Un sistema di supporto alle decisioni basato su sensori ISE per la fertirrigazione di precisione in coltura idroponica a ciclo chiuso

Angelo Signore

Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e degli Alimenti
Università degli Studi di Bari Aldo Moro, Bari, Italia

angelo.signore@uniba.it

Gruppo di Lavoro in Sensoristica ed Intelligenza Artificiale in Ortoflorofrutticoltura

II Giornate Tecniche SOI
Bari 10-11 settembre 2026

01 · INTRODUZIONE

Perché le coltivazioni senza suolo (CSS)

Scarsità idrica e demografia

La scarsità idrica e i cambiamenti climatici comprimono la disponibilità di acqua per l'agricoltura.
Nello stesso periodo la popolazione mondiale crescerà fino a 10,3 miliardi (UN, 2024), con un fabbisogno alimentare in aumento del 70% (FAO, 2009).

Maggiore efficienza d'uso

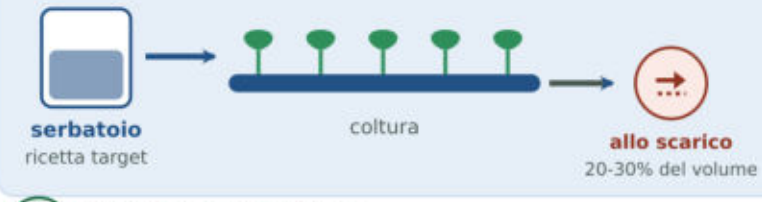
I sistemi senza suolo garantiscono livelli più elevati di efficienza nell'uso dell'acqua (WUE) e di efficienza nell'uso dei nutrienti (NUE) grazie al controllo preciso degli input.

Maggiore produttività

Le colture fuori suolo presentano in genere tassi di crescita più rapidi e rese notevolmente superiori.
Ciò si ottiene grazie all'apporto diretto di sostanze nutritive alle radici, che ottimizza il metabolismo e lo sviluppo delle piante.

Inoltre, l'eliminazione di agenti patogeni e parassiti presenti nel suolo, l'indipendenza dalle condizioni climatiche e la produzione durante tutto l'anno, l'ottimizzazione dell'uso del terreno e dello spazio, ecc.

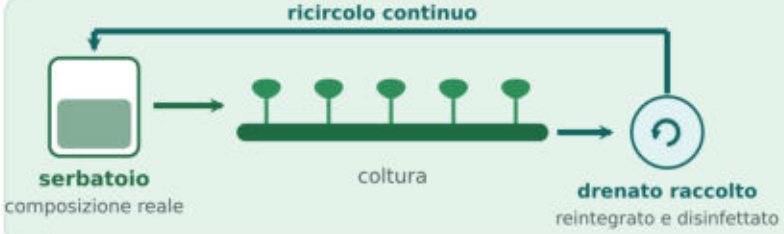
CICLO APERTO



La soluzione erogata è sempre quella di ricetta:
nessuna deriva da governare

- **Monitoraggio minimo**
  bastano EC e pH in erogazione
- **Consumo idrico elevato**
  il drenato lascia il sistema
- **Fertilizzanti dispersi**
  costo per unità di prodotto più alto
- **Rilascio di nitrati**
  vincoli normativi in zone vulnerabili

CICLO CHIUSO



La composizione cambia a ogni passaggio:
la deriva ionica va misurata

- **Risparmio idrico e nutritivo**
  il drenato rientra nel sistema
- **Nessuno scarico in ambiente**
  coerente con la Direttiva Nitrati
- **Deriva ionica**
  accumulo di Na^+, SO_4^{2-}, Mg^{2+}
- **Rischio fitopatologico**
  un patogeno radicale viaggia con la SN

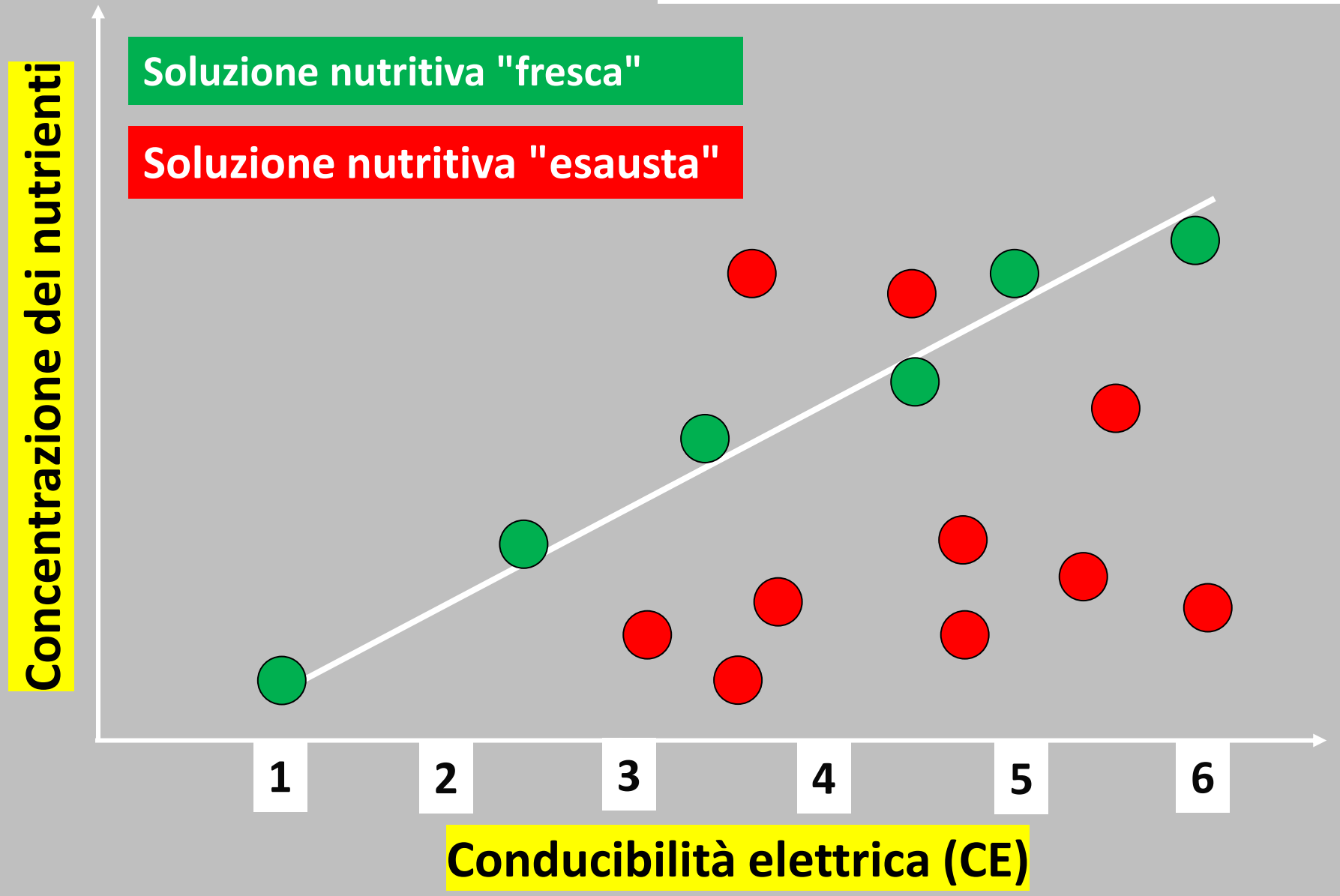
Ciclo aperto e chiuso

La gestione della soluzione nutritiva cambia con il ricircolo

01 · INTRODUZIONE

Ciclo chiuso / svantaggi

Soluzioni nutritive con valori di CE uguali possono avere composizioni molto diverse.

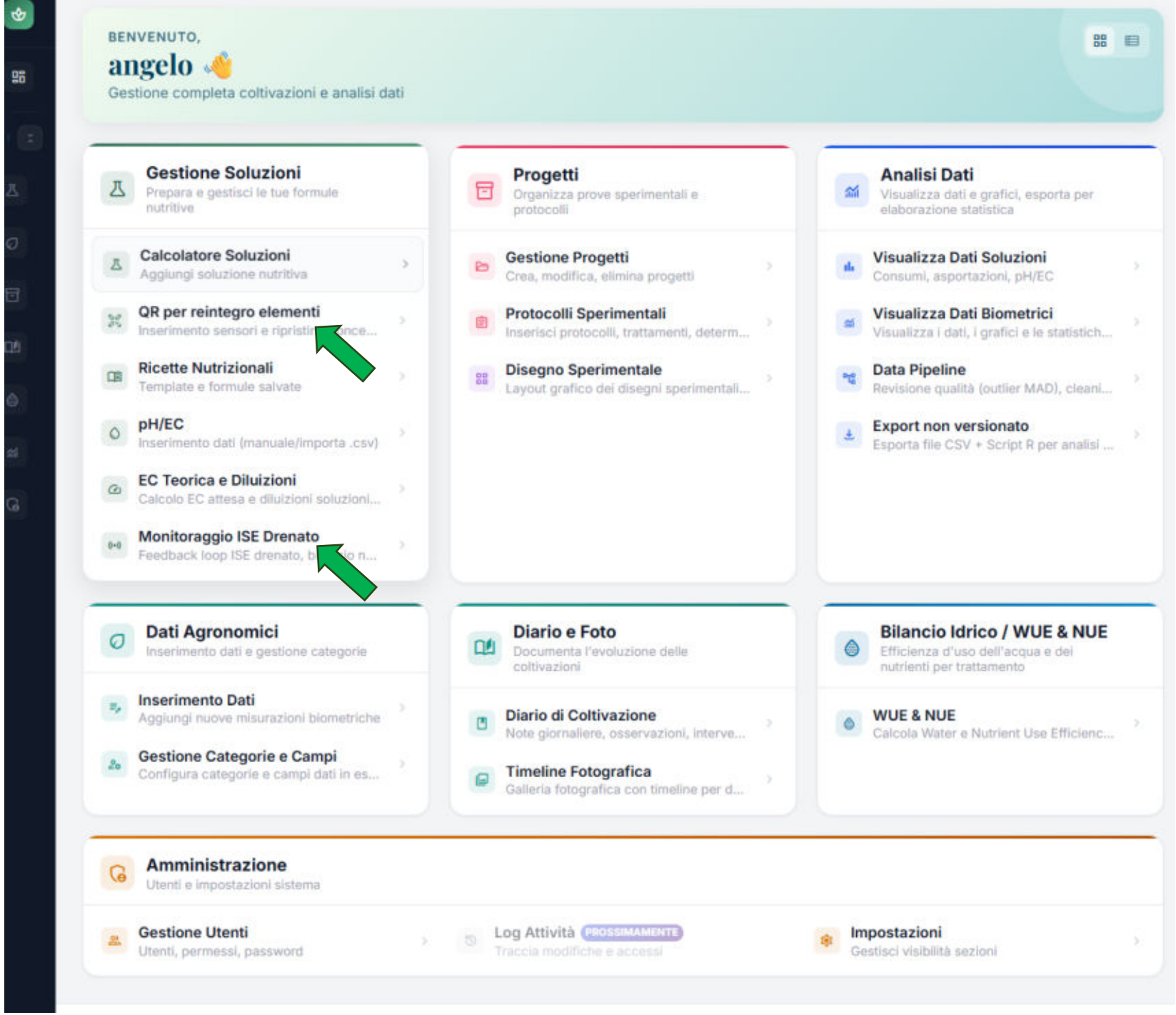


01 · INTRODUZIONE

- Prassi corrente: rabbocco con SN completa, che reintegra tutti gli ioni nelle proporzioni di ricetta
- Le analisi di laboratorio sono accurate ma lente e costose: tempi non compatibili con la gestione operativa;
- Nelle zone costiere l'acqua irrigua è spesso salmastra: accumulo progressivo di ioni "zavorra" come Na^+ e Cl^-.

02 · OBIETTIVI

Sviluppo, all’interno di una piattaforma web open-source per la gestione dell’intero processo di sperimentazione agronomica, di una sezione dedicata al supporto decisionale per la gestione delle coltivazioni senza suolo.



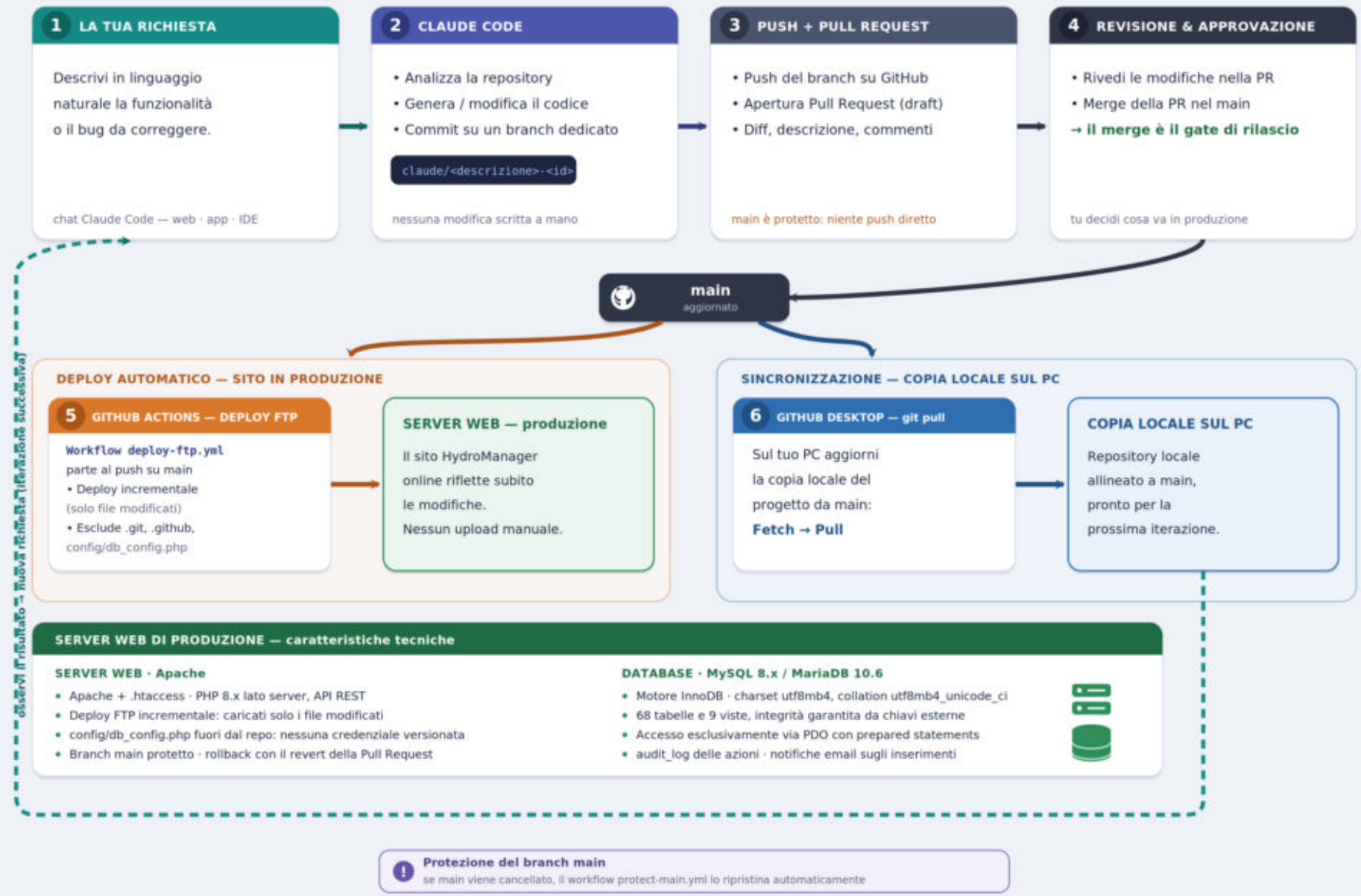
Flusso di lavoro — sviluppo assistito da Claude Code e deploy automatico

Dalla richiesta in linguaggio naturale al sito in produzione, con Pull Request su GitHub e deploy FTP incrementale via GitHub Actions

570+ Pull Request
CI/CD · GitHub Actions

Gruppo di Lavoro in Sensoristica ed Intelligenza Artificiale in Ortoflorofrutticoltura

La piattaforma di gestione

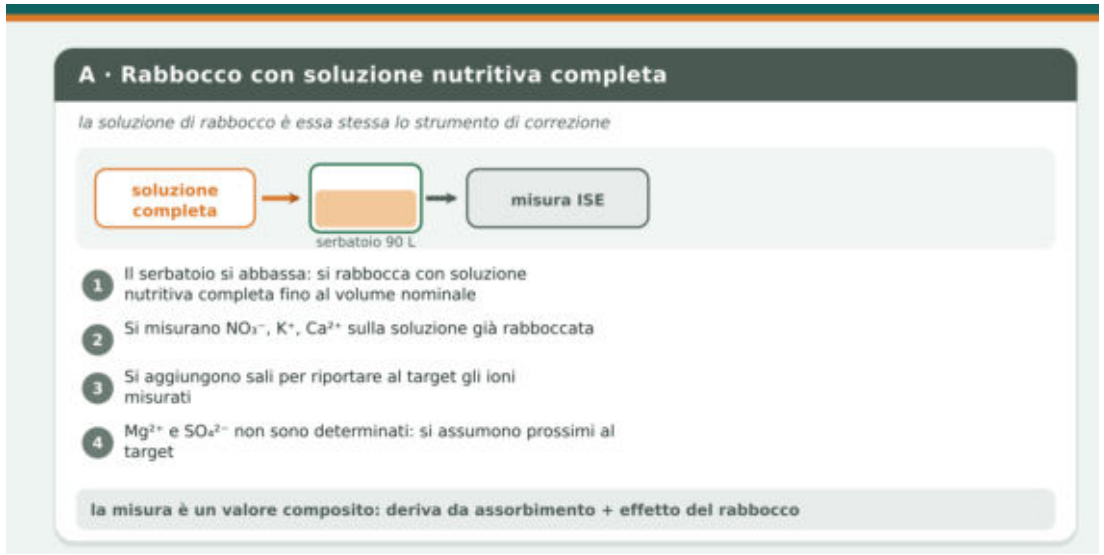


CLAUDE CODE

GitHub

La gestione della soluzione nutritiva

Confronto tra due logiche di gestione: soluzione nutritiva completa vs logica basata su Nutrisense[1]



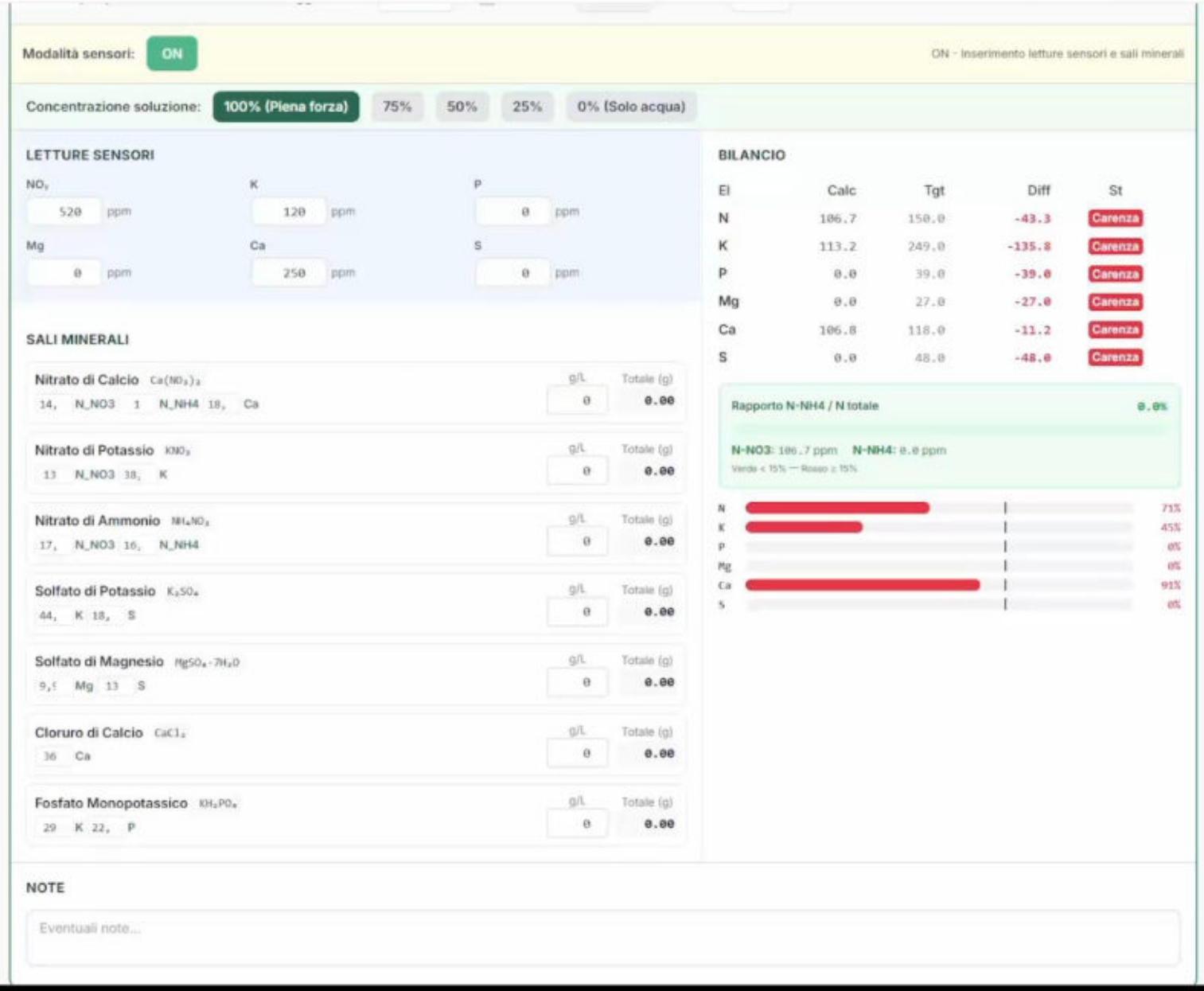


TANK VOLUME (L) 90

	(g)	g/l	NO3	N (from NO3)	K	P	Mg	Ca	S
Values measured with ISE			680	140	198	0	0	308	0
Calcium nitrate	0.0	0.000		0				0	
Potassium nitrate	7.5	0.083		11	32				
Ammonium nitrate	0.0	0.000		0					
Potassium sulphate	3.9	0.043			19				8
Calcium chloride	0.0	0.000						0	
Monopotassium phosphate	0.0	0.000			0	0	0		
Concentration difference				0	0	0	0	190	8
Nutrient concentration - reproductive stage				150	249	39	27	118	48

[1]Savvas, D., Drakatos, S., Panagiotakis, I., Ntatsi, G., 2021. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1317.24

La gestione della soluzione nutritiva



La gestione della soluzione nutritiva

Confronto tra le due logiche di gestione: SN completa vs logica basata su Nutrisense[1]

B · NUTRISENSE — acqua pura + sali singoli

la ricetta non è ciò che si aggiunge: è il bersaglio da raggiungere



1. Il serbatoio si abbassa: si misurano NO_3^-, K^+, Ca^{2+} ed EC sul DRENATO, prima del rabbocco
2. Si rabbocca con acqua pura (piovana o osmosi inversa): la diluizione si calcola, non si misura
3. Mg^{2+} e SO_4^{2-} sono stimati chiudendo il bilancio ionico (Sonneveld, 2002)
4. Si aggiungono sali singoli secondo la priorità Ca > P > Mg > N > K, con vincolo rigido *(hard cap)*

la misura è una fotografia diretta dell'assorbimento selettivo nel time frame Tf



[1]Savvas, D., Drakatos, S., Panagiotakis, I., Ntatsi, G., 2021. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1317.24

Il flusso di lavoro

Gruppo di Lavoro in Sensoristica ed Intelligenza Artificiale in Ortoflorofrutticoltura

1

Modifica Ricetta

Nome Ricetta *

Agribot 2025 (Prima ricetta)

Template (ricetta base)

Descrizione

Fino al 26 ottobre 2025

Concentrazioni Acqua (ppm)

$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	K	P	Mg	Ca	S
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Target Macronutrienti (ppm)

$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	K	P	Mg	Ca	S
134,00	10,00	161,00	50,00	25,00	124,00	33,00

Fattori di Correzione Sensori

N	K	P	Mg	Ca	S
1,100	1,060	1,000	1,000	2,340	1,000

2

Trattamenti

Agribot - ottobre 2025 (Pomodoro)

Associa Ricetta a Tutti (2)

Codice	Nome	Progetto	Ricetta	Azioni
T1	Gestione SN: Control	Agribot	Agribot 2025 (Seconda ricetta) N:150.00 K:249.00 P:39.00	Associa Ricetta
T2	Gestione SN: Sensor	Agribot	Agribot 2025 (Seconda ricetta) N:150.00 K:249.00 P:39.00	Associa Ricetta

3

Calcolo EC Teorica

Stima l'EC attesa dalla composizione elementare della soluzione nutritiva. Formula: EC = (Σ Anioni meq/L) × 0,095 + 0,19 (a 25°C).

Carica da ricetta

Agribot 2025 (Prima ricetta)

Mezza forza

Reset

Concentrazioni caricate dalla ricetta: Agribot 2025 (Prima ricetta)

Elemento	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	K	P	Mg	Ca	S
Target	134.00	10.00	161.00	50.00	25.00	124.00	33.00
Acqua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Netto (Target − Acqua)	134	10	161	50	25	124	33

Le concentrazioni nette (target − acqua) sono usate per il calcolo EC.

Concentrazioni elementi (mg/L)

$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	K	P	Mg	Ca	S	Cl
134	10	161	50	25	124	33	0

Riepilogo Anioni

Ione	Tipo	mg/L	meq/L
NO_3^-	anione	134.0	9.56
$H_2PO_4^-$	anione	50.0	1.61
SO_4^{2-}	anione	33.0	2.06
NH_4^+	catione	10.0	0.71
		Totale anioni	13.24
		Totale anioni + NH_4^+	13.95

EC Teorica (solo anioni)

1.45 mS/cm

= 13.24 × 0,095 + 0,19

EC Teorica (anioni + NH_4^+)

1.52 mS/cm

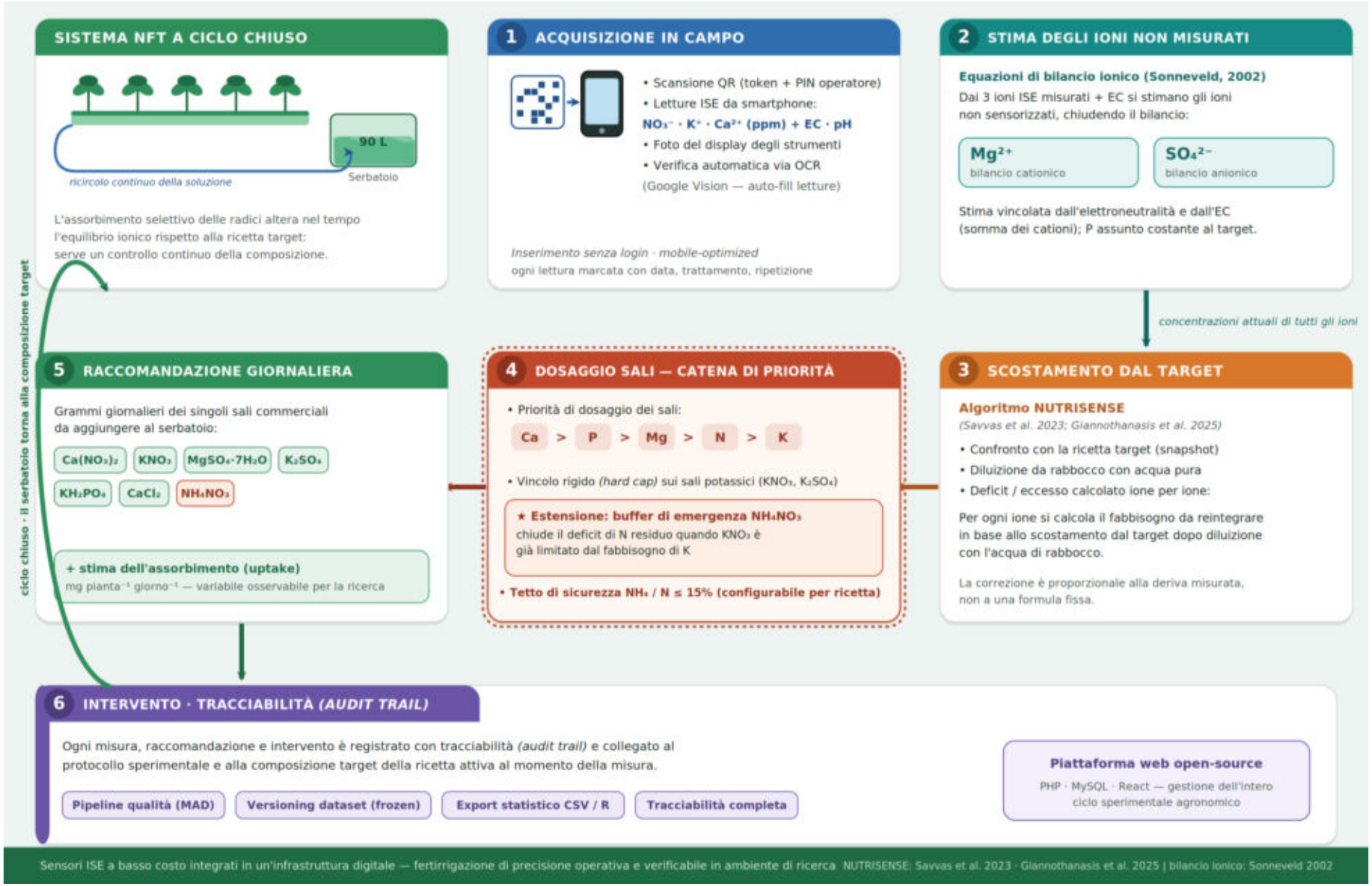
= (13.24 + 0.71) × 0,095 + 0,19

NH_4^+ è un catione e non rientra nella formula classica basata sui soli anioni. Questo valore include il suo contributo per una stima più completa.

Il flusso di lavoro

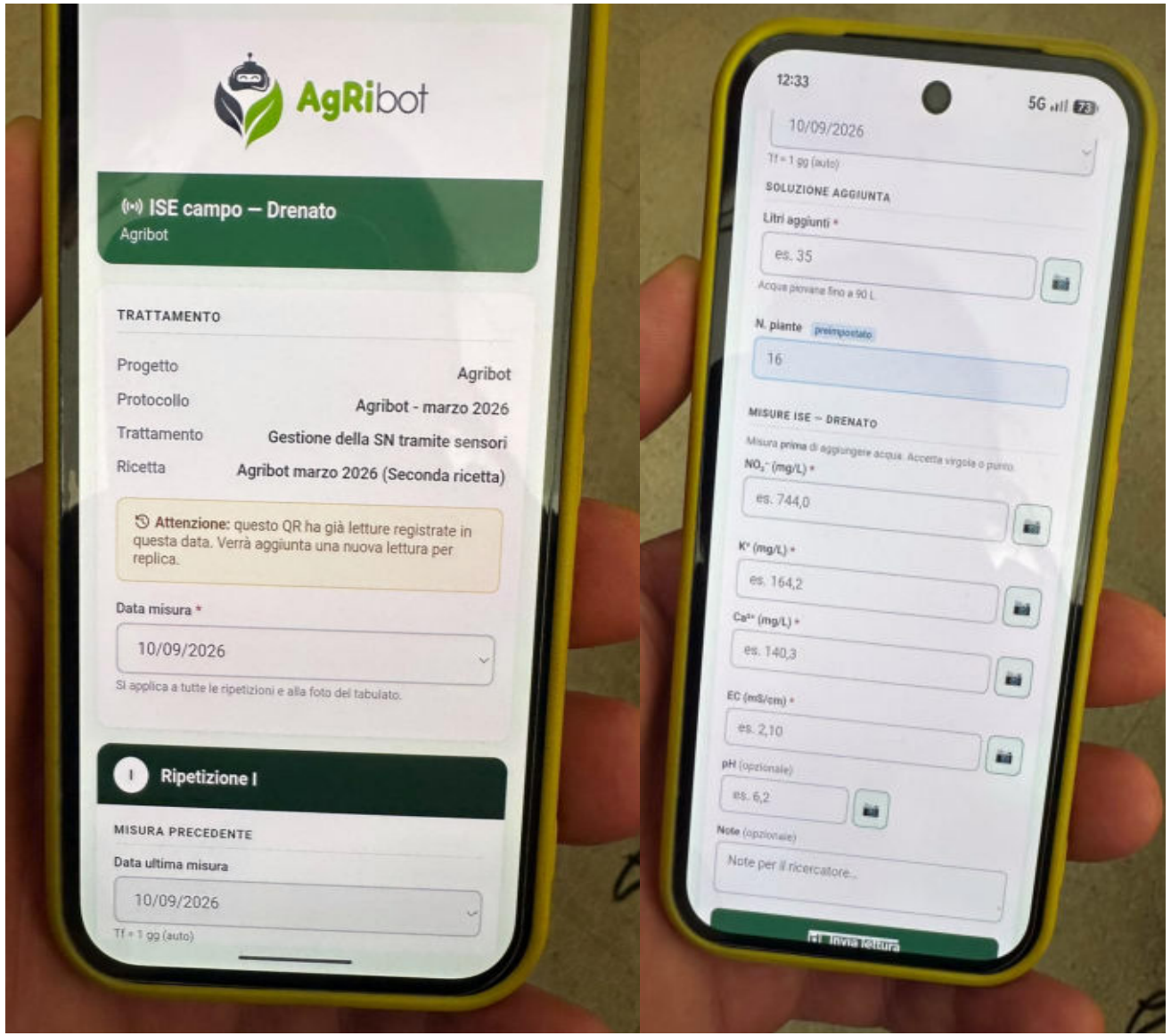
Gruppo di Lavoro in Sensoristica ed Intelligenza Artificiale in Ortoflorofrutticoltura

Workflow del sistema basato su Nutrisense

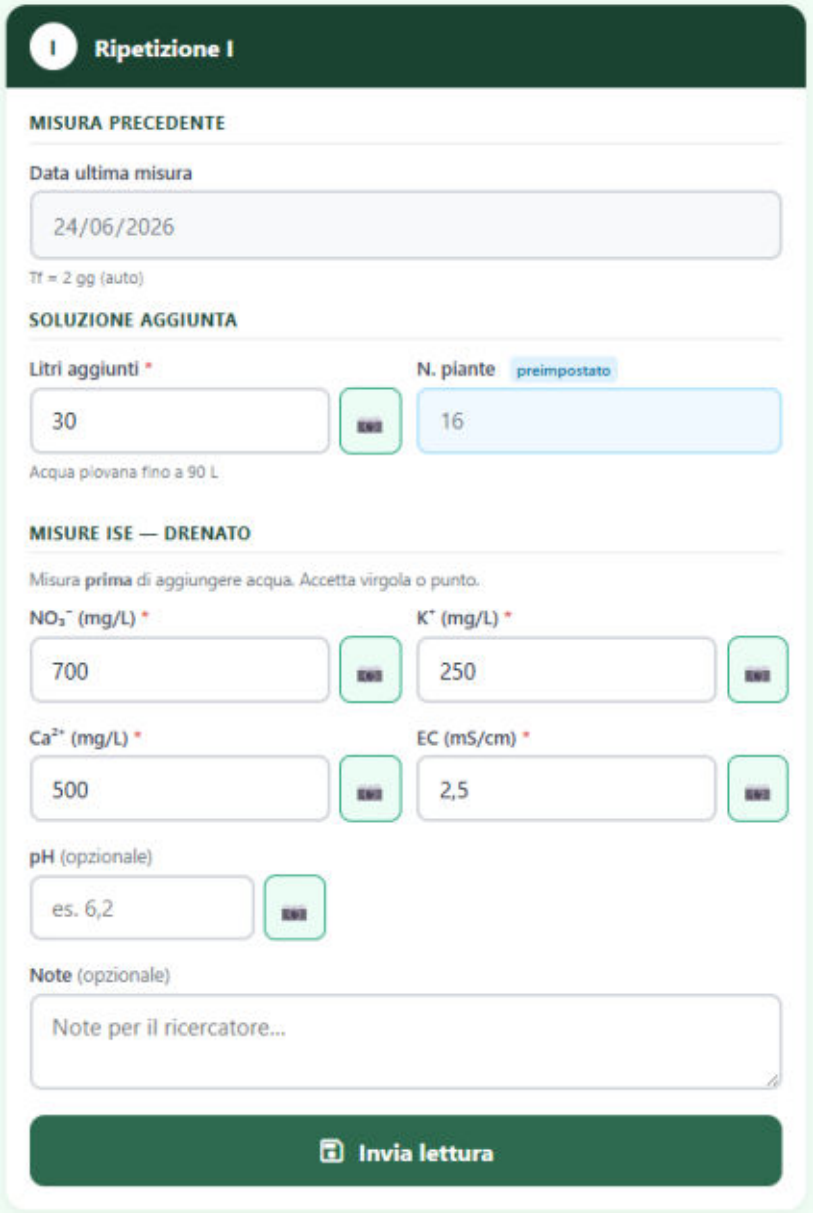


I codici QR per la lettura in campo











Il sistema evidenzia l'aggiunta di NH_4NO_3 per chiudere il bilancio di N, e ricorda il limite di sicurezza.

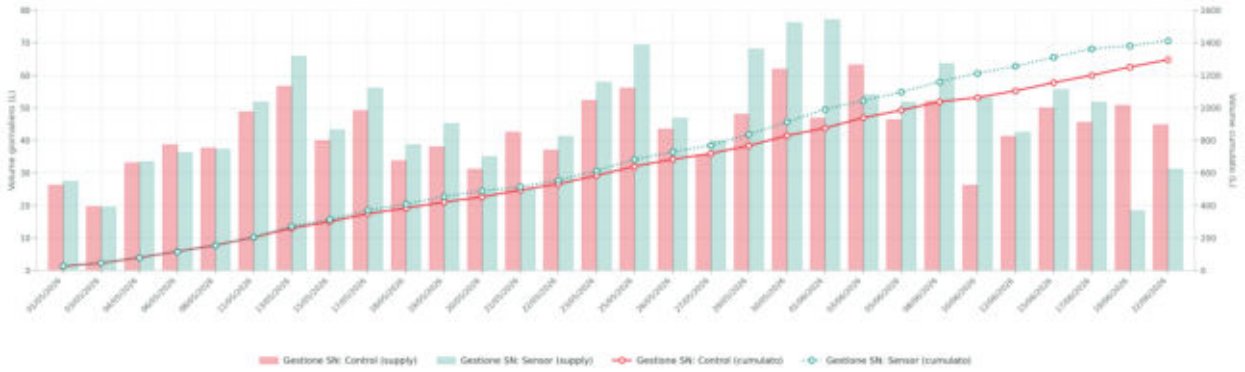
Lettura ISE e raccomandazione di dosaggio restituita dal sistema.

ULTIME 30 LETTURE ISE

Agribot | Rileva outlier | Esporta CSV

DATA	Q	TRATTAMENTO	REP.	ORIGINE	NO_3 (MM)	K (MM)	CA (MM)	EC	MG* (MM)	G $CA(NO_3)_2$	G $CACL_2$	G KNO_3	G NH_4NO_3	G K_2SO_4	G KH_2PO_4	G $MGSO_4$	AZIONI
2026-05-04	RAW	Gestione SN: Sensor	I	QR campo	1.323	1.330	2.445	0.740	0.590	29.61 g	—	24.71 g	—	—	7.02 g	14.32 g	Elimina
2026-05-04	RAW	Gestione SN: Sensor	II	QR campo	1.274	0.614	2.171	0.570	0.372	34.46 g	—	28.65 g	—	—	7.68 g	17.69 g	Elimina
2026-05-04	RAW	Gestione SN: Sensor	III	QR campo	1.532	0.793	2.171	0.630	0.583	34.46 g	—	27.64 g	—	—	7.68 g	14.85 g	Elimina
2026-05-06	RAW	Gestione SN: Sensor	I	QR campo	2.903	5.371	2.096	1.340	1.919	37.62 g	—	3.79 g	11.11 g	—	8.77 g	—	Elimina
2026-05-06	RAW	Gestione SN: Sensor	II	QR campo	2.903	5.371	1.472	1.280	2.243	45.02 g	—	4.55 g	11.11 g	—	9.21 g	—	Elimina
2026-05-06	RAW	Gestione SN: Sensor	III	QR campo	4.839	5.115	2.046	1.430	2.547	33.73 g	—	1.53 g	10.87 g	—	6.58 g	—	Elimina
2026-05-08	RAW	Gestione SN: Sensor	I	QR campo	2.581	5.627	2.495	1.170	0.542	32.22 g	—	1.66 g	11.11 g	—	8.33 g	15.80 g	Elimina
2026-05-08	RAW	Gestione SN: Sensor	II	QR campo	3.387	5.882	2.345	1.120	0.314	34.93 g	—	1.17 g	11.11 g	—	8.77 g	18.86 g	Elimina
2026-05-08	RAW	Gestione SN: Sensor	III	QR campo	5.645	7.161	3.244	1.480	0.576	22.38 g	—	—	11.11 g	—	—	15.08 g	Elimina

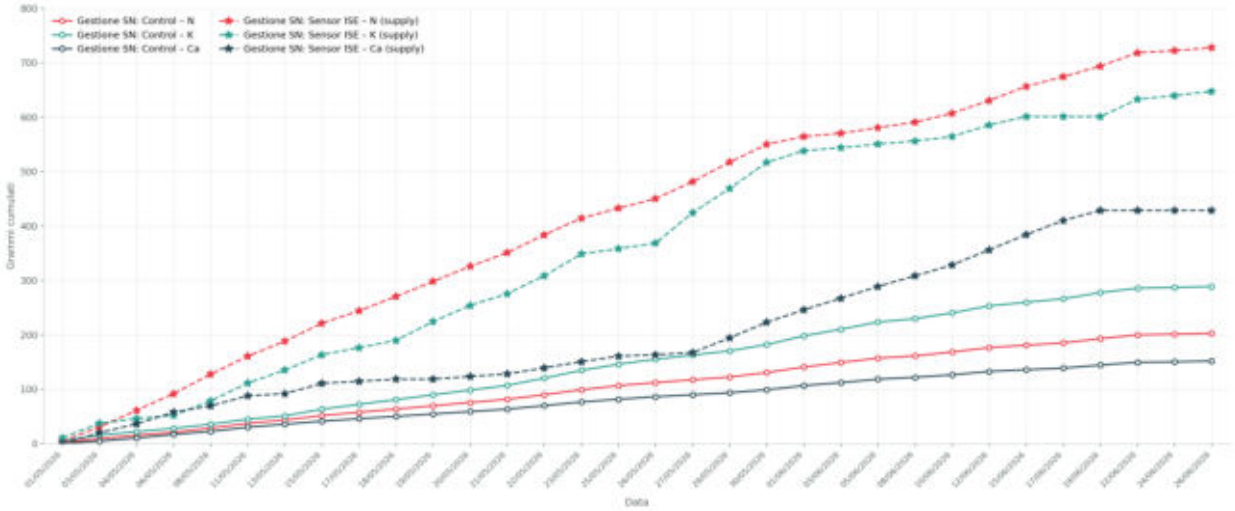
Storico letture



Volume di soluzione aggiunta: giorno e cumulato



Volume di soluzione/pianta/giorno



Asportazioni cumulate di elementi

Catena di tracciabilità del dato: dal campo all'analisi statistica

Il DSS non è uno strumento isolato: è un nodo di un'infrastruttura digitale che gestisce l'intero ciclo sperimentale

piattaforma web open-source · PHP · MySQL

1 Accesso in campo

- Scansione del codice QR applicato al canale NFT
- Token SHA-256 + PIN operatore
- Nessun login richiesto · interfaccia mobile

il dato nasce già legato a trattamento e ripetizione

2 Lettura ISE

- NO_3^- · K^+ · Ca^{2+} in ppm, più EC e pH
- Foto del display degli strumenti (4 slot)
- Validazione di range sui valori inseriti

la fotografia è la prova documentale della lettura

3 Verifica OCR

- Lettura automatica delle immagini acquisite
- Auto-fill e confronto con il valore digitato
- Segnalazione delle discordanze all'operatore

riduce l'errore di trascrizione manuale

4 Calcolo DSS

- I 9 step su snapshot di ricetta e protocollo
- Priorità Ca > P > Mg > N > K con hard-cap
- Grammi per sale + warning diagnostici

la raccomandazione è riproducibile a posteriori

5 Controllo qualità

- Individuazione degli outlier (MAD)
- Revisione dell'operatore e decisione esplicita
- Versioning del dataset in snapshot congelati

nessun dato viene modificato silenziosamente

6 Export e analisi

- File CSV (una riga = una osservazione)
- Script R con disegno RCBD o split-plot
- Filtri per progetto, trattamento e data

dal campo all'ANOVA senza passaggi manuali

REGISTRO DELLE OPERAZIONI *(audit trail)*

Ogni misura, raccomandazione e intervento è registrato con utente, timestamp e valore precedente, e collegato al protocollo sperimentale, al trattamento e alla ricetta target in vigore al momento della misura.

utente e timestamp · **valore precedente** · **protocollo sperimentale** · **trattamento e ripetizione** · **snapshot della ricetta** · **notifiche email**

FLUSSO DI VALIDAZIONE — stati del dato



Cosa rende verificabile la fertirrigazione

- Il valore ISE grezzo è conservato accanto alla raccomandazione che ne è derivata
- La ricetta target è congelata al momento della misura: modifiche successive non riscrivono la storia
- L'attivazione del buffer NH_4NO_3 è registrata per ogni ciclo, e la sua frequenza è analizzabile a posteriori

Requisiti dell'impianto sperimentale

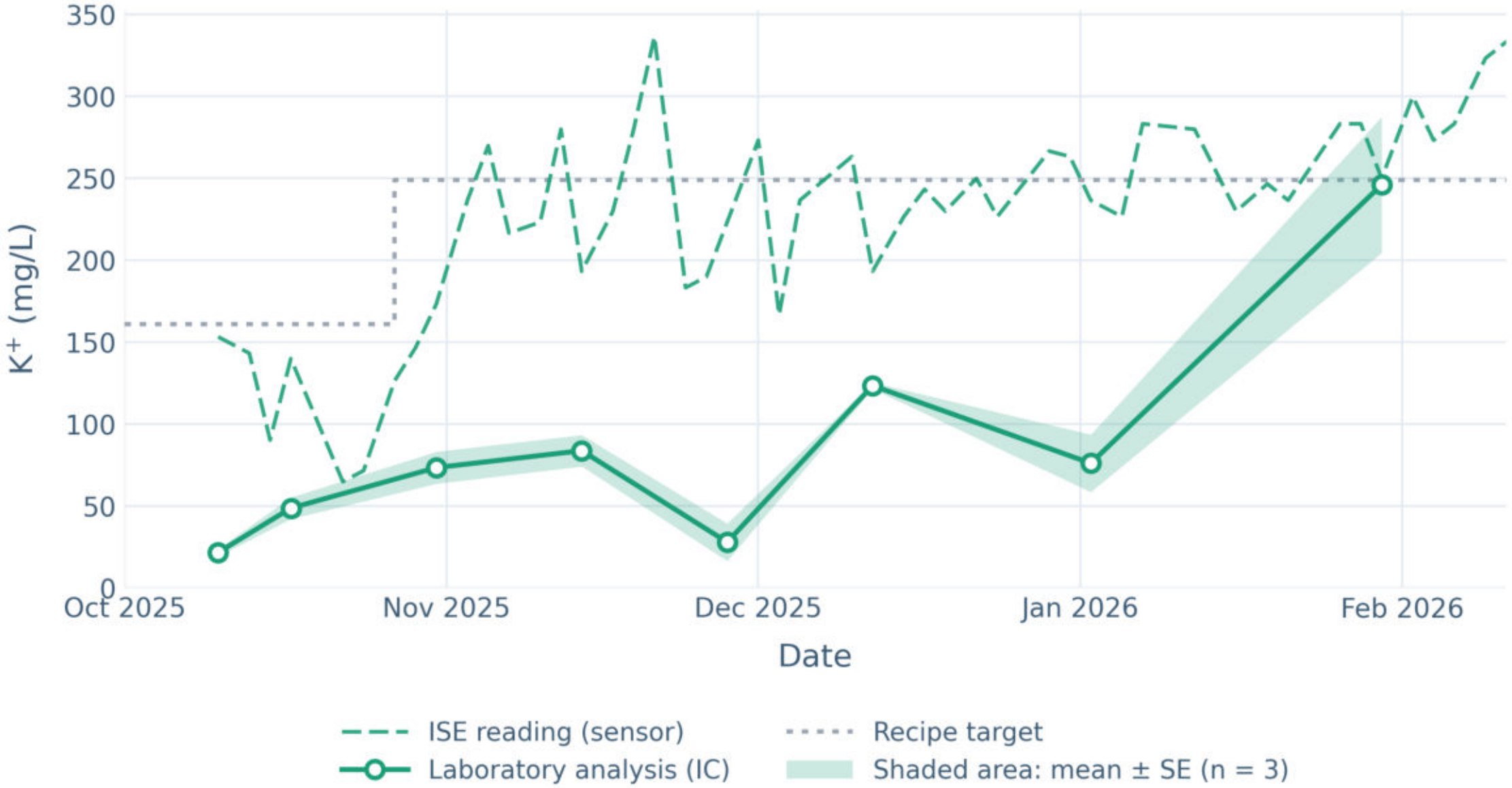
- Sensori ISE a basso costo, letti da smartphone in campo
- Piattaforma web open-source (PHP · MySQL), ruoli e permessi per progetto
- Prova preliminare su pomodoro in NFT, confronto Sensor vs Classic

La sensoristica a basso costo diventa operativa e verificabile solo se il dato è tracciato dall'acquisizione all'analisi statistica.

05 · CONCLUSIONI

- Tre ioni (NO_3-N, K^+, Ca^{2+}) misurati con sensori ISE a basso costo, integrati dalla chiusura del bilancio ionico, utilizzati per avere informazioni sulla composizione della SN e a guidare il reintegro dei nutrienti
- La correzione diventa specifica per ione: reintegra i deficit senza aggravare gli eccessi
- Ogni sale porta più ioni: la catena di priorità rende esplicito quale ione cede il passo e di quanto, e come l'azoto viene recuperato (NH_4NO_3)
- L'integrazione di codici QR, OCR, controllo qualità e registro delle operazioni rende la raccomandazione ricostruibile a posteriori
- La sensoristica a basso costo, inserita in un'infrastruttura digitale, rende operativa e verificabile la fertirrigazione di precisione in ambiente di ricerca, **MA…**

Il problema dei sensori



06 · PROSPETTIVE FUTURE

- Sensori maggiormente affidabili e/o taratura a differenti temperature per introdurre fattori di correzioni più specifici
- Limite per % di NH_4NO_3: introdurre nel sistema, non direttamente nel codice, la possibilità di variare la % massima a cui il sistema può arrivare per evitare fenomeni di competizione e valori di pH «estremi»
- IoT: acquisizione continua. L'infrastruttura software c'è già (tabelle, endpoint con token, dashboard), manca l'hardware in serra
- Notifiche automatiche per deriva progressiva di un elemento e deficit non coperto.

Grazie per l'attenzione

angelo.signore@uniba.it

