategia operativa (timing e frazionamento)

- Domanda di N elevata da V6 a pre-fioritura: serve N disponibile nel momento giusto
- Schema robusto: quota base pre-semine + quota in sarchiatura/side-dress (preferibilmente interrata)
- Irrigazione a goccia, subirrigazione.
- Obiettivo: massimizzare recupero N e ridurre surplus ($\text{NO}_3^-/\text{N}_2\text{O}$)

ReturN: ottimizzare la redistribuzione dell'N organico sul territorio

- Problema: aree in surplus zootecnico vs aree con domanda di nutrient
- ReturN ottimizza flussi: kg N trasferiti, distanze, costi, CO₂ del trasporto
- Beneficio: riduzione acquisto di N minerale + migliore bilancio territorial
- Output: scenari e trade-off (costi ↔ emissioni ↔ capacità di utilizzazione agronomica)

Vincoli di entrata in campo: traffico, compattamento, uniformità

- Volumi elevati → mezzi pesanti → rischio compattamento (resa, infiltrazione, N₂O)
- Il vincolo reale è spesso la portanza: si spande “quando si può”
- Soluzioni: separare trasporto e distribuzione, ridurre peso in campo, sistemi ombelicali dove fattibile
- Uniformità e controllo dose: requisito per sostituzione “seria”

ReturN: Ottimizzare lo spostamento di N organico tra aziende (surplus → deficit)

- Problema: distretti zootecnici = surplus di N (vincolo Direttiva Nitrati) e aree maidicole = deficit di N
- Obiettivo pratico: valorizzare liquame/digestato riducendo l'uso di N minerale, ma "senza impattare troppo" con trasporto e emissioni emissive
- Idea chiave: la "convenienza" del refluo dipende dal compromesso tra (i) costi €/kgN e (ii) emissioni (CO₂EQ) di trasporto vs produzione concimi

Come funziona

- Input minimi:
 - Bilanci di N (surplus/deficit) per azienda o per unità territoriale + distanze relative
 - Parametri di impatto: costo trasporto (€/km), emissioni trasporto (kgCO₂/km), costo concime, emissioni produzione concime
- Ottimizzazione multi-obiettivo: un peso w bilancia costi vs emissioni ($w=1$ solo costi; $w=0$ solo emissioni)
- Output: flussi ottimali (kg N spostati), N minerale evitato, costi totali e CO₂ totali (scenario vs baseline)

$$f_{org} = [C_{km} \cdot w + E_{km} \cdot (1 - w)] \cdot \text{distanza}$$

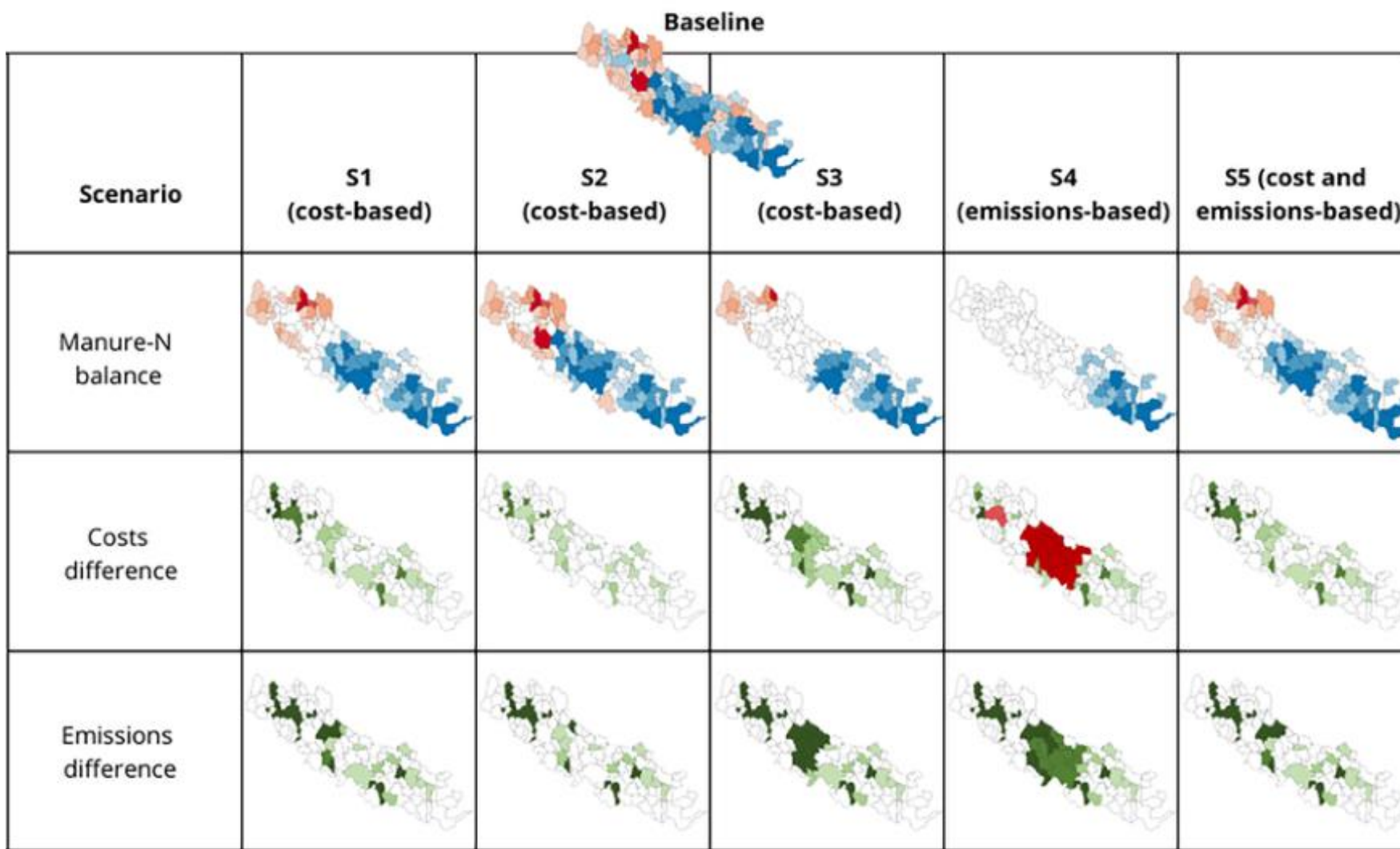
$$f_{min} = C_a \cdot w + E_p \cdot (1 - w)$$

$$d^* = \frac{f_{min}}{C_{km} \cdot w + E_{km} \cdot (1 - w)}$$

- **distanza**: km del trasporto
- **C_{km}** : **costo economico per km** per portare **1 kg di N** (€/km per kg N). Dipende da: costo trasporto/spandimento, **concentrazione di N** (se "diluito", più m³ per 1 kg N)
- **E_{km}** : **emissioni per km** per portare **1 kg di N** (kg CO₂/km per kg N) se basso più CO₂ per km.
- **w** (tra 0 e 1): **peso costi/emissioni**: $w=1$ **solo i costi** (€) : $w=0$ **solo emissione**
- **d^* è il punto di breakeven**

Distanza “soglia”: perché non è un numero fisso

- Oltre una certa distanza, il refluo perde competitività (più costo e/o CO₂ per kg N trasportato)
- La soglia dipende dai parametri (e può cambiare molto):
 - peso w (priorità: costi vs emissioni)
 - prezzo ed emissioni “embedded” dei fertilizzanti minerali (es. urea)
 - costo/km e emissioni/km del cantiere (logistica, mezzi, velocità, viaggi)
 - concentrazione di N del refluo (diluzione → più volumi per stesso kgN)
- Le soglie di trade-off in scenari diversi e ipotesi diverse spaziano da ~5.7 km a ~94 km



Legenda colori (riga 1)
 Bilancio N reflui (t N anno⁻¹)

- Blu = deficit (aree “riceventi”)
- Rosso = surplus (aree “sorgenti”)

Bianco ≈ bilancio vicino a zero

- deficit (più forte)
- deficit (moderato)
- surplus (moderato)
- surplus (più forte)

Legenda colori (righe 2–3)
 Differenza vs baseline (%)

- Verde = riduzione / risparmio
- Rosso = aumento

Riga 2: costi (€)
 Riga 3: emissioni (kg CO₂)

- riduzione (migliore)
- riduzione (piccola)
- aumento (piccolo)
- aumento (peggiore)

Baseline e S1–S5
 Baseline = situazione attuale (prima dell’ottimizzazione Return).
 S1–S5 = scenari con parametri diversi.

Scenari S1–S5

S1–S3: ottimizzazione basata SOLO sui costi ($w = 1$). Cambia il prezzo dell'N minerale acquistato (M_i , €/kg N).

S4: ottimizzazione basata SOLO sulle emissioni ($w \approx 0$) → minimizza CO₂ associata ai flussi, MT + Cover

S5: compromesso costi + emissioni ($0 < w < 1$) MT + Cover

Differenza tra S1, S2 e S3 (stesso modello, diverso prezzo dell'N minerale)

S1: prezzo medio (2019–2024, escludendo periodi anomali) → = 0,331 €/kg N.

S2: prezzo minimo → = 0,185 €/kg N.

S3: prezzo massimo → = 0,923 €/kg N.

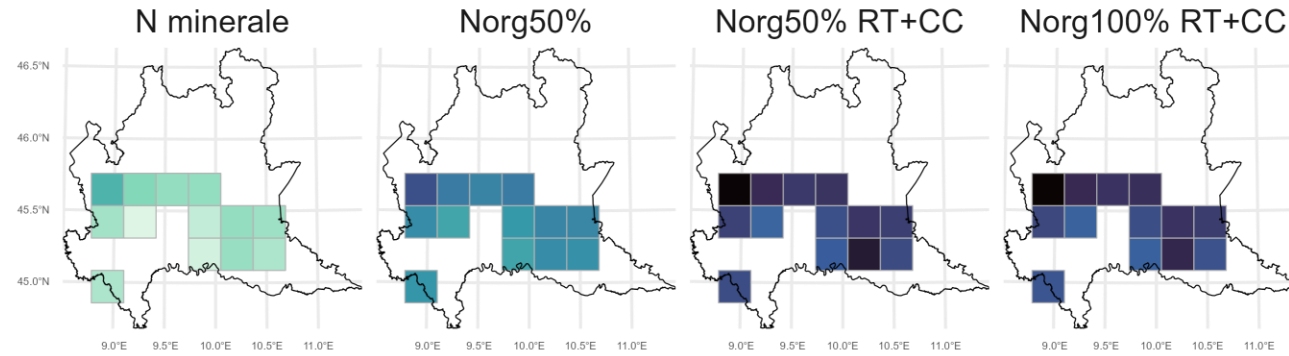
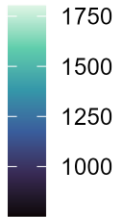
Effetto atteso: più è caro l'N minerale, più conviene (economic.) spostare N organico anche a distanze maggiori.

tutti i risultati sono riportati come variazione % rispetto alla baseline, definita come la situazione PRIMA della redistribuzione ottimizzata dei flussi.

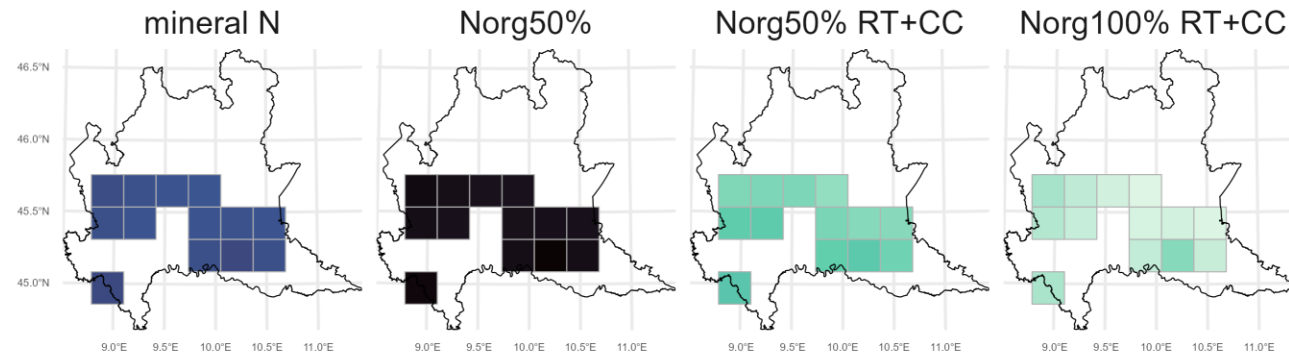
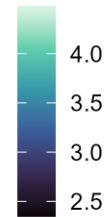
Quindi: baseline = allocazione/uso attuale; scenari = cosa cambia applicando ReturN con obiettivi e parametri diversi.

Effetti della sostituzione su emissioni e SOC

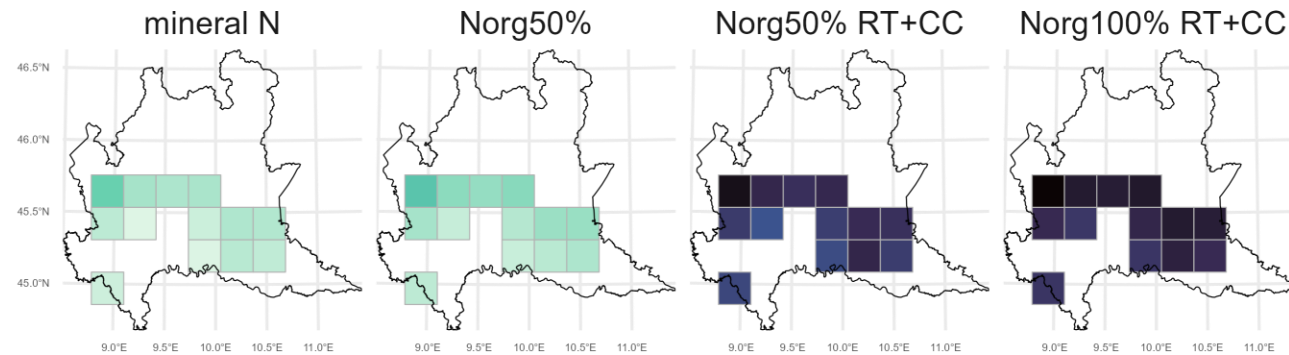
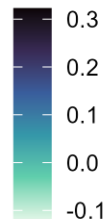
kg CO₂eq ha⁻¹ y⁻¹



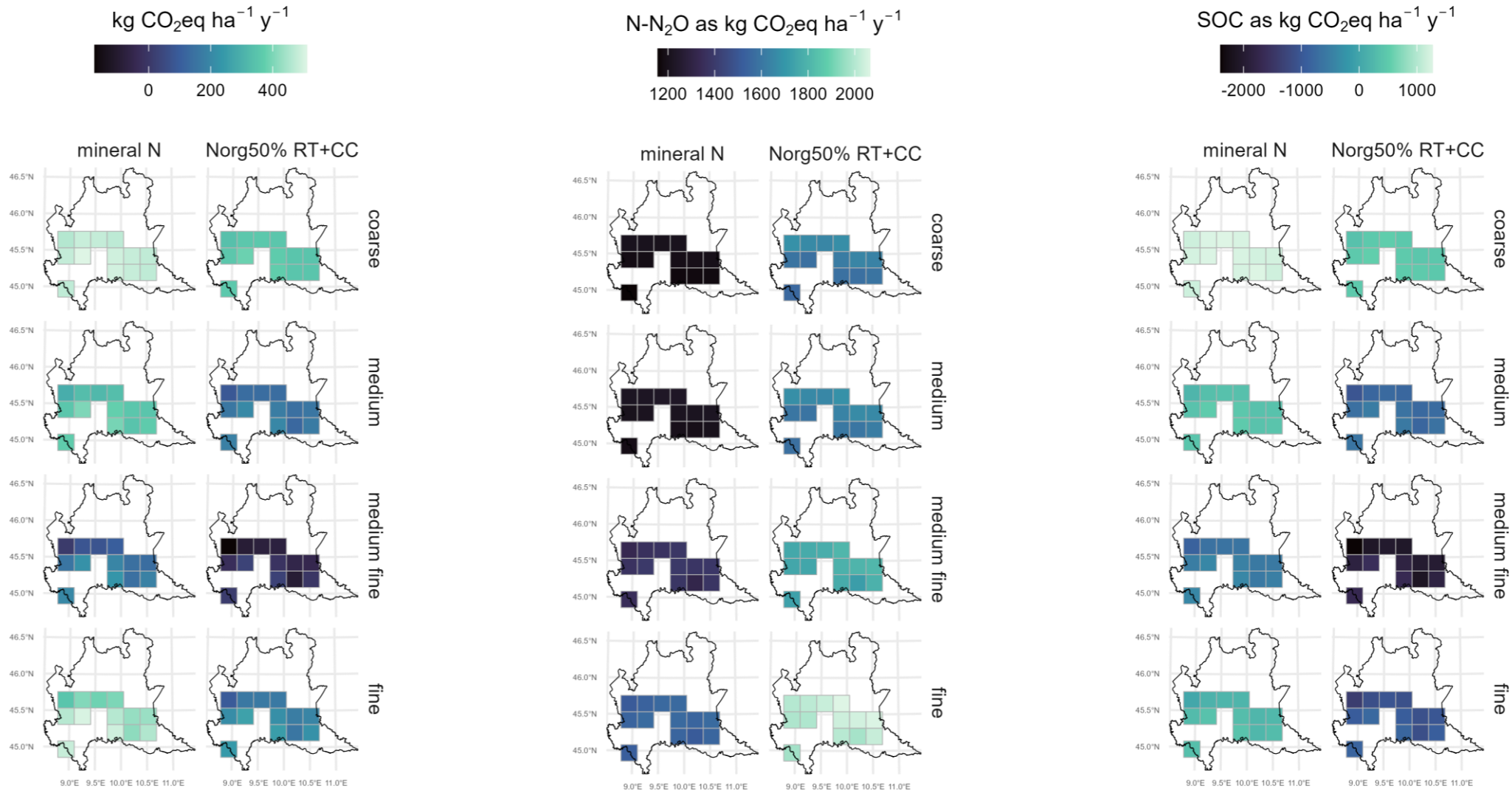
kg N-N₂O ha⁻¹ y⁻¹



t SOC ha⁻¹ y⁻¹



Effetti della sostituzione su emissioni e SOC - per differenti suoli



Check-list operativa (azienda maidicola)

Misuro e pianifico

- Analisi: N totale + TAN/ NH_4^+ (+ SS se serve)
- Dosi in kg N/ha (non m^3/ha)
- Bilanci P e K nel medio periodo

Applico bene

- Timing: quota base + side-dress
- Tecniche low emission: rasoterra/iniezione
- Cantiere: meno peso in campo, più finestre utili

Conclusioni

- Liquame e digestato possono sostituire gran parte dell'N minerale nel mais
- La condizione è un triangolo: dose su N disponibile + timing + tecnica/cantiere
- La sostenibilità si gioca su: efficienza N, NH_3 (aria), NO_3^- (acque) e **gestione territoriale**

Grazie