



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SISTEMI AGRICOLI INNOVATIVI

L'IMPIEGO DI PROXIMAL E REMOTE SENSING PER LA DEFINIZIONE DI MAPPE DI VARIABILITÀ DEL SUOLO IN SISTEMI CEREALICOLO-ZOOTECNICI

TIPO TESI: sperimentale

THE USE OF PROXIMAL AND REMOTE SENSING TO
CREATE MAPS OF SOIL VARIABILITY IN CROP-
LIVESTOCK SYSTEMS

Studente:
GIANLUIGI MORONI

Relatore:
PROF. LUIGI LEDDA

Correlatore:
DOTT. MARCO FIORENTINI

Correlatore:
DOTT.SSA. PAOLA ANTONIA
DELIGIOS

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

Sommario

ELENCO DELLE TABELLE.....	6
ELENCO DELLE FIGURE	7
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	8
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	9
CAPITOLO 1 AGRICOLTURA DI PRECISIONE E FONDAMENTI.....	11
1.3. L'agricoltura di precisione nel mondo.....	12
1.4. Agricoltura di precisione in Italia	13
1.5. Benefici Agronomici.....	14
1.6 Benefici Economici ed Ambientali	15
CAPITOLO 2 REMOTE SENSING	17
2.1 Piattaforme satellitari multispettrali.....	17
2.1.1 Costellazioni operative di riferimento	18
2.2 Analisi radiometrica e indici vegetazionali (NDVI, NDRE, SAVI)	18
2.2.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	18
2.2.2 Normalized Difference Red Edge Index (NDRE)	19
2.2.3 Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI).....	19
2.3 Applicazioni per la variabilità del suolo	20
2.3.1 Analisi diretta tramite firma spettrale del suolo nudo.....	20
2.3.2 Analisi indiretta mediante memoria storica vegetazionale	21
2.4 Limiti e potenzialità	21
2.4.1 Limiti intrinseci e colli di bottiglia tecnologici.....	21
2.4.2 Potenzialità applicative e framework europei	22
CAPITOLO 3 PROXIMAL SENSING	24
3.1 Sensori di conducibilità elettrica (EC)	24
3.1.1 Tecnologie di acquisizione del dato.....	25
3.2 Sensori ottici e NIR.....	26
3.2.1 Sensori ottici attivi per il monitoraggio della vegetazione	26
3.2.2 Spettroscopia Vis-NIR applicata al suolo	27
3.3 Slitte, rover e sistemi trainati	27
3.3.1 Slitte e sistemi trainati su solco.....	28

3.3.2 Rover e piattaforme robotiche autonome.....	28
3.4 Confronto tra tecnologie	29
3.4.1 Analisi sinottica dei parametri di performance	29
3.4.2 Limiti e specificità strutturali nel contesto italiano.....	30
CAPITOLO 4 INTEGRAZIONE DEI DATI	32
4.1 Pre-processing dei dati.....	32
4.1.1 Correzione dei dati satellitari: dal TOA al BOA.....	32
4.1.2 Pre-processing dei dati prossimali: filtraggio e pulizia statistica.....	33
4.2 Filtraggio e pulizia	33
4.2.1 Identificazione degli outlier globali e locali	34
4.2.2 Algoritmi di smooth e riduzione del rumore di fondo	34
4.3 Normalizzazione e armonizzazione	35
4.3.1 Normalizzazione statistica dei vettori numerici.....	35
4.3.2 Armonizzazione radiometrica e ricampionamento spaziale	36
4.4 Integrazione multi-sorgente	37
4.4.1 Livelli di fusione e architetture computazionali	37
4.4.2 Algoritmi di integrazione nella ricerca italo-europea	38
CAPITOLO 5 GEOSTATISTICA.....	39
5.1 Geostatistica.....	39
5.2 Evoluzione storica in ambito agro-pedologico	39
5.3 <i>Fondamenti teorici geostatistica</i>	40
5.4 Gestione dell'incertezza e obiettivi agronomici	40
CAPITOLO 6 DELINEAZIONE DELLE ZONE OMOGENEE	41
6.1 Clustering (K-means, Fuzzy C-means).....	41
6.1.1 Algoritmo K-means (Clustering Esclusivo).....	41
6.1.2 Algoritmo Fuzzy C-means (Clustering Sfocato)	42
6.1.3 Determinazione del numero ottimale di zone omogenee.....	42
6.2 Validazione delle zone	43
CAPITOLO 7 MATERIALI E METODI	45
7.1 Descrizione dell'azienda.....	45
7.2 Descrizione sito sperimentale	45
7.3 Gestione agronomica	46
7.4 Overview del workflow	47
7.4.1 Rilievo con drone.....	48

7.4.2 Mappatura del suolo.....	49
7.4.3 Geostatistica & Zonizzazione	52
7.4.4 Pianificazione dei punti di campionamento del suolo & analisi del suolo	52
7.4.5 Bilancio dell'azoto & Mappa di prescrizione	53
CAPITOLO 8 RISULTATI	55
8.1 Mappatura con drone	55
8.2 Mappatura del suolo & Zone Omogenee	56
8.3 Analisi del suolo	60
8.4 Bilancio dell'azoto & mappa di prescrizione.....	61
CAPITOLO 9 DISCUSSIONI	70
CAPITOLO 10 CONCLUSIONI	72
BIBLIOGRAFIA	73

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 Confronto tra metodi di rilievo	30
Tabella 2 Gestione agronomica del sito sperimentale.....	47
Tabella 3 Risultati analisi del suolo	61
Tabella 4 Confronto tra costi	69

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 Strumento per misurare EC	25
Figura 2 Misurazione con slitta.....	28
Figura 3 Posizione sito sperimentale	46
Figura 4 Dettaglio satellitare del sito sperimentale.....	46
Figura 5 Trivella a carotaggio per prelievi di suolo.....	48
Figura 6 Drone DJI Mavic 3M.....	48
Figura 7 Strumento in azione nel sito sperimentale	49
Figura 8 Remote controller della sonda tiny explorer.....	50
Figura 9 Strumento assemblato.....	51
Figura 10 Passate lungo il campo	51
Figura 11 Processo fotogrammetrico	55
Figura 12 Punti analisi e valore della conducibilità elettrica	56
Figura 13 Variogramma sperimentale della conducibilità e il modello spaziale Matern campo A.....	57
Figura 14 Variogramma sperimentale della conducibilità e il modello spaziale Matern campo B	58
Figura 15 Mappa conducibilità elettrica del suolo.....	59
Figura 16 Mappa zone omogenee e relativi punti di campionamento	60
Figura 17 Quantità di P2O5 necessaria per il mais	71

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

PAC	POLITICA AGRICOLA COMUNE
AP	AGRICOLTURA DI PRECISIONE
ISPA	INTERNATIONAL SOCIETY OF PRECISION AGRICULTURE
GPS	GLOBAL POSITIONING SYSTEM
SAPR	SISTEMI AEROMOBILI A PILOTAGGIO REMOTO
GNSS	GLOBAL NAVIGATION SUPPORT SYSTEM
N	AZOTO

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Nel corso del XXI secolo, il settore agricolo globale si trova ad affrontare una duplice sfida senza precedenti. Da un lato, la crescita demografica mondiale che secondo le stime della FAO porterà la popolazione vicina ai 10 miliardi di individui entro il 2050, i cambiamenti climatici, la scarsità idrica e il progressivo degradamento dei suoli richiedono una transizione drastica verso pratiche a ridotto impatto ambientale, in linea con gli obiettivi del Green Deal europeo.

Il GREEN DEAL è un vero e proprio patto verde caratterizzato da una serie di azioni di varia natura necessarie per costruire una nuova economia sostenibile e competitiva. Il percorso è stato intrapreso nel 2019, anno in cui il Consiglio Europeo ha approvato l'obiettivo cardine di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 attraverso la cosiddetta "transizione verde". Il settore dell'agricoltura dovrà garantire sicurezza alimentare ed essere resiliente nei confronti dei cambiamenti climatici; inoltre, si richiede agli agricoltori di adottare sistemi colturali con una impronta ambientale ridotta e assicurare una transizione verso la sostenibilità.

In questo contesto, l'Agricoltura di Precisione (AdP) definita dalla International Society of Precision Agriculture (ISPA) come una strategia di gestione che raccoglie, elabora e analizza dati temporali, spaziali e individuali per sostenere le decisioni aziendali rappresenta una rivoluzione tecnologica e metodologica. Il principio cardine dell'AdP si riassume nel fare "la cosa giusta, al momento giusto, nel posto giusto".

Questo approccio si basa sul riconoscimento della variabilità spaziale e temporale intrinseca ai sistemi colturali (proprietà del suolo, vigore vegetativo, attacchi patogeni). Grazie all'integrazione di tecnologie abilitanti come i sistemi di posizionamento satellitare (GNSS), la sensoristica prossimale e remota (droni, satelliti come Sentinel), i sistemi informativi geografici (GIS) e le macchine operanti a rateo variabile (VRT), l'agricoltura di precisione permette di modulare gli input agronomici in base alle reali esigenze della pianta. L'agricoltura convenzionale, basata su una gestione uniforme dei fattori di produzione (acqua, fertilizzanti, fitofarmaci) sull'intera superficie parcellare, non è più sostenibile né dal punto di vista ecologico né da quello economico, a causa dell'inefficiente allocazione delle risorse e del rischio di inquinamento delle falde acquifere.

L'obiettivo della tesi è validare agronomicamente una metodologia basata sull'uso combinato della mappatura della conducibilità elettrica del suolo, delle analisi del suolo per la generazione di una mappa di prescrizione per la gestione della concimazione azotata.

Capitolo 1

AGRICOLTURA DI PRECISIONE E FONDAMENTI

1.1 Definizione e principi

L'agricoltura di precisione (detta anche Precision Agriculture o Precision Farming) si sviluppa a partire dalla fine del XX secolo con lo scopo di favorire una gestione agricola basata sulle tecnologie digitali che permettono di migliorare i processi di produzione e aumentare la redditività attraverso la minimizzazione dei danni ambientali e la preservazione degli standard qualitativi dei prodotti agricoli (Trivelli, L. et al, 2019).

Le tecnologie digitali aprono le porte alla possibilità di rendere mirati i processi di produzione agricola, attraverso le effettive esigenze colturali e le caratteristiche biologiche chimiche e fisiche del suolo.

Esistono diverse definizioni del concetto di agricoltura di precisione, i quali la definiscono come: una strategia di gestione che raccoglie, elabora e analizza dati temporali, spaziali e individuali relativi a piante e animali, combinandoli con altre informazioni per supportare le decisioni gestionali in base alla variabilità stimata, al fine di migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse, la produttività, la qualità, la redditività e la sostenibilità della produzione agricola. (<https://ispag.org>).

1.2. Evoluzione storica

Nel corso degli anni si sono susseguite varie definizioni che hanno consentito di ampliare gli ambienti di applicazioni delle fondamenta dell'AdP fino a rilevare, tra gli altri, i processi di decision making ed i concetti della sostenibilità economica ed ambientale. L'origine dell'agricoltura di precisione risale agli anni '90 anche se, dopo aver superato l'entusiasmo iniziale, le applicazioni ad oggi risultano abbastanza limitate e caratterizzate da un percorso di sviluppo irregolare sia dal punto di vista grafico che temporale.

1.3. L'agricoltura di precisione nel mondo

“La precision farming non è più una scommessa ma una realtà consolidata che sta ridisegnando la produzione alimentare globale. Spinta dalla necessità di nutrire una popolazione mondiale in crescita e di rispondere ai cambiamenti climatici, l'integrazione di sistemi intelligenti e punta ad ottimizzare le risorse naturali e i fattori produttivi (FAO, 2023)”.

L'obiettivo dell'agricoltura 4.0 è: “Fare la cosa giusta, nel posto giusto, al momento giusto, riducendo gli sprechi e massimizzando la resa per ettaro attraverso un approccio basato sui dati”.

La ramificazione di queste tecnologie non è omogenea, riflette le caratteristiche geografiche, economiche e culturali delle diverse macroaree globali:

- **Nord America** (Stati Uniti e Canada)

Rappresenta storicamente il leader del mercato favorito da immensi appezzamenti di terreno e coltivazione estensive (mais, soia, grano), ha guidato l'adozione di trattori con guida satellitare automatica GPS/RTK e sistemi di semina a rateo variabile (VRT) (Yu et al., 2026).

- **Europa**

L'approccio europeo è fortemente orientato alla sostenibilità e alla riduzione degli input chimici, in stretta linea con le direttive del green deal europeo e della strategia Farm to Fork (Nyèki et al., 2026). Data la frammentazione strutturale dei terreni europei l'attenzione si concentra su sensori per l'irrigazione mirata e sistemi di supporto alle decisioni (DSS) (Osservatorio Smart Agrifood, 2025).

- **America Latina** (Brasile e Argentina)

Grandi esportatori globali di commodity agricole. Il Brasile in particolare utilizza costellazioni satellitari e droni per monitorare le macro-coltivazioni di canna da zucchero e soia, ottimizzando la logistica e i trattamenti di larga scala (Yu et al., 2026).

- **Asia-Pacifico**

Cina e India stanno spingendo forte sull'automazione per compensare la riduzione della manodopera rurale. In tali aree, la diffusione di piccoli droni destinati ai trattamenti mirati con agrofarmaci e l'integrazione di sensori a basso costo nelle risaie stanno trasformando radicalmente la gestione dell'agricoltura parcellizzata (smallholder farming) (Saiz et al., 2026). Per certi versi situazione simile a quella dell'agricoltura marchigiana.

L'agricoltura di precisione nasce tra la fine degli anni '80 e l'inizio degli anni '90 come reazione ai limiti della "rivoluzione verde" che aveva massimizzato le rese trattando i campi in modo uniforme ignorando la naturale eterogeneità del terreno.

L'evoluzione storica si è sviluppata attraverso delle tappe fondamentali:

- **I primi sensori del suolo (fine anni '80)**

Compaiono i primi sensori commerciali per la misurazione della conduttività elettrica nel suolo e i primi microprocessori a bordo macchina.

I ricercatori iniziano a mappare la variabilità geologica dei campi. (Stafford, 2000).

- **L'evoluzione del GPS (anni '90)**

L'apertura del segnale GPS al settore civile cambia tutto. Diventa possibile georeferenziare i dati: nascono le prime mappe di resa e i sistemi di guida assistita per le trattrici, formalizzando la nascita della disciplina (National research Council, 1997).

- **Standardizzazione e ISOBUS (anni 2000)**

Il settore si scontra con l'incompatibilità tra marchi diversi. L'introduzione del protocollo standard internazionale ISO11783 (noto come ISOBUS) permette alla trattrice ed attrezzature di scambiarsi dati in tempo reale (Oksanen et al, 2005).

- **Droni, satelliti e l'era 4.0 (anni 2010 ad oggi)**

Con la disponibilità di droni a basso costo, costellazioni satellitari (programma europeo Copernicus) e indice di vigore vegetativo (NDVI) permettono il monitoraggio continuo delle colture. L'agricoltura di precisione evolve nell'agricoltura 4.0, caratterizzata da cloud e big data (Mulla, 2013).

1.4. Agricoltura di precisione in Italia

Sebbene non esistano dati ufficiali che quantifichino direttamente la quota di SAU gestita con tecniche di Agricoltura di Precisione e non esiste, ad oggi, alcuna fonte istituzionale che pubblichi direttamente la percentuale di SAU italiana gestita con tecniche di Agricoltura di Precisione., sappiamo però che il 72% delle aziende usa almeno una tecnologia 4.0 (Osservatorio Smart Agrifood 2024). Ma questo dato riguarda le aziende, non la superficie. L'incrocio tra la struttura fondiaria italiana — pari a 12,5–12,8 milioni di ettari secondo il settimo Censimento Generale dell'Agricoltura (ISTAT, 2021; ISTAT, 2024) — e i tassi di adozione delle tecnologie 4.0, che coinvolgono il 72% delle aziende agricole italiane (Osservatorio Smart Agrifood, 2024), indica che la superficie effettivamente gestita con pratiche di AP può essere stimata attorno al 10% della SAU nazionale. L'applicazione di queste innovazioni sul territorio italiano seguono dinamiche strettamente legate alla tipologia colturale e alla geografia del paese:

- **Comparto estensivo Nord Italia**

Nelle grandi pianure della Valle Padana, l'integrazione di sistemi GNSS con correzione RTK, la mappatura delle rese e la distribuzione di input a rateo variabile (VRA) su colture come mais, riso e frumento rappresentano soluzioni consolidate per far fronte agli aumenti dei costi delle materie prime (Casa et al., 2019).

- **Coltura ad alto valore aggiunto (Centro Sud e Aree collinari)**

Il modello italiano si distingue a livello internazionale per l'applicazione dell'agricoltura di precisione nella viticoltura d' eccellenza, nell' olivicoltura e nella frutticoltura. In questi contesti, l'uso di droni (SAPR) e di sensori prossimale per il monitoraggio degli indici di vigore vegetativo (NDVI) permette di razionalizzare i trattamenti fitosanitari e ottimizzare l'efficienza idrica (Matese A. et al., 2015).

Nonostante questo incremento, sono presenti dei limiti strutturali storici del tessuto produttivo Nazionale. “La ridotta dimensione media delle aziende agricole Italiane (spesso inferiore agli 11 Ha) e l'elevata età media dei conduttori alimentano un forte fenomeno di scetticismo verso queste tecnologie (Viri, 2016).

Ciononostante, tale barriera viene oggi parzialmente aggirata attraverso il ruolo dei contoterzisti e delle imprese di meccanizzazione agricola, capaci di ammortizzare i costi delle tecnologie all' avanguardia offrendo servizi di precisione flessibili anche alla realtà di dimensioni minori (Alasia L. et al., 2017).

1.5. Benefici Agronomici

Possiamo scindere l'Agricoltura di Precisione in due pilastri, il primo ridefinisce l'applicazione degli input agronomici.

L'AdP ridefinisce la gestione agronomica della produzione vegetale scardinando l'approccio tradizionale basato sull'omogeneità dei trattamenti colturali a favore di una gestione sito-specifica. “Il principio cardine dell'AdP applicato all' agronomia risiede nella capacità di identificare, mappare e gestire la variabilità spaziale e temporale all' interno del medesimo appezzamento (Pierce and Nowak, 1999)”. Il cambio di paradigma si può tradurre in una serie di benefici diretti sulla salute del sistema suolo-pianta e sulla qualità delle produzioni. “Il primo e più rilevante beneficio agronomico riguarda l'ottimizzazione dell'efficienza d'uso delle risorse (Resource Use Efficiency- RUE).

Attraverso l'applicazione della tecnologia a rateo variabile i fattori di produzione come fertilizzanti, sementi e acqua non vengono più distribuiti in modo omogeneo, ma distribuiti in maniera mirata sulle esigenze della coltura in atto e alle caratteristiche chimiche e fisiche del suolo, precedentemente rilevate tramite rilievi come: mappatura della conducibilità ed immagini satellitari. Nello specifico:

- Nutrizione minerale mirata: La concimazione azotata a rateo variabile guidata dal monitoraggio in tempo reale dal vigore vegetativo tramite sensori ottici (es. NDVI), permette di evitare sia fenomeni di sotto-concimazione, che limitano il potenziale produttivo, sia gli eccessi di azoto, i quali causano l'allettamento della coltura e una maggiore suscettibilità agli attacchi patogeni e un non efficientamento di esso (Incrocci et al., 2017).
- Gestione efficiente della risorsa idrica: L'irrigazione di precisione (Smart Irrigation), supportata da modelli previsionali DSS e sensori di umidità ipogei consente di irrigare solo e quanto necessario. Questo consente di evitare ristagni radicali che favoriscono lo sviluppo di funghi e marciumi (Matese e Di Gennaro, 2015).

Il secondo pilastro è rappresentato dal miglioramento della protezione delle colture attraverso la difesa fitosanitaria mirata. L'integrazione di stazioni meteo aziendali e modelli epidemiologici consente di anticipare la comparsa delle principali malattie.

Inoltre, l'irrorazione mirata assistita da ugelli intelligenti permette di colpire selettivamente solo le zone colpite o le piante infestanti, riducendo drasticamente il volume complessivo di agrofarmaci distribuito e salvaguardando gli insetti utili.

Infine, l'AdP esercita un impatto significativo sulla qualità e sugli standard del raccolto. La possibilità di monitorare l'evoluzione della maturazione permette di programmare e pianificare i raccolti in modo selettivo, massimizzando le rese ed il valore commerciale del prodotto, nonché l'aspetto qualitativo di esso, come ad esempio il grado zuccherino nella frutta o quello proteico nei cereali.

1.6 Benefici Economici ed Ambientali

L'adozione delle tecnologie di precisione risponde a una duplice e sinergica esigenza del comparto agroalimentare moderno: garantire la redditività finanziaria dell'impresa agricola e al contempo minimizzare l'impatto ecologico delle attività sui sistemi naturali. L'evidenza scientifica dimostra che l'approccio sito-specifico genera benefici eco-efficienti, in cui l'ottimizzazione nell'uso dei fattori produttivi si

traduce simultaneamente in un risparmio monetario e in una tutela ambientale (Schimmelpfennig, 2016; Balafoutis et al 2017).

Il vantaggio più immediato a livello economico è legato alla contrattazione dei costi variabili di gestione “Attraverso l’uso di sistemi di guida satellitare o assistita (GNSS), si azzerano quasi del tutto le sovrapposizioni e i passaggi a vuoto dei mezzi agricoli durante le operazioni di semina, concimazione, diserbo e lavorazione del terreno (Knight et al 2019)”. Ciò, ottimizza i tempi di lavoro ed evita l’usura dei macchinari, genera anche un immediato beneficio ambientale grazie al taglio drastico dei consumi di carburante e alla conseguente riduzione delle emissioni dirette di CO₂.

Il punto di contatto più evidente tra sostenibilità economica ed ambientale si riscontra nella applicazione VRA dell’input chimici. Distribuire i fertilizzanti e prodotti fitosanitari solo dove e quando la coltura ne ha realmente bisogno permette all’agricoltore di abbattere le spese per l’acquisto delle materie prime. (Biermarcher et al., 2009).

L'utilizzo di questa tecnologia impedisce la mala distribuzione di dosi eccessive, che vanno a creare fenomeni di lisciviazione e quindi inquinamento delle falde acquifere e l’emissione di gas serra (in particolare Azoto). I trattamenti fitosanitari mirati riducono la dispersione di sostanze tossiche nell’ambiente salvaguardando la fauna utile. Infine, l’integrazione di sistemi di supporto alle decisioni DSS e di sensoristica per l’irrigazione di precisione consentono di ottimizzare la gestione della risorsa idrica (Matese & Di Gennaro, 2015).

Questa procedura evita così, gli sprechi d’acqua, fattore cruciale per la resilienza economica-aziendale di fronte alle ricorrenti crisi siccitose favorendo la stabilità delle rese e migliorando i rapporti qualitativi del raccolto. In conclusione, l’AdP dimostra che la sostenibilità ambientale non costituisce un limite al profitto, bensì un volano per la competitività e la migrazione del rischio d’impresa (Lowenberg- DeBoer & Erickson, 2019).

Capitolo 2

REMOTE SENSING

2.1 Piattaforme satellitari multispettrali

Nel panorama del telerilevamento spaziale (satellite remote sensing) applicato all'AdP, i sistemi multispettrali rappresentano la tecnologia standard e più capillarmente diffusa per il monitoraggio operativo delle colture (Mulla, 2013). Dal punto di vista fisico, questi sensori quantificano l'energia radiante riflessa dal sistema suolo-vegetazione in un numero discreto e limitato di canali o bande (generalmente compreso tra 3 e 15), caratterizzate da un'ampiezza di banda relativamente larga (tra 10 e 100 nm) e separate da intervalli spettrali non campionati (Chuvieco, 2020).

La configurazione delle bande risponde a specifiche proprietà biofisiche e biochimiche dei tessuti vegetali, posizionandosi in regioni chiave dello spettro elettromagnetico (Jones e Vaughan, 2010):

- Visibile (RGB, 400–700 nm): Intervallo dominato dai picchi di assorbimento dei pigmenti fotosintetici (clorofille a e b) nelle regioni del blu e del rosso, e dal picco di riflettanza nel verde.
- Red-Edge (700–740 nm): Stretta zona di transizione tra l'assorbimento del rosso e lo scattering del vicino infrarosso, considerata un indicatore precoce e altamente sensibile delle variazioni di biomassa e del contenuto di azoto fogliare (Clevers e Kooistra, 2012).
- Infrarosso Vicino (NIR, 750–1300 nm): Regione ad altissima riflettanza, condizionata quasi esclusivamente dalla struttura anatomica interna del mesofillo fogliare e dall'indice di area fogliare (LAI).
- Infrarosso a Onde Corte (SWIR, 1300–2500 nm): Intervallo sensibile allo stato di turgore idrico cellulare e alla presenza di umidità e sostanza organica nei suoli nudi.

2.1.1 Costellazioni operative di riferimento

Il monitoraggio agronomico moderno si appoggia principalmente su due costellazioni istituzionali ad accesso aperto, fondamentali per l'estrazione di serie storiche e indici di vigore:

1. Costellazione Sentinel-2 (ESA / Programma Copernicus): Composta dai satelliti gemelli Sentinel-2A e Sentinel-2B, opera con il sensore MSI (MultiSpectral Instrument). Acquisisce dati in 13 bande spettrali con risoluzioni spaziali geometriche differenziate (10, 20 e 60 metri) e un tempo di rivisita orbitale ottimale di circa 5 giorni alle medie latitudini (Drusch et al., 2012). La peculiarità di Sentinel-2 risiede nell'integrazione di tre bande specifiche nel Red-Edge, che ne fanno lo strumento d'elezione per la diagnostica nutrizionale avanzata, però con risoluzione molto bassa (20x20 m).
2. Programma Landsat (NASA / USGS): Con le recenti missioni Landsat 8 e Landsat 9, i sensori OLI (Operational Land Imager) garantiscono una risoluzione geometrica standard di 30 metri su 9 bande spettrali, offrendo una continuità storica ultradecennale utile per l'analisi della memoria vegetazionale dei suoli (Roy et al., 2014).

A queste piattaforme pubbliche si affiancano costellazioni commerciali (come PlanetScope o WorldView), in grado di offrire risoluzioni spaziali sub-metriche e tempi di rivisita giornalieri (Houborg e McCabe, 2018).

2.2 Analisi radiometrica e indici vegetazionali (NDVI, NDRE, SAVI)

L'estrazione di informazioni biofisiche dalle matrici di riflettanza satellitare si basa sull'applicazione di indici spettrali. Nell'ambito dell'AdP, la scelta dell'indice più idoneo è strettamente subordinata allo stadio fenologico della coltura e alla quota di suolo nudo esposta all'intercettazione del sensore (Mulla, 2013). I tre algoritmi più usati per la caratterizzazione della chioma colturale sono l'NDVI, l'NDRE e il SAVI.

2.2.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

L'NDVI (Rouse et al., 1974) sfrutta il forte contrasto radiometrico tra l'assorbimento della luce nel rosso ($RED \sim 660 \text{ nm}$), operato dai pigmenti fotosintetici, e la forte riflettanza nel vicino infrarosso ($NIR \sim 840 \text{ nm}$), indotta dallo scattering strutturale del mesofillo fogliare:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

I valori dell'indice sono matematicamente confinati nell'intervallo $[-1, +1]$. In ambito agricolo, il suolo nudo presenta generalmente valori prossimi allo zero (0 ± 0.1), mentre la vegetazione in base alla coltura e stadio fenologico genera valori compresi tra 0.6 e 0.9. Sebbene l'NDVI sia un eccellente predittore della biomassa e della copertura del suolo, esso soffre di un noto limite intrinseco: il fenomeno di saturazione asintotica ad alti valori di Leaf Area Index ($LAI > 3$). Oltre questo limite, l'incremento di biomassa non si traduce in un aumento proporzionale dell'indice, riducendone l'efficacia nelle fasi fenologiche avanzate (Gitelson, 2004).

2.2.2 Normalized Difference Red Edge Index (NDRE)

Per superare i vincoli di saturazione strutturale dell'NDVI, l'NDRE (Clevers e Kooistra, 2012) sostituisce la banda del rosso con quella del Red-Edge (RE ~ 705 740nm), ovvero la stretta regione di transizione elettronica dello spettro:

$$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE}$$

La radiazione nella lunghezza d'onda del Red-Edge possiede una capacità di penetrazione nei tessuti fogliari decisamente superiore rispetto al rosso. L'NDRE si dimostra così linearmente correlato al contenuto di azoto e di clorofilla totale anche all'interno di canopy chiuse e dense. Rappresenta l'indice d'elezione per la mappatura dello stato nutrizionale tardivo (es. concimazione di levata nei cereali) e per la modulazione dei modelli predittivi di concimazione a rateo variabile (VRA).

2.2.3 Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)

Nelle prime fasi di emergenza della coltura o nel caso di impianti arborei a filare, l'effetto di background del suolo altera significativamente il valore di riflettanza del pixel misto. Il SAVI (Huete, 1988) introduce un fattore di correzione empirico L per isolare il segnale puramente vegetativo:

$$SAVI = \frac{(NIR - RED) \cdot (1 + L)}{NIR + RED + L}$$

Il parametro L agisce da smorzatore delle interazioni radiometriche di fondo. Viene impostato al valore standard di 0.5 nella maggior parte dei contesti operativi di copertura parziale, convergendo verso 1 per suoli quasi nudi e verso 0 (coincidendo

di fatto con l'NDVI) solo a copertura totale avvenuta. L'impiego del SAVI riduce drasticamente gli errori di sovrastima o sottostima del vigore causati dalle variazioni transitorie dell'umidità del suolo o della rugosità del terreno.

2.3 Applicazioni per la variabilità del suolo

La caratterizzazione della variabilità spaziale delle proprietà chimico-fisiche del suolo rappresenta il prerequisito fondamentale per la delineazione delle zone di gestione omogenee (MZ) e per l'applicazione dei fattori di produzione a rateo variabile (VRA). Nel contesto del telerilevamento satellitare, la mappatura della variabilità edafica si articola principalmente attraverso due approcci metodologici: l'analisi diretta del suolo nudo e l'analisi indiretta mediata dalla risposta della copertura vegetale (Mulder et al., 2011).

2.3.1 Analisi diretta tramite firma spettrale del suolo nudo

L'osservazione diretta delle superfici edafiche richiede l'acquisizione di immagini satellitari in finestre temporali specifiche, tipicamente coincidenti con le fasi di presemina o post-raccolta, in cui l'indice di copertura vegetale è prossimo allo zero. In queste condizioni, la riflettanza del suolo nudo nelle regioni dello spettro del visibile (RGB), del vicino infrarosso (NIR) e dell'infrarosso a onde corte (SWIR) è governata da quattro proprietà intrinseche (Ben-Dor et al., 2009):

1. **Contenuto di Sostanza Organica del Suolo (SOM):** Un incremento della SOM determina un abbassamento generalizzato della curva di riflettanza (effetto di scurimento) lungo tutto lo spettro ottico, particolarmente evidente nella banda del visibile.
2. **Umidità superficiale:** L'acqua libera presente nei primi millimetri di suolo assorbe fortemente la radiazione elettromagnetica, generando marcate bande di assorbimento nello SWIR (attorno a 1450 nm e 1940 nm) e riducendo la riflettanza complessiva.
3. **Tessitura e rugosità:** Suoli a tessitura grossolana (sabbiosi) tendono a riflettere maggiormente la radiazione rispetto a suoli argillosi o fortemente zollati, a causa dei differenti fenomeni di scattering geometrico.
4. **Contenuto di ossidi di ferro:** La presenza di ematite o magnetite induce specifici picchi di assorbimento nella regione del blu e del verde, alterando i rapporti spettrali nel visibile.

Per isolare la variabilità edafica stabile dai fattori transitori (come l'umidità istantanea indotta da un evento piovoso), la ricerca moderna utilizza algoritmi di composizione multi-temporale, come il Bare Soil Composite (BSC). Questi modelli estraggono i

pixel di suolo nudo da serie storiche pluriennali, generando una mappa di riflettanza statica altamente correlata alla tessitura e alla topografia del terreno (Dematté et al., 2014).

2.3.2 Analisi indiretta mediante memoria storica vegetazionale

Nei contesti operativi in cui il suolo non è mai completamente esposto (es. praterie permanenti, sistemi forestali o colture a copertura fitta), l'eterogeneità del profilo edafico viene indagata indirettamente attraverso lo studio della stabilità spaziale della vegetazione.

Il principio si basa sull'assunto che le caratteristiche fisiche stabili del suolo (capacità di ritenzione idrica, profondità utile per le radici, presenza di strati compatti) agiscano da fattori limitanti per lo sviluppo della biomassa colturale, specialmente in condizioni di stress idrico o termico (un'applicazione approfondita di questi concetti geostatistici e di stima stocastica verrà trattata nei successivi Capitoli 5 e 6). Attraverso l'analisi di serie temporali storiche di indici di vigore (es. NDVI multi annuo), è possibile mappare le aree del campo che mostrano una persistente sottoperformance o sovraperformance vegetativa, convertendo la risposta biologica della pianta in un indicatore proxy delle proprietà idrologiche e chimiche del suolo sottostante (Basso et al., 2012).

2.4 Limiti e potenzialità

L'efficacia del telerilevamento satellitare nell'agricoltura di precisione è definita da un delicato equilibrio tra vincoli tecnologici intrinseci e opportunità applicative emergenti (Mulla, 2013). Nel contesto europeo, caratterizzato da una spiccata frammentazione parcellare e da una forte eterogeneità climatica rispetto ai sistemi estensivi nordamericani, l'analisi critica di questi fattori assume una rilevanza strategica per l'adozione delle linee guida della Politica Agricola Comune (PAC) e del Green Deal (European Commission, 2020).

2.4.1 Limiti intrinseci e colli di bottiglia tecnologici

L'utilizzo operativo dei dati satellitari ottici deve confrontarsi con limitazioni fisiche, geometriche e logistiche strutturali:

- **Vincoli climatico-atmosferici e persistenza nuvolosa:** I sensori operanti nello spettro ottico non sono in grado di penetrare la copertura nuvolosa. Nelle regioni dell'Europa centrale e settentrionale, la frequenza di cieli coperti durante le fasi

fenologiche critiche invernali e primaverili costituisce un grave limite, interrompendo la continuità delle serie temporali necessarie per i modelli previsionali (Sudmanns et al., 2020).

- **Il problema del frazionamento fondiario (Risoluzione Spaziale):** Molti comprensori agricoli europei (in particolare nel bacino del Mediterraneo) presentano appezzamenti di dimensioni ridotte, spesso inferiori all'ettaro. Con la risoluzione geometrica di 10–20 metri di Sentinel-2, l'incidenza dei "pixel misti" lungo i confini delle parcelle o nei sistemi interfilari riduce drasticamente l'accuratezza del dato puro rispetto alle costellazioni commerciali sub-metriche a pagamento (Sozzi et al., 2020).
- **Saturazione spettrale della canopy:** Come evidenziato dalla letteratura agronomica continentale, gli indici spettrali standard (es. NDVI) manifestano una saturazione asintotica precoce in presenza di colture a biomassa densa o ad alto indice di area fogliare ($LAI > 3$), limitando la stima dei fabbisogni di azoto nelle fasi riproduttive avanzate (Gitelson, 2004).

2.4.2 Potenzialità applicative e framework europei

A fronte dei limiti fisici dei sensori, le piattaforme satellitari offrono eccezionali vantaggi in termini di scalabilità, sostenuti dalle politiche di innovazione digitale dell'Unione Europea:

- **La democratizzazione del dato (Open Data Policy):** Il programma europeo Copernicus, attraverso la politica di accesso libero e gratuito ai dati Sentinel, ha rimosso le barriere economiche d'ingresso per le piccole e medie imprese agrotecniche, stimolando la nascita di servizi di monitoraggio commerciale diffuso (es. i servizi nazionali di advisory agrario) (Inglada et al., 2017).
- **Monitoraggio della conformità e sostenibilità (Space-to-Farm):** Le serie storiche satellitari pluriennali permettono di tracciare la memoria vegetazionale del suolo e di verificare pratiche sostenibili come la rotazione colturale o il mantenimento del green cover invernale, rispondendo ai requisiti di condizionalità della PAC stabiliti dal Sistema di Monitoraggio delle Superfici (Area Monitoring System - AMS) (Nutini et al., 2021).
- **Sinergie multi-sensore e Data Fusion:** La ricerca europea (finanziata dai programmi Horizon 2020 e Horizon Europe) è focalizzata sull'abbattimento del limite nuvoloso tramite la fusione dei dati ottici con i dati radar ad apertura sintetica (SAR) di Sentinel-1. I sensori SAR, operando nelle microonde, sono insensibili alle nubi e

forniscono informazioni strutturali sulla rugosità del suolo e sul turgore della biomassa, abilitando un monitoraggio continuo indipendentemente dalle condizioni meteorologiche (Veloso et al., 2017).

Capitolo 3

PROXIMAL SENSING

3.1 Sensori di conducibilità elettrica (EC)

Nel contesto dell'AdP, la caratterizzazione della variabilità spaziale e temporale delle proprietà chimico-fisiche del terreno rappresenta un prerequisito fondamentale per l'ottimizzazione degli input agronomici (Bisaglia, 2018). Tra le tecnologie di sensoristica on-the-go e non distruttive, la mappatura della conducibilità elettrica apparente del suolo (EC_a, dall'inglese Apparent Soil Electrical Conductivity) ha assunto un ruolo preminente grazie alla sua rapidità di esecuzione, economicità e capacità di generare mappe ad alta risoluzione spaziale (Sudduth et al., 2003; Corwin e Lesch, 2005).

La conducibilità elettrica rappresenta la misura dell'attitudine di un materiale a condurre una corrente elettrica. Nel sistema suolo, l'elettricità si propaga attraverso tre vie principali: la fase liquida (acqua libera nei micropori contenente ioni disciolti), la fase solida (contatto diretto tra le particelle del terreno) e l'interfaccia solido-liquido, governata principalmente dalle cariche superficiali dei colloidi (Corwin e Search, 2016).

Di conseguenza, l'EC_a misurata in campo non risponde a un singolo fattore, ma costituisce un indicatore integrato di diverse proprietà edafiche interconnesse:

1. Tessitura del suolo: I terreni argillosi, caratterizzati da un'elevata superficie specifica e da un'alta Capacità di Scambio Cationico (CSC), presentano valori di conducibilità nettamente superiori rispetto ai terreni sabbiosi, dove il contatto particella-particella è limitato (AHDB, 2026).
2. Contenuto idrico: L'acqua funge da mezzo di propagazione degli ioni. A parità di matrice solida, l'incremento dell'umidità del suolo determina un aumento lineare o esponenziale dell'EC_a (Sudduth et al., 2005).
3. Salinità e concentrazione ionica: La presenza di sali solubili nella soluzione circolante (es. Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺, NO₃⁻) aumenta la densità di carica libera, influenzando drasticamente il segnale elettrico, aspetto cruciale sia nei contesti aridi sia per il monitoraggio dello stato nutrizionale della coltura (HH Publisher, 2025).

4. Contenuto di sostanza organica e densità apparente: Influenzano indirettamente la porosità e la ritenzione idrica del mezzo, modificando la geometria dei percorsi di conduzione (Adamchuk et al., 2004).

3.1.1 Tecnologie di acquisizione del dato

L'acquisizione georeferenziata dell'EC_a avviene principalmente mediante l'utilizzo di due macrocategorie di sensori accoppiati a sistemi Global Navigation Satellite Systems (GNSS):

- Metodo a contatto (Galvanico): Prevede l'impiego di dischi metallici che penetrano nel terreno fungendo da elettrodi. Una coppia di elettrodi immette una corrente elettrica alternata nel suolo, mentre le restanti coppie misurano la caduta di potenziale. La profondità di indagine è determinata dalla spaziatura geometrica degli elettrodi stessi (es. sistema Veris) (Sudduth et al., 2003).
- Metodo non a contatto (Induzione Elettromagnetica - EMI): Si basa sui principi dell'elettromagnetismo d'alto dettaglio nel dominio della frequenza (FDEM). Lo strumento, mantenuto a una distanza fissa dal suolo (o trainato su slitte non metalliche), genera un campo magnetico primario tramite una bobina trasmittente. Tale campo induce nel sottosuolo delle correnti, le quali a loro volta generano un campo magnetico secondario. La bobina ricevente dello strumento rileva entrambi i campi; il rapporto tra il campo secondario e quello primario risulta direttamente proporzionale all'EC_a del mezzo (McNeill, 1980; Censini, 2019). Strumenti come il Geonics EM38 o il CMD Tiny consentono indagini multi-profondità simultanee (Pennesi, 2026).



Figura 1 Strumento per misurare EC

La finalità ultima della mappatura dell'EC_a risiede nella "zonazione" dell'appezzamento agricolo, ossia nell'individuazione di sotto-aree omogenee (Management Zones - MZs). Tali mappe di prescrizione guidano il campionamento mirato del suolo (ground-truthing) e consentono l'applicazione a rateo variabile (VRA) di acqua, fertilizzanti e sementi, minimizzando l'impatto ambientale e massimizzando l'efficienza d'uso delle risorse (Adamchuk et al., 2004; Misturini, 2025).

3.2 Sensori ottici e NIR

Nell'ambito del rilevamento prossimale (proximal sensing), i sensori ottici operanti nelle regioni del visibile (VIS) e del vicino infrarosso (NIR, 750–2500 nm) costituiscono strumenti chiave sia per la caratterizzazione biofisica della vegetazione in tempo reale, sia per l'analisi dinamica delle proprietà chimico-fisiche dei suoli (Stenberg et al., 2010). A differenza dei sistemi satellitari, i sensori prossimali operano a distanze millimetriche o centimetriche dal target (nel caso di sensori per il suolo) o a pochi metri dalla chioma (nel caso di sensori installati su trattrice). Questo azzerava l'effetto di disturbo dell'atmosfera e garantisce risoluzioni spaziali sub-centimetriche (Mulla, 2013).

La tecnologia si articola in due configurazioni principali a seconda del target investigato: i sensori di vigore per la vegetazione operanti in continuo (on-the-go) e gli spettrometri NIR per la caratterizzazione diretta del suolo.

3.2.1 Sensori ottici attivi per il monitoraggio della vegetazione

Nel monitoraggio della chioma colturale, i dispositivi più diffusi in Europa sono i **sensori ottici attivi (AOS)**, di cui i sistemi Yara N-Sensor, GreenSeeker e Crop Circle rappresentano gli standard commerciali (Biermacher et al., 2009).

La caratteristica fondamentale dei sensori attivi risiede nella presenza di una sorgente luminosa interna modulata (LED o lampade allo xeno). Il sensore emette impulsi di luce a lunghezze d'onda specifiche (generalmente Rosso, Red-Edge e NIR) e misura la frazione di radiazione riflessa dalla vegetazione. Questo approccio ingegneristico offre due vantaggi cruciali rispetto al telerilevamento passivo:

- **Indipendenza dalla luce solare:** I sensori possono operare in qualsiasi condizione di illuminazione naturale, comprese giornate totalmente nuvolose o ore notturne, eliminando gli errori di calibrazione dovuti all'irradianza solare cangiante.

- **Calcolo degli indici in tempo reale:** Consentono l'integrazione diretta con gli spandiconcime a rateo variabile (VRA). Il sistema acquisisce l'indice di vigore (es. NDVI o NDRE), lo elabora istantaneamente tramite un algoritmo agronomico di bordo e modula l'apertura delle valvole di distribuzione dell'azoto nello stesso passaggio (real-time sensing and weeding/fertilizing).

3.2.2 Spettroscopia Vis-NIR applicata al suolo

L'applicazione della spettroscopia nel vicino infrarosso per l'analisi edafica si basa sui principi della spettrofotometria di riflettanza diffusa. Quando la radiazione NIR investe un campione di suolo, l'energia viene assorbita in corrispondenza delle frequenze vibratorie molecolari (overtone e combinazioni di bande) dei legami chimici funzionali, principalmente O-H, C-H, N-H e C=O (Viscarra Rossel et al., 2006).

I sensori ottici prossimali per il suolo possono essere utilizzati in situ tramite slitte trainate che aprono un piccolo solco nel terreno, esponendo un profilo fresco alla finestra ottica del sensore protetta da un vetro zaffiro. L'analisi dello spettro di riflettanza continuo consente di stimare simultaneamente, previa calibrazione chemiometrica (es. modelli PLSR o Random Forest) molto complessa e per questo poco utilizzati, parametri edafici complessi:

1. **Sostanza Organica del Suolo (SOM):** Legata agli assorbimenti dei gruppi idrossilici, alifatici e aromatici del carbonio organico nelle regioni attorno a 1100 nm, 1600 nm e 2200 nm.
2. **Umidità edafica:** Identificata dalle bande di assorbimento dominanti dell'acqua a 1450 nm e 1940 nm.
3. **Proprietà tessiturali:** La presenza di minerali argillosi (es. caolinite, illite) genera specifici picchi di assorbimento diagnostici a 2200 nm indotti dalle vibrazioni del legame Al-O-H.

In Europa, lo sviluppo di librerie spettrali continentali (come la LUCAS topsoil database gestita dal Joint Research Centre - JRC) ha dato un forte impulso a questa tecnologia, consentendo di standardizzare i modelli di calibrazione spettrale per predire la qualità dei suoli europei e ridurre drasticamente la necessità di analisi chimiche tradizionali distruttive (Wetzel et al., 2021).

3.3 Slitte, rover e sistemi trainati

L'efficacia dei sensori prossimali (come EC_a) dipende dalla stabilità della piattaforma meccanica deputata al loro avanzamento. Nella ricerca e nell'industria meccanico-agraria

europea, i sistemi si dividono in **piattaforme trainate passive** e **vettori robotizzati autonomi (rover)** (Kuennen et al., 2020), progettati per garantire l'accoppiamento costante con il suolo e la georeferenziazione centimetrica mediante GNSS-RTK.

3.3.1 Slitte e sistemi trainati su solco

I sistemi trainati da trattrici o quad rappresentano la tecnologia standard per i monitoraggi aziendali su larga scala, operando secondo due configurazioni:

- **Slitte superficiali (contactless):** Impiegate principalmente per i sensori ad induzione elettromagnetica (EMI). Il sensore è alloggiato in uno chassis di polietilene ad alta densità (HDPE) privo di componenti metallici per azzerare le interferenze magnetiche, e viene trascinato a terra a velocità elevate (7–15 km/h) (Heil e Schmidhalter, 2017).



Figura 2 *Misurazione con slitta*

Sistemi a vomeri penetranti: Utilizzati per la spettroscopia NIR in-situ. Un piccolo vomere apre un solco profondo 5–10 cm, proteggendo al suo interno la finestra ottica del sensore che scansiona la sezione di suolo fresco prima della richiusura del solco (Mouazen et al., 2007). Questa modalità richiede alta potenza di trazione ed è limitata da suoli eccessivamente umidi o scheletrici.

3.3.2 Rover e piattaforme robotiche autonome

Finanziati dai programmi europei (es. Horizon Europe e la rete AgROBOfood), i **veicoli terrestri autonomi (UGV - Unmanned Ground Vehicles)** stanno ridefinendo il campionamento prossimale (Rsham et al., 2022).

Dotati di propulsione elettrica, pneumatici a bassa pressione (per minimizzare il soil compaction) e navigazione integrata LiDAR/RTK, i rover offrono vantaggi unici:

- **Costanza cinematica:** L'avanzamento a velocità e traiettoria costanti azzerare gli errori sistematici nei dati spettrali causati dalle accelerazioni repentine dei mezzi tradizionali.
- **Automazione sostenibile:** Operando a emissioni zero e senza operatore, consentono rilievi continui.
- **Adattabilità geometrica:** I vettori ad alta luce libera (high-clearance) permettono il monitoraggio interfilare anche in stadi fenologici avanzati o in vigneti storici europei, evitando danni da calpestamento (Vrochidou et al., 2022).

3.4 Confronto tra tecnologie

La scelta e l'integrazione delle tecnologie di monitoraggio nell'Agricoltura 4.0 richiedono un'analisi comparativa dei vettori in funzione degli obiettivi agronomici, della scala aziendale e dei vincoli ambientali. Il confronto tra le piattaforme satellitari multispettrali e i sensori prossimali (EC, Vis-NIR) si articola su tre pilastri geometrico-operativi: la risoluzione spaziale, la tempestività del dato (risoluzione temporale) e la natura dell'informazione estratta (Mulla, 2013).

3.4.1 Analisi sinottica dei parametri di performance

Come evidenziato dai principali gruppi di ricerca italiani ed europei (es. Casa et al., 2018; Sartori et al., 2021), le due macrocategorie tecnologiche presentano caratteristiche marcatamente complementari:

Tabella 1 Confronto tra metodi di rilievo

Parametro di confronto	Telerilevamento Satellitare (es. Sentinel-2)	Rilievi con Drone (APR)	Sensori Prossimali (es. Sistemi trainati/Rover)
Risoluzione Spaziale	Decametriche (10--20 m); presenza frequente di pixel misti nei confini parcellari e interfilare.	Centimetrica (2-10 cm); consente di isolare la sola chioma attiva escludendo l'interfilare inerbito o il suolo nudo.	Sub-centimetrica o millimetrica; massima accuratezza sul dettaglio del filare/suolo.
Risoluzione Temporale	Vincolata all'orbita (5 giorni) e fortemente condizionata dalla presenza di nuvolosità.	Svincolata da orbite; programmabile on-demand dall'operatore.	Svincolata da dinamiche orbitali; programmabile on-demand dall'operatore.
Profondità di Indagine	Esclusivamente superficiale (interazione ottica con lo strato superiore della canopy o i primi millimetri di suolo nudo).	Esclusivamente superficiale (interazione ottica/termica limitata alla parte aerea della vegetazione o alla superficie del terreno).	Tridimensionale e (volumetrica fino a 5 m di profondità per i sensori di conducibilità (EC _a).
Costo Operativo	Nulla o marginale per dati istituzionali aperti (es. Programma Copernicus).	Medio-elevato; richiede l'investimento per il drone e le camere (multispettrali/termiche), i costi di licenza di volo e il tempo per il data-processing.	Elevato investimento iniziale per l'hardware; costi di esercizio legati al cantiere meccanico, all'operatore e all'elaborazione e restituzione dei dati.

3.4.2 Limiti e specificità strutturali nel contesto italiano

Nel contesto della transizione digitale dell'agricoltura italiana, coordinata da istituzioni come il CREA e il CNR, l'applicazione di queste tecnologie deve fare i conti con la specifica realtà pedoclimatica e strutturale nazionale:

- Il fattore orografico e parcellare: Autori italiani come Marinello et al. (2017) e Kayad et al. (2019) evidenziano come la spiccata parcellizzazione dei fondi agricoli italiani (con appezzamenti medi spesso inferiori ai 2 ha) e l'orografia collinare limitino l'efficacia del satellite ottico a causa del fenomeno dei pixel misti. In questi scenari, i sensori prossimali montati su slitte o i sensori attivi (on-the-go) garantiscono un'accuratezza diagnostica indispensabile per i trattamenti a rateo variabile (VRA).
- Natura del dato edafico: Mentre il satellite offre solo una stima indiretta della variabilità del suolo mediata dalla risposta della vegetazione (memoria storica), i sensori prossimali a contatto o a induzione permettono la mappatura diretta e stabile delle proprietà fisiche (tessitura, umidità profonda), isolando i fattori transitori (Castrignanò et al., 2012).

La tendenza emersa nei più recenti progetti di ricerca europei non vede le due tecnologie come alternative, bensì integrate in modelli di Data Fusion. In questo approccio, la conducibilità edafica prossimale (EC_a) definisce la zonazione strutturale stabile del suolo, mentre le serie temporali Sentinel-2 monitorano la dinamica fenologica della coltura in tempo reale, ottimizzando gli input agronomici su scala aziendale (Sozzi et al., 2020).

Capitolo 4

INTEGRAZIONE DEI DATI

4.1 Pre-processing dei dati

La precisione degli output nei modelli di Agricoltura 4.0 dipende direttamente dalla qualità del dato di ingresso. I dati grezzi (raw data), sia di origine satellitare (remote) che terrestre (proximal), sono intrinsecamente affetti da rumore di fondo, anomalie sistematiche ed errori di posizionamento. La fase di pre-processing (pre-elaborazione) standardizza i dataset, eliminando i fattori di disturbo transitori per isolare il reale segnale biofisico della coltura e del suolo (Mulla, 2013).

4.1.1 Correzione dei dati satellitari: dal TOA al BOA

Per le immagini multispettrali (es. Sentinel-2), il pre-processing mira ad azzerare l'effetto di disturbo causato dall'atmosfera (gas, aerosol e vapore acqueo) che assorbe e disperde la radiazione solare. Il processo si articola in due livelli standardizzati dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA):

1. **Livello-1C (Top of Atmosphere - TOA):** Rappresenta la riflettanza grezza misurata dal sensore al di fuori dell'atmosfera terrestre.
2. **Livello-2A (Bottom of Atmosphere - BOA):** È la riflettanza reale al suolo (nota anche come Surface Reflectance).

Il passaggio da TOA a BOA avviene tramite algoritmi di correzione atmosferica (come Sen2Cor, sviluppato per conto di ESA). Questo software applica modelli di trasferimento radiativo nel mezzo per rimuovere lo scattering atmosferico.

Inoltre, in contesti collinari tipici del territorio italiano, i ricercatori del CNR-IREA integrano algoritmi di correzione topografica che, sfruttando i Modelli Digitali del Terreno (DEM), eliminano le distorsioni radiometriche indotte dalle ombreggiature e dall'inclinazione dei versanti (Villa et al., 2015). Infine, viene applicato il Cloud Masking per individuare e rimpiazzare i pixel geometricamente coperti da nubi.

4.1.2 Pre-processing dei dati prossimali: filtraggio e pulizia statistica

I dati acquisiti in continuo (on-the-go) dai sensori di conducibilità elettrica (EC_a) o dagli spettrometri NIR a terra soffrono di anomalie cinematiche legate alle vibrazioni del cantiere meccanico, a perdite temporanee del segnale GNSS-RTK o alle inversioni di marcia della trattrice.

Come codificato dai protocolli di ricerca italiani ed europei (Sartori et al., 2021; Kayad et al., 2019), il flusso di pulizia dei dati prossimali prevede tre step sequenziali:

- **Rimozione degli outlier spaziali:** Eliminazione manuale o automatica dei punti registrati al di fuori dei confini geometrici effettivi dell'appezzamento (es. capezzagne o strade poderali).
- **Filtro di velocità e ritardo temporale (Lag-time):** Eliminazione dei dati registrati quando la trattrice si sposta a velocità inferiori a una soglia minima (es. < 2 km/h) o durante le manovre di svolta, dove l'accumulo di punti genera false anomalie. Viene inoltre corretto il lag-time, ovvero il ritardo temporale tra la misurazione fisica del sensore e la reale marcatura del punto da parte del ricevitore GPS.
- **Geostatistical Screening (Filtro dei tre sigma):** Applicazione di algoritmi statistici per identificare e rimuovere i picchi di misura inverosimili, causati dall'impatto del vomere contro uno scheletro affiorante o radici (Marinello et al., 2017).

Al termine di queste procedure, i dati prossimali e satellitari risultano geometricamente coerenti, statisticamente normalizzati e pronti per la successiva fase di interpolazione spaziale e modellizzazione geostatistica.

4.2 Filtraggio e pulizia

Una volta completate le correzioni geometriche e atmosferiche preliminari, i dataset di rilievo prossimale e remoto richiedono una fase di screening statistico avanzato. L'obiettivo è isolare ed eliminare gli outlier (valori anomali) globali e locali. Se inclusi nelle successive fasi di interpolazione, questi errori sistematici e casuali genererebbero

falsi gradienti spaziali (artefatti di interpolazione), inficiando l'affidabilità delle mappe di prescrizione (Castrignanò et al., 2018).

4.2.1 Identificazione degli outlier globali e locali

La pulizia si articola su due livelli di scrutinio statistico, standardizzati per i monitoraggi ad alta densità nell'ambiente agro-ambientale europeo (Sartori et al., 2021):

- **Outlier Globali:** Sono punti che presentano valori fisicamente impossibili o statisticamente esterni alla distribuzione di frequenza dell'intero appezzamento (es. letture di EC_a negative o superiori al limite fisico dei terreni non salini). L'approccio standard prevede l'applicazione del Filtro dei Tre Sigma o dello Z-score Modificato, basato sulla Mediana della Deviazione Assoluta (MAD), espressa come:

$$MAD = \text{median}(|x_i - \text{median}(x)|)$$

Tutti i punti con uno Z-score modificato superiore a 3.5 vengono rimossi in quanto considerati rumore strumentale (Kayad et al., 2019).

- **Outlier Locali (Spaziali):** Sono i punti più critici da individuare, poiché presentano valori statisticamente normali se considerati nell'intero dataset, ma risultano anomali e discordanti rispetto all'intorno spaziale in cui si trovano (es. un picco isolato di vigore vegetativo in una zona fortemente depressa). Per l'identificazione di queste anomalie, i ricercatori italiani impiegano correntemente l'indice di **I di Moran Locale** (Local Indicators of Spatial Association - LISA) o il diagramma di dispersione di Moran. I punti che mostrano un'autocorrelazione spaziale negativa significativa (tipologia High-Low o Low-High) vengono catalogati come discontinuità artificiali e rimossi dal dataset (Marinello et al., 2017).

4.2.2 Algoritmi di smooth e riduzione del rumore di fondo

Per le serie temporali satellitari (es. curve di fenologia colturale ricavate da Sentinel-2), il filtraggio mira a ricostruire l'andamento reale della biomassa eliminando le micro-oscillazioni residue dovute a velature atmosferiche o angoli di ripresa variabili.

A livello europeo, il protocollo standardizzato prevede l'applicazione di algoritmi di smoothing non lineari:

1. **Filtro di Savitzky-Golay:** Agisce tramite una regressione polinomiale locale su una finestra temporale mobile, preservando la forma e l'altezza dei picchi fenologici critici (es. il picco di massima fioritura o di massimo sviluppo fogliare) che verrebbero altrimenti appiattiti da una media mobile classica.
2. **Funzioni Logistiche Asimmetriche:** Utilizzate nei servizi di monitoraggio della Commissione Europea per modellare le curve di crescita stagionali, facilitando l'estrazione automatica delle metriche fenologiche (es. data di inizio della senescenza colturale) (Vrieling et al., 2018).

4.3 Normalizzazione e armonizzazione

La convergenza operativa di flussi informativi multi-sorgente rappresenta il fulcro dell'Agricoltura 4.0. Tuttavia, i dati satellitari e prossimali presentano scale di misura, formati di memorizzazione e risoluzioni spaziali eterogenei. Il processo di normalizzazione (riduzione dei dati a scale numeriche confrontabili) e di armonizzazione (allineamento geometrico e radiometrico) è la fase propedeutica all'applicazione di algoritmi predittivi e di modellistica geostatistica integrata (Casa et al., 2018).

4.3.1 Normalizzazione statistica dei vettori numerici

Le grandezze fisiche misurate in campo mostrano intervalli di variabilità ampi e non confrontabili: la conducibilità elettrica apparente (EC_a) si esprime in mS/m, mentre gli indici di vigore ottici (es. NDVI) sono adimensionali e confinati nell'intervallo -1 - +1.

Per eliminare l'effetto della scala ed evitare che le variabili con ordini di grandezza superiori dominino artificialmente i modelli di clustering, la ricerca agronomica nazionale ricorre a due principali tecniche di scalatura statistica (Sartori et al., 2021):

1. **Min-Max Scaling (Rescaling):** Riconduce linearmente i dati in un intervallo fisso 0, 1, preservando l'esatta forma della distribuzione originale e le distanze relative tra i punti. La formula applicata è:

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

Dove:

- **x norm (Dato normalizzato):** Rappresenta il valore finale scalato della singola osservazione. È una grandezza adimensionale (priva di unità di misura) rigorosamente confinata all'interno dell'intervallo matematico 0, 1.
- **x (Dato grezzo o puntuale):** È il valore originario della singola osservazione così come registrato dal sensore (es. la lettura puntuale di conducibilità elettrica espressa in mS/m, o il valore di riflettanza di un pixel).
- **x min (Minimo globale del dataset):** Indica il valore minimo assoluto registrato per quella specifica variabile all'interno dell'intero appezzamento o della serie temporale considerata, al netto degli outlier preventivamente rimossi.
- **x max (Massimo globale del dataset):** Indica il valore massimo assoluto registrato per quella specifica variabile nell'appezzamento o nella serie temporale, anch'esso validato dopo la fase di filtraggio statistico.
- **(x max– x min) (Campo di variazione o Range):** Rappresenta il denominatore dell'equazione e definisce l'ampiezza complessiva della variabilità misurata sul campo. Agisce come fattore di normalizzazione spaziale.

2. **Standardizzazione (Z-score Normalization):** Trasforma i dati affinché abbiano media (μ) pari a zero e deviazione standard (σ) uguale a uno. È la tecnica preferita per l'applicazione di algoritmi di machine learning (es. K-means clustering o reti neurali) impiegati nella delimitazione delle zone omogenee, in quanto riduce l'impatto di distribuzioni asimmetriche (Kayad et al., 2019).

4.3.2 Armonizzazione radiometrica e ricampionamento spaziale

L'armonizzazione si rende indispensabile quando si combinano costellazioni satellitari diverse (es. integrazione dei dati europei Sentinel-2 con quelli americani Landsat 8/9 per aumentare la frequenza temporale dei passaggi) o quando si sovrappongono rilievi a terra e telerilevati.

- **Armonizzazione Radiometrica (Cross-Calibration):** I sensori a bordo di piattaforme diverse presentano bande spettrali con funzioni di risposta relative (SRF) leggermente disallineate. Come codificato dal framework europeo Harmonized Landsat Sentinel (HLS), vengono applicate funzioni di trasformazione lineare basate su coefficienti di regressione statistica per correggere la riflettanza BOA e azzerare gli errori sistematici tra i sensori (Sozzi et al., 2020).
- **Ricampionamento Spaziale e Grigliatura (Gridding):** I dati prossimali cinematici si presentano come vettori di punti irregolari ad altissima densità lungo la traccia del mezzo, mentre il satellite fornisce matrici raster a griglia regolare (pixel di 10 m o 20 m). Per renderli topologicamente sovrapponibili, si effettua un'operazione di ricampionamento spaziale. I dati a terra vengono proiettati sulla medesima griglia geometrica del satellite (co-registration) utilizzando tecniche di interpolazione a cella elementare o algoritmi di ricampionamento quali il Vicino più Prossimo (per preservare i valori originali) o la Convoluzione Cubica (per ottenere superfici continue e smussate) (Castrignanò et al., 2012).

4.4 Integrazione multi-sorgente

L'integrazione multi-sorgente, rappresenta il livello più avanzato dell'architettura di elaborazione dati nell'Agricoltura 4.0. Questa tecnica combina i dati ad alta risoluzione spaziale stabili nel tempo (sensori prossimali EC_a e Vis-NIR per il suolo) con le informazioni ad alta dinamica temporale (indici spettrali satellitari Sentinel-2 per la coltura), superando i limiti intrinseci di ogni singolo vettore (Castrignanò et al., 2018).

4.4.1 Livelli di fusione e architetture computazionali

A livello metodologico, la letteratura scientifica europea (Mulla, 2013) classifica l'integrazione dei dati in tre macrocategorie gerarchiche:

1. **Pixel-level Fusion (Fusione a livello di pixel):** Prevede la fusione dei dati grezzi o pre-elaborati immediatamente dopo la loro armonizzazione

geometrica sulla medesima griglia raster. Viene impiegata per correlare direttamente la riflettanza spettrale satellitare con le matrici di conducibilità a terra.

2. **Feature-level Fusion (Fusione a livello di caratteristiche):** Estrae feature geometriche o statistiche indipendenti da ciascuna sorgente (es. mappe di pendenza da DEM, zone omogenee stabili da EC_a e curve di assorbimento dell'azoto da serie temporali satellitari) per poi integrarle in un unico vettore multidimensionale.
3. **Decision-level Fusion (Fusione a livello decisionale):** Combina gli output di modelli predittivi indipendenti attraverso logiche probabilistiche o alberi decisionali per generare la mappa di prescrizione finale (VRA).

4.4.2 Algoritmi di integrazione nella ricerca italo-europea

Nello scenario agro-ambientale italiano, caratterizzato da un'elevata frammentazione parcellare e variabilità pedoclimatica, i gruppi di ricerca di istituzioni come il CNR e le principali università agraria nazionali applicano algoritmi avanzati per l'integrazione multi-sorgente:

- **Co-Kriging Geostatistico:** Utilizza la conducibilità elettrica apparente (EC_a) come variabile secondaria estensiva per migliorare l'interpolazione spaziale di parametri edafici primari (es. contenuto di argilla o sostanza organica) misurati in un numero limitato di campioni di laboratorio (Castrignanò et al., 2012).

Machine Learning e Clustering Multivariato: Algoritmi non supervisionati come il Fuzzy C-Means o algoritmi supervisionati basati su Random Forest e Support Vector Machines (SVM) vengono alimentati con layer integrati (NDVI storico + EC_a superficiale e profonda + micro-topografia). Questo consente la zonizzazione di precisione del territorio (MZ - Management Zones), isolando le aree in cui la produttività è limitata dalla tessitura del suolo da quelle influenzate da stress idrici o nutrizionali transitori (Kayad et al., 2019; Sozzi et al., 2020).

Capitolo 5

GEOSTATISTICA

5.1 Geostatistica

La geostatistica consente la quantificazione e la modellizzazione della variabilità spaziale delle proprietà ambientali ritenute rilevanti per l'applicazione dell'Agricoltura di Precisione e non solo. La costruzione di mappe in grado di rappresentare in modo veritiero la situazione aziendale richiede infatti un'accurata pianificazione delle attività di rilievo e un campionamento ottimale, che permettano di raccogliere dati affidabili e rappresentativi della variabilità del territorio. Solo successivamente è possibile applicare strumenti geostatistici per l'analisi dell'areale di studio.

5.2 Evoluzione storica in ambito agro-pedologico

L'applicazione della geostatistica alla scienza del suolo risale ai primi anni Ottanta (Burgess & Webster, 1980; McBratney et al., 1981), ambito in cui si avvertì l'esigenza di superare i limiti della cartografia pedologica classica di tipo qualitativo. I primi riferimenti al suo utilizzo mirato nell'Agricoltura di Precisione sono invece riportati nei lavori cardine di Mulla (1991, 1993, 2013) e Mulla & Schepers (2015).

Da allora, l'interesse verso la geostatistica in Agricoltura di Precisione è cresciuto in modo significativo a livello globale ed europeo, come documentato da numerosi articoli scientifici e dagli studi presentati in convegni internazionali dedicati, quali:

- L'**ICPA** (International Conference on Precision Agriculture);
- L'**ECPA** (European Conference on Precision Agriculture), dove i gruppi di ricerca italiani (es. Università di Padova, Milano, Firenze e CNR) contribuiscono regolarmente all'avanzamento della disciplina applicata alle colture mediterranee.

5.3 Fondamenti teorici geostatistica

Secondo la definizione originaria di Matheron (1963), la geostatistica può essere definita come lo studio statistico dei fenomeni naturali, il cui assunto fondamentale risiede nell'introduzione del concetto di correlazione spaziale, ovvero la relazione esistente tra osservazioni in funzione della distanza geometrica che le separa.

La geostatistica si è sviluppata a partire dalla **teoria delle variabili regionalizzate**, che descrive i cosiddetti fenomeni regionalizzati, ossia fenomeni distribuiti nello spazio e/o nel tempo, caratterizzati da una struttura spaziale organizzata (Emery, 2001). In questo contesto, la posizione geografica del punto di campionamento assume un ruolo matematico fondamentale. La distribuzione delle proprietà del suolo e delle colture manifesta una duplice natura:

- Una **componente deterministica**, legata a variazioni graduali, macroscopiche e sistematiche del paesaggio (es. topografia, pendenza, transizioni litologiche);
- Una **componente casuale**, dovuta a micro-variabilità locali e fluttuazioni non riconducibili a cause note (rumore di fondo strumentale, errori di campionamento).

5.4 Gestione dell'incertezza e obiettivi agronomici

Attraverso l'utilizzo delle informazioni spaziali esplicite contenute nei dati, la geostatistica permette di modellare statisticamente l'incertezza dei valori nelle aree non campionate. Questa operazione si basa sulla formulazione dell'ipotesi intrinseca, secondo la quale la variabilità di un determinato parametro dipende esclusivamente dalla distanza (lag) e dall'orientamento tra i punti di misura, e non dalla loro posizione assoluta all'interno dello spazio.

Nell'attività di tesi, la geostatistica rappresenta quindi lo strumento essenziale per decodificare e modellare la variabilità delle caratteristiche chimico-fisiche del suolo (es. conducibilità elettrica, tessitura) e per la successiva definizione di zone di gestione differenziata (Management Zones), considerate un elemento chiave per una corretta ed efficiente gestione agronomica e tecnologica delle colture a rateo variabile (VRA).

Capitolo 6

DELINEAZIONE DELLE ZONE OMOGENEE

6.1 Clustering (K-means, Fuzzy C-means)

Una volta raccolti, georeferenziati e normalizzati i dataset spaziali relativi alle caratteristiche edafiche e agli indici vegetazionali multi-temporali, il passaggio cruciale per la definizione delle mappe di prescrizione consiste nella clusterizzazione/zonazione matematica dell'appezzamento. Questo processo viene eseguito attraverso algoritmi di clustering statistico multivariato.

L'obiettivo del clustering in Agricoltura di Precisione è raggruppare i pixel (o i punti di campionamento) del campo in un numero ristretto di classi (le Management Zones), massimizzando l'omogeneità interna a ciascuna zona (omogeneità intra-cluster) e, al contempo, massimizzando la differenza tra le zone stesse (eterogeneità inter-cluster). Nel panorama agronomico digitale, i due algoritmi computazionali più utilizzati e validati dalla letteratura scientifica sono il **K-means** e il **Fuzzy C-means (FCM)**.

6.1.1 Algoritmo K-means (Clustering Esclusivo)

L'algoritmo K-means è un metodo di partizionamento deterministico ed esclusivo (hard clustering). Il principio di funzionamento si basa sulla suddivisione di n osservazioni spaziali in k cluster distinti, dove il numero k deve essere tassativamente predefinito dall'operatore.

Il processo computazionale segue un ciclo iterativo standard:

1. **Inizializzazione:** Vengono scelti casualmente k punti nello spazio dei dati, che fungono da centroidi iniziali.
2. **Assegnazione:** Ciascun punto del campo viene assegnato al cluster il cui centroide è graficamente o statisticamente più vicino.

3. **Aggiornamento:** Una volta completata l'assegnazione di tutti i punti, la posizione del centroide di ciascun cluster viene ricalcolata come media matematica (vettore dei valori medi) di tutti i punti appartenenti a quella specifica zona.
4. **Convergenza:** I passaggi 2 e 3 vengono ripetuti ciclicamente finché la posizione dei centroidi non si stabilizza (ovvero, quando lo spostamento dei punti tra i cluster diventa nullo o inferiore a una soglia di tolleranza impostata).

Sebbene il K-means si distingua per l'elevata efficienza computazionale e la semplicità di implementazione nei software GIS, esso presenta un limite intrinseco dal punto di vista agronomico: la natura dicotomica dell'assegnazione. Un pixel posizionato sul confine esatto tra due zone di tessitura diversa viene forzatamente assegnato all'una o all'altra, creando discontinuità nette ed artificiali che non rispecchiano la reale transizione ecofisiologica del suolo.

6.1.2 Algoritmo Fuzzy C-means (Clustering Sfocato)

Per superare l'artificiosità dei confini netti imposti dal K-means, si utilizza l'algoritmo Fuzzy C-means (FCM), un approccio basato sulla logica sfocata (soft clustering). Nell'algoritmo FCM, un singolo punto del campo non appartiene esclusivamente a un'unica zona omogenea, ma possiede un grado di appartenenza (membership degree, espresso con un valore continuo da 0 a 1) per ciascuno dei cluster individuati.

Grazie a questa flessibilità, il Fuzzy C-means permette di mappare accuratamente le zone di transizione o di ecotono all'interno dell'appezzamento. In fase di spandimento o irrorazione a rateo variabile (VRT), i sistemi di bordo della trattrice possono elaborare queste sfumature per raccordare gradualmente le dosi di input ed evitare sbalzi pressori o distributivi eccessivi sugli attuatori meccanici.

6.1.3 Determinazione del numero ottimale di zone omogenee

Una delle sfide principali nell'applicazione dei modelli di clustering è stabilire a priori il numero ideale di zone di gestione (k o c). Suddividere un campo in troppe zone (es. $k > 5$) renderebbe le operazioni meccaniche eccessivamente frammentate e

antieconomiche; al contrario, un numero troppo basso (es. $k = 1$ o $k = 2$) rischierebbe di mascherare variabilità agronomiche significative.

Per identificare matematicamente il numero ottimale di partizioni stabili, la letteratura internazionale si affida a due indici statistici derivati dalla matrice di appartenenza fuzzy:

- **Fuzziness Performance Index (FPI):** Misura il grado di separazione tra i cluster. Un valore di FPI vicino a 0 indica un'ottima distinzione tra le zone, con una minima presenza di punti ambigui o confusi tra più classi; un valore vicino a 1 indica una sovrapposizione caotica dei dati.
- **Normalized Classification Entropy (NCE):** Misura il livello di disorganizzazione e di incertezza introdotto dalla classificazione. Anche in questo caso, il numero ottimale di zone coincide con il valore minimo dell'indice NCE.

L'intersezione grafica in cui sia l'FPI sia l'NCE raggiungono il loro punto di minimo globale (o mostrano una netta flessione a gomito) identifica il numero perfetto di zone stabili in cui frazionare l'appezzamento (generalmente quantificato tra le 2 e le 4 zone per i contesti aziendali italiani ed europei).

6.2 Validazione delle zone

La delineazione matematica delle zone di gestione omogenee, ottenuta tramite gli algoritmi di clustering (Paragrafo 6.1), necessita di una fase rigorosa di validazione agronomica e statistica prima di poter essere convertita in una mappa di prescrizione operativa. Validare le zone significa verificare se le differenze riscontrate dai sensori prossimali (es. EC_a) e dai dati telerilevati (es. NDVI) corrispondano a variazioni reali, stabili e significative delle proprietà chimico-fisiche del suolo e della risposta produttiva della coltura.

Senza questo passaggio, si rischierebbe di applicare input variabili basandosi su artefatti statistici o su variabilità temporanee (es. un ristagno idrico transitorio dovuto a una singola pioggia eccezionale), inficiando l'efficacia economica e ambientale del trattamento VRT. I protocolli di validazione si articolano principalmente su due livelli

sequenziali: il campionamento mirato del suolo (ground truthing) e l'analisi della varianza della resa.

1. **Campionamento mirato del suolo (Directed Soil Sampling)** Il primo livello di validazione consiste nel superare il tradizionale campionamento a griglia geometrica regolare, dispendioso e spesso inefficiente, a favore del campionamento guidato dalle zone omogenee (smart/directed sampling).

Utilizzando la mappa provvisoria derivata dal clustering, vengono individuati i centroidi geografici di ciascuna zona. In queste aree d'interesse vengono effettuati carotaggi mirati per raccogliere campioni di terreno da sottoporre ad analisi di laboratorio tradizionali. I parametri edafici stabili analizzati includono:

- **Tessitura scheletrica:** Determinazione delle percentuali di sabbia, limo e argilla.
- **Contenuto di Sostanza Organica (SO):** Verifica della corrispondenza con le stime spettrali NIR.
- **Capacità di Scambio Cationico (CSC) e Macronutrienti:** Quantificazione di Azoto totale, Fosforo assimilabile e Potassio scambiabile.

I dati analitici di laboratorio vengono poi sottoposti a test statistici di significatività (come il test t di Student per due zone o l'Analisi della Varianza - ANOVA per tre o più zone). Le zone si considerano validate dal punto di vista edafico se le medie dei parametri fisico-chimici cruciali risultano significativamente differenti tra i cluster ($p < 0.05$).

Capitolo 7

MATERIALI E METODI

7.1 Descrizione dell'azienda

L'azienda agricola Di Egidio ha sede nel comune di Sant'Omero (TE), è a conduzione familiare ha una superficie di 60 ha, di cui il 90% di essi sono di proprietà e il restante 10% sono con contratto di affitto, situati tra i comuni di Mosciano Sant'Angelo e Sant'Omero. L'azienda è a indirizzo produttivo cerealicolo-zootecnico da latte, con n° totali di capi pari a 100 di razza frisona italiana. I terreni sono coltivati con cereali (orzo) e foraggi, troviamo anche colture minori come favino e mais (cereale estivo) utilizzati per l'alimentazione delle bovine in azienda, l'azienda non utilizza insilati, ha quindi un'alimentazione composta da fieno e concentrati (prodotti in azienda per lo più), per garantire un'elevata qualità del latte prodotto.

7.2 Descrizione sito sperimentale

Il campo analizzato in questa tesi di laurea si trova nel comune di Sant'Omero (TE) (fig. 3), più precisamente in via Fosso Grande snc, ha un'estensione di 4,5Ha, presenta una giacitura in pendenza ed una esposizione a Nord (fig. 4).



Figura 3 Posizione sito sperimentale



Figura 4 Dettaglio satellitare del sito sperimentale

7.3 Gestione agronomica

Negli ultimi tre anni il campo è stato coltivato a prato-erba medica e la gestione agronomica è riportata nella Tabella 2.

Tabella 2 Gestione agronomica del sito sperimentale

LAVORAZIONI	STADIO FENOLOGICO
Lavorazione terreno (aratro)	Suolo nudo
Primo affinamento con estirpatore	Suolo nudo
Preparazione del letto di semina	Suolo nudo
Semina erba medica	Suolo nudo
Rullatura	Suolo nudo
sfalci	Alla fioritura/bottoni fiorali

7.4 Overview del workflow

Il workflow usato per raggiungere l'obiettivo finale della tesi è:

- la mappatura con il drone, finalizzata all'ottenimento di una visione dall'alto con delle ortofoto, poi processate su software.
- La mappatura della conducibilità elettrica del suolo
- Delineazione delle zone omogenee, usando i dati della mappa della conducibilità elettrica del suolo
- Identificazione dei punti di campionamento del suolo
- Analisi del suolo
- Bilancio dell'azoto
- Creazione della mappa di prescrizione

Di seguito il cronoprogramma delle attività svolte nel sito di interesse con la loro relativa data di esecuzione:

- Rilievo con drone in data 26/02/2026, scattando delle ortofoto su tutta la superficie presa in esame
- Mappatura della conducibilità elettrica del suolo in data 26/02/2016, con passate distanti 10 m ciascuna
- Prelievo campioni suolo sulle zone omogenee ricavate dalla mappa della conducibilità in data 08/05/2026, con un campionatore a carotaggio, ad una profondità di 30 cm



Figura 5 Trivella a carotaggio per prelievi di suolo

7.4.1 Rilievo con drone

Il rilievo con il drone è stato svolto il 26/02/2026 con l'utilizzo del drone DJI Mavic 3M (Multispectral). Il drone consente di poter acquisire delle immagini RGB & Multispettrali in maniera sincrona, le quali sono state acquisite in modalità RTK per consentire una maggiore accuratezza spaziale.



Figura 6 Drone DJI Mavic 3M

Il drone consente di acquisire:

1. Immagini RGB con una fotocamera da 20 Mega Pixel (MP)

2. Immagini multispettrali invece ricadono nel Green, Red, Red-Edge e NIR dello spettro del visibile con una risoluzione di 5 MP

A seguito del rilievo svolto si è provveduto ad usare Metashape Agisoft Software per eseguire l'elaborazione fotogrammetrica, la quale è costituita dai seguenti step:

- Allineamento delle foto
- Generazione nuvola di punti
- Creazione del modello in 3D
- Creazione del DEM
- Creazione dell'ortomosaico

7.4.2 Mappatura del suolo

La mappatura del suolo è stata svolta il 2 febbraio 2026 con l'ausilio del sensore prossimale CMD Tiny Explorer (fig. 6) in modalità di acquisizione LOW, che indica che i dati di conducibilità elettrica si riferiscono a 0-30 cm (abbiamo anche un'altra modalità di utilizzo che arriva fino a 70 cm, utilizzata ad esempio per rilievi in arboreti).



Figura 7 Strumento in azione nel sito sperimentale

Lo strumento (fig.7) consente di misurare, ogni tre secondi, i seguenti parametri: 1) Coordinate X e Y; 2) Elevazione; 3) Conducibilità elettrica; 4) In-phase.



Figura 8 Remote controller della sonda tiny explorer

Lo strumento è custodito in una valigetta ed è composto da due parti assemblabili tramite un manico. È dotato di: un braccio verticale; una piastra orizzontale alla base per l'analisi; un monitor per la visualizzazione dei dati in tempo reale. Dopo l'assemblaggio, lo strumento viene acceso e agganciato ai satelliti disponibili. Sul monitor vengono impostati: il nome del file, in base al luogo del rilievo; la frequenza di monitoraggio. Successivamente, è possibile scegliere tre modalità di rilievo: spotted measurement (misurazioni spot senza GPS); GPS manual (misurazioni con posizionamento manuale); GPS continuous GPS (metodo scelto per questo rilievo, con punti georiferiti registrati automaticamente ad ogni misura).

I dati acquisiti con il CMD Tiny explorer (fig. 8), nel sito sperimentale, sono 1088 e per ciascun punto è stato acquisito il dato GPS e la conducibilità elettrica.



Figura 9 Strumento assemblato

La misurazione è stata svolta camminando lungo l'appezzamento ad una distanza di 10 metri per ogni passaggio.

Di seguito viene riportata l'immagine delle traiettorie delle misurazioni eseguite lungo l'appezzamento:

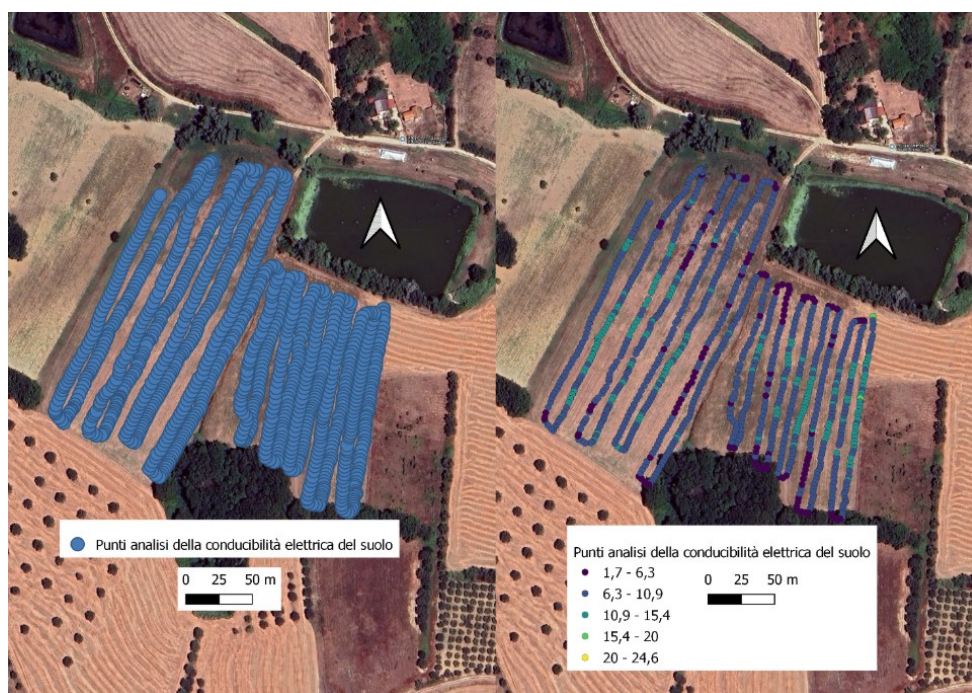


Figura 10 Passate lungo il campo

7.4.3 Geostatistica & Zonizzazione

In una fase preliminare dell'analisi geostatistica, è stata valutata la distribuzione dei dati attraverso il calcolo degli indici di Skewness e Kurtosis, al fine di verificare il rispetto delle condizioni di simmetria della distribuzione dei dati. In particolare, i valori di Skewness compresi tra -1 e $+1$ e di Kurtosis compresi tra -3 e $+3$ sono stati considerati accettabili. Una volta verificato che tali parametri rientravano nei range stabiliti, si è proceduto al calcolo del variogramma sperimentale, necessario per descrivere la struttura di dipendenza spaziale della variabile analizzata. Successivamente, al variogramma sono stati adattati diversi modelli spaziali teorici (ad esempio sferico, esponenziale e gaussiano), valutandone le prestazioni attraverso il confronto tra i valori stimati e quelli misurati. Il modello spaziale caratterizzato dall'errore minimo è stato selezionato come il più idoneo e utilizzato come input per la fase di interpolazione. L'interpolazione spaziale è stata effettuata mediante la tecnica di ordinary kriging, che richiede la definizione dei parametri del modello di variogramma selezionato. Infine, i risultati dell'interpolazione sono stati utilizzati per la creazione di mappe omogenee.

Esistono diverse metodologie per determinare il numero e la posizione delle zone omogenee. In questo lavoro è stato applicato l'algoritmo k-means dove però il suo parametro "centers" è stato definito dal metodo silhouette. (<https://doi.org/10.1002/agg2.20422> 2022)

7.4.4 Pianificazione dei punti di campionamento del suolo & analisi del suolo

I punti dei campionamenti del suolo sono stati identificati analizzando la mappa di conducibilità interpolata.

In questo caso sono stati valutati almeno un punto di campionamento del suolo per ciascuna zona omogenea.

In seguito, si è provveduto ad eseguire il campionamento del suolo e i campioni sono stati portati al Bucciarelli Laboratori s.r.l.

Le analisi del suolo sono state svolte per conoscere le seguenti variabili:

1. La tessitura del terreno ovvero la quantità di sabbia (2 mm - 0,02 mm), limo (0,02 mm - 0,002 mm) e argilla (< 0,002 mm) e lo scheletro (> 2mm)
2. Fosforo assimilabile (mg/kg)

3. C/N
4. Sostanza organica (g/kg)
5. Azoto totale (g/kg)
6. Carbonio organico (g/kg)
7. Capacità di scambio cationico (meq/100 g)
8. pH

7.4.5 Bilancio dell'azoto & Mappa di prescrizione

Per il bilancio dell'azoto è stata presa in considerazione il disciplinare per la produzione integrata della regione Marche, la cui equazione è:

$$Nc + Nf + An + (Kc * Fc) + (Ko * Fo) = (Y * B) + C + D$$

di cui i termini a sinistra dell'uguale definiscono gli apporti di azoto mentre quelli a destra le asportazioni. Tutti le variabili sono espresse in kg di N/ha.

Spiegazione dei termini dell'equazione:

- Nc: disponibilità di azoto derivante dai residui culturali precedenti.
- Nf: disponibilità di azoto derivante dalle fertilizzazioni organiche effettuate nell'anno precedente.
- An: apporti naturali di cui:
 - An1: deposizioni secche e umide dall'atmosfera (in assenza di altre misure locali deve essere valutato in 20 kg N/ha anno).
 - An2: $b1 + b2$ = apporti di azoto derivanti dalla fertilità del suolo costituiti dall'azoto immediatamente disponibile per la coltura e definito come azoto pronto (b1) e azoto che deriva dalla mineralizzazione della sostanza organica (b2).
- Kc: coefficiente di efficienza relativo agli apporti di fertilizzante minerale (Fc). In genere si considera pari al 100% del titolo commerciale del concime azotato. (100%)
- Fc: quantità di azoto apportata col concime chimico o minerale.
- Ko: coefficiente di efficienza relativo agli apporti di fertilizzante organico.
- Fo: quantità di azoto apportata dal concime organico.

- Y: produzione della coltura (q/ha).
- B: coefficienti unitari di asportazione ovvero contenuto in azoto dei prodotti ottenuti dalle colture (1.56 kg N per ogni quintale di prodotto asportato)
- C: perdite per lisciviazione (40 kg N / ha).
- D: perdite per immobilizzazione e dispersione. (0.4)

Capitolo 8 RISULTATI

8.1 Mappatura con drone

Il rilievo svolto ha permesso lo svolgimento dell'intero workflow fotogrammetrico, anche considerando la pendenza del suolo, il quale può limitare in alcuni casi lo svolgimento del processo fotogrammetrico.

Di seguito viene riportato l'ortomosaico (fig. 11) derivante dal processo fotogrammetrico



Figura 11 Processo fotogrammetrico

L'ortofoto mostra la presenza di almeno due aree con diverso colore cromatico, il quale indica la potenziale presenza di due tipologie di suoli differenti.

8.2 Mappatura del suolo & Zone Omogenee

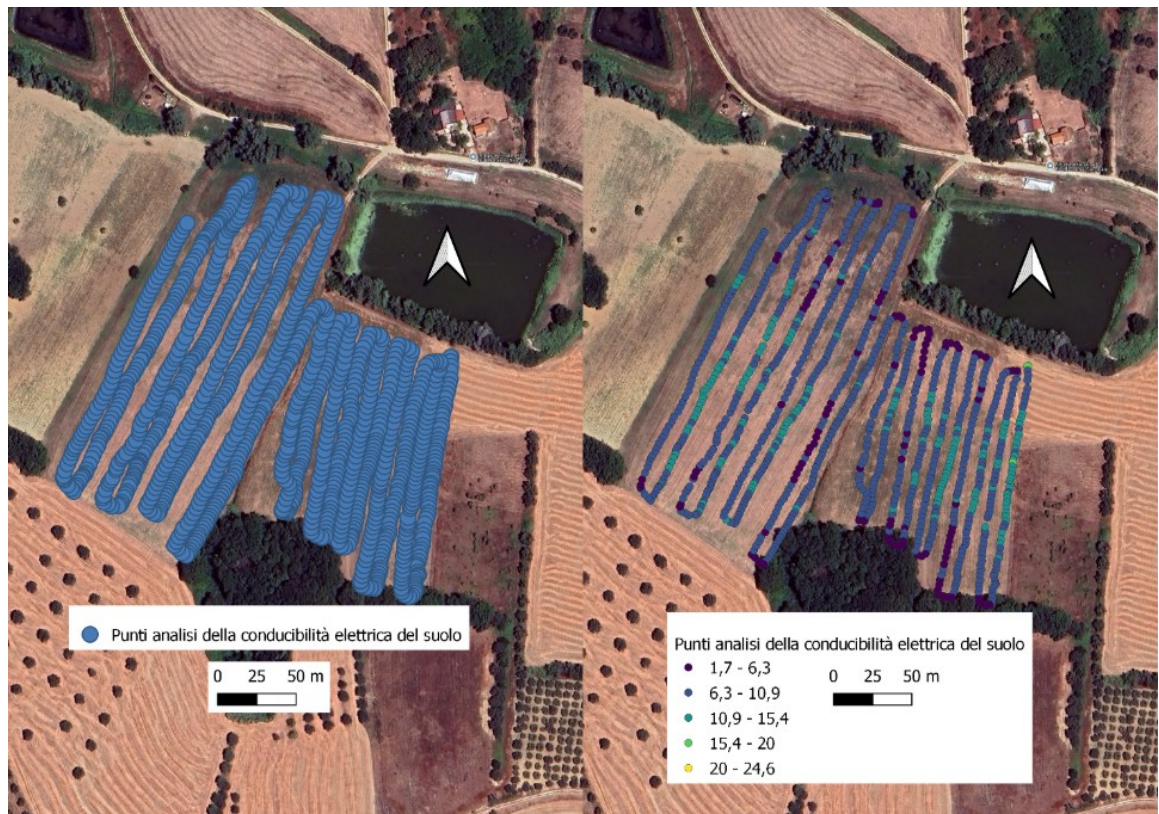


Figura 12 Punti analisi e valore della conducibilità elettrica

Di seguito viene riportata l'immagine relativa ai punti di analisi della conducibilità elettrica:

Analizzando la mappa si nota una differenza di conducibilità che varia da 1.7 S/cm fino a 24.6 S/cm, evidenziato anche dalla scala dei colori da blu/viola a giallo.

Grazie all'ausilio di SmartMap QGIS Plugin è stato possibile svolgere tutta la procedura di creazione del variogramma e interpolazione. Di seguito viene riportata la mappa interpolata della conducibilità elettrica, l'errore relativo e il variogramma.

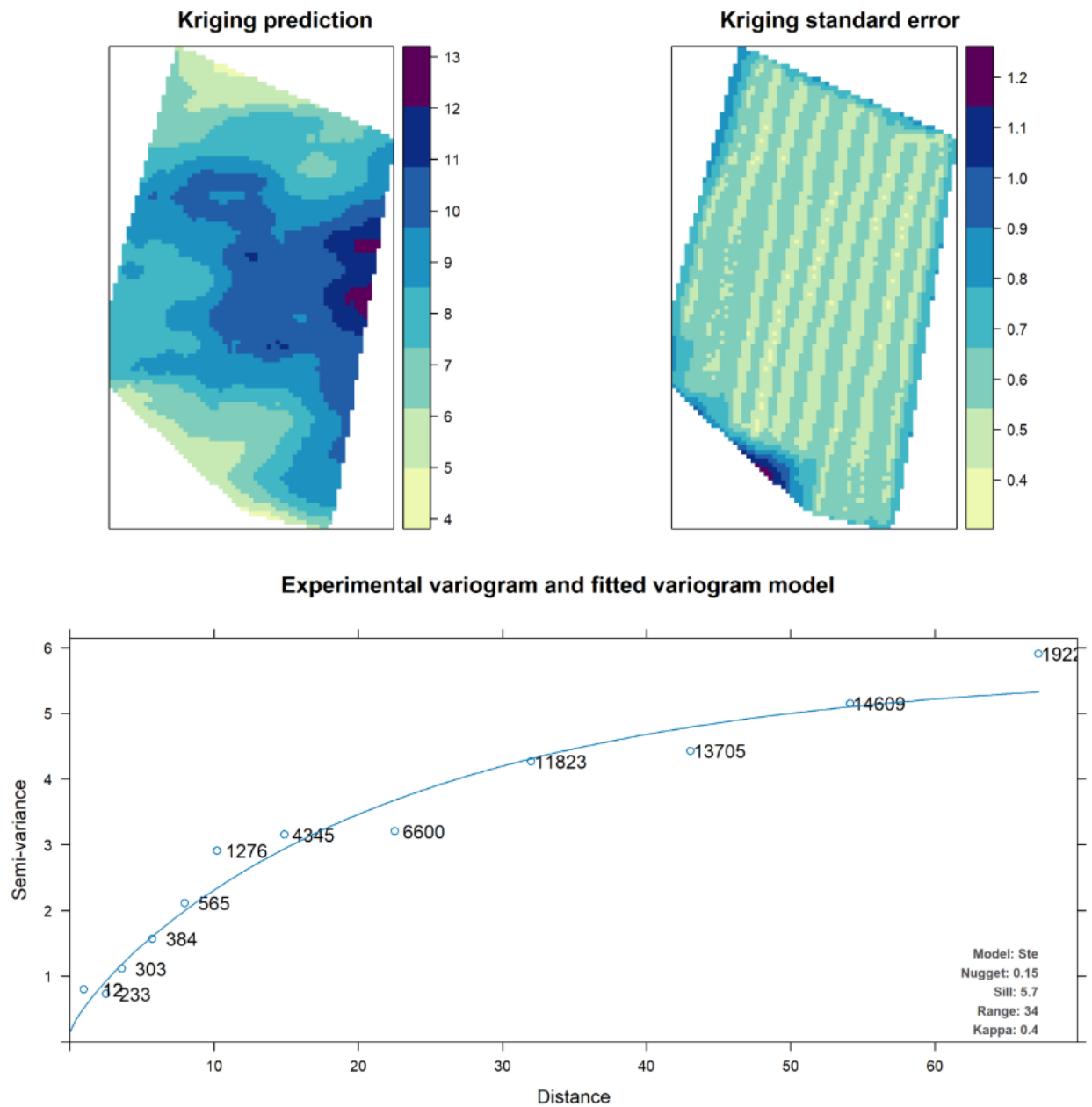


Figura 13 Variogramma sperimentale della conducibilità e il modello spaziale Matern campo A

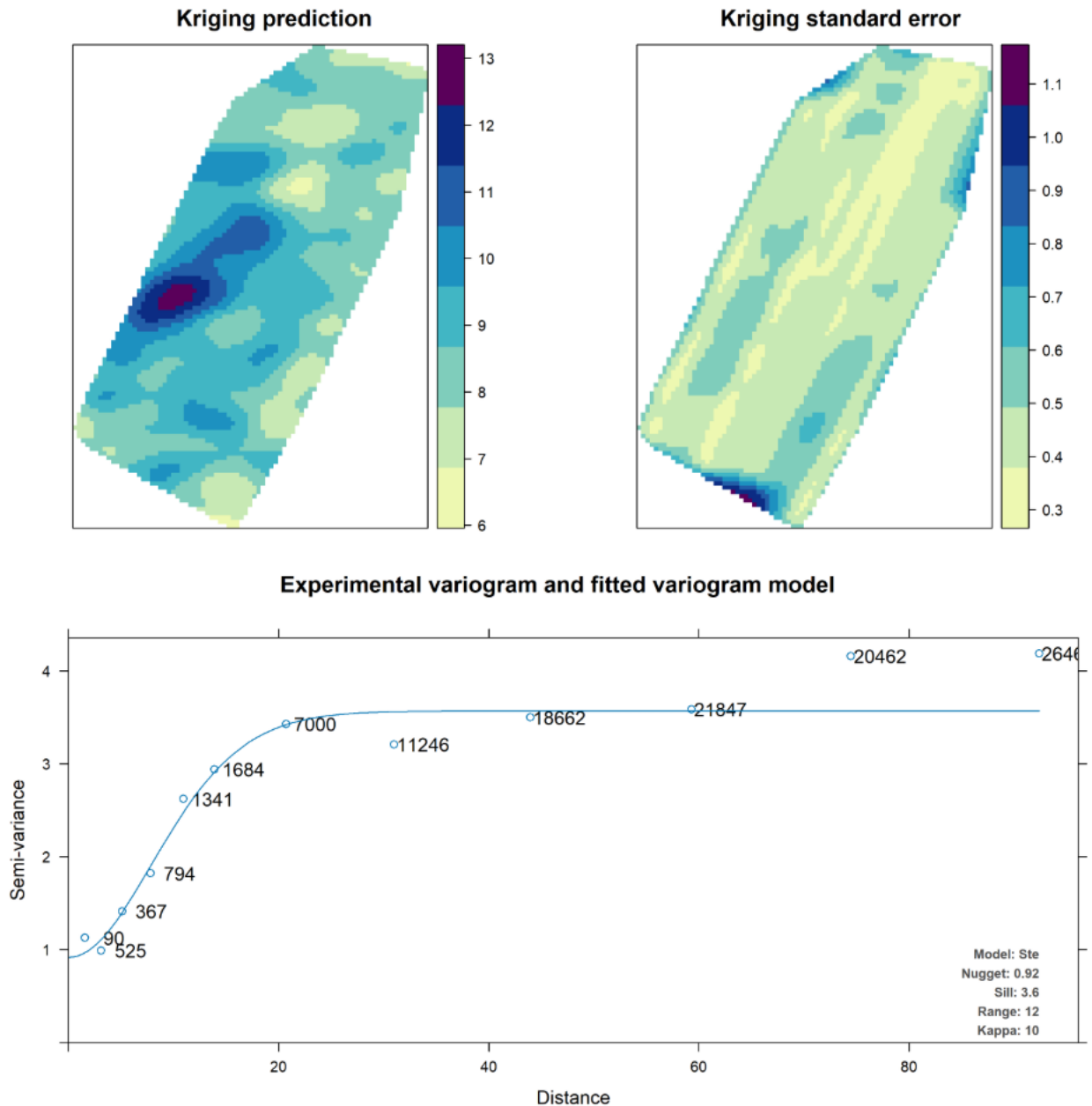


Figura 14 Variogramma sperimentale della conducibilità e il modello spaziale Matern campo B

Dalla mappa in alto a sinistra ovvero kriging prediction vengono evidenziate le zone dove la conducibilità risulta essere più alta o più bassa. Da quella a destra ovvero kriging standard error invece si evidenzia l'errore relativo per ogni stima eseguita dal kriging e che varia da 4,6 a 6. Per cui per ogni punto abbiamo un valore stimato e un range di errore tra +4.6 e +6.

La figura sottostante ovvero il variogramma è un grafico geostatistico che rappresenta la variabilità spaziale dei dati in funzione della distanza tra le osservazioni. Mostra come la semivarianza (differenza tra punti) asse y aumenta all'aumentare della distanza (lag) asse x, permettendo di capire la correlazione tra dati vicini. Qualora la distanza tra punti supera 40 m essi non sono più dipendenti.

Di seguito l'immagine della mappatura del suolo generata dall'ordinary kriging:

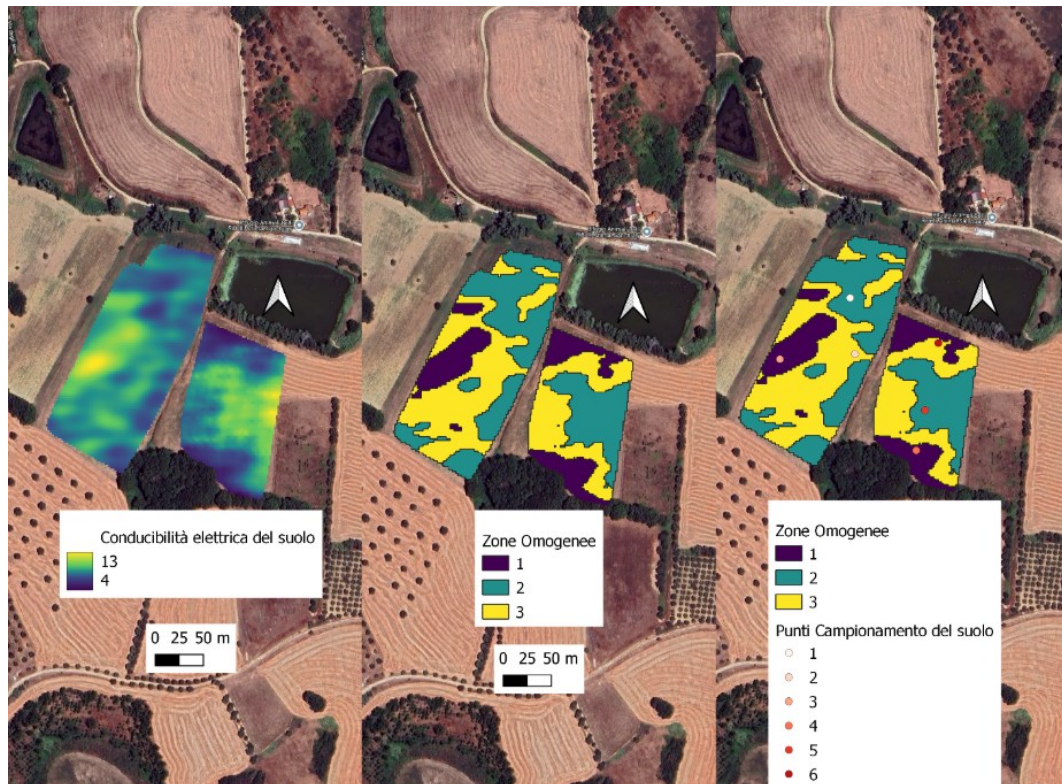


Figura 15 Mappa conducibilità elettrica del suolo

Dalla mappatura della conducibilità elettrica del suolo interpolata è deducibile che ci sono aree con valori di resistività più alti mentre altre aree con valori più bassi. Questi valori variano da 14 a 65 S/cm. Nella mappa abbiamo una scala che varia da blu/viola al giallo. Si può ipotizzare che le aree marcate di giallo abbiano un contenuto più basso in azoto, fosforo e sostanza organica, in media, viceversa in quelle marcate in blu. Tale ipotesi può o meno essere confermata solamente attraverso il campionamento e analisi del suolo.

8.3 Analisi del suolo

Nella seguente figura sono stati riportati i punti del campionamento del suolo, i quali sono stati posizionati nelle tre diverse zone omogenee per caratterizzare al meglio la superficie.

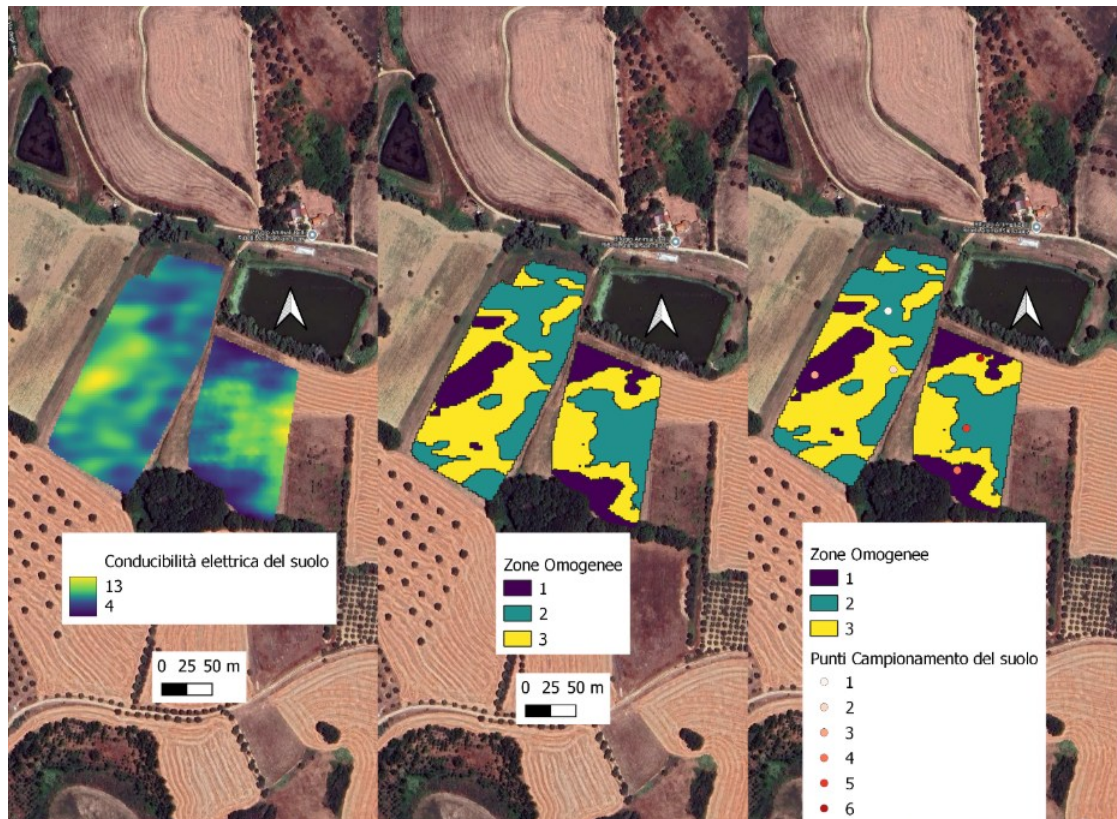


Figura 16 *Mappa zone omogenee e relativi punti di campionamento*

I campionamenti del suolo sono stati eseguiti nei punti indicati in mappa.

Dai risultati ottenuti delle analisi dei campionamenti risulta che le zone delimitate preliminarmente differiscono tra loro per alcuni parametri, ma nel complesso il campo risulta omogeneo, come lo si può osservare dai valori nella tabella 3, tuttavia alcuni valori differiscono tra loro come: Azoto totale e rapporto C/N. Dove si ha un picco di 1.19 (nella zona 1 campione 4) ed un minimo di 0,52 (zona 2 campione 2), per quanto riguarda N tot. Per quanto riguarda il rapporto C/N troviamo dei picchi di 22,7 e 24,2 rispettivamente nelle zone 3 (campione 6) e zona 2 (campione 2) e un minimo di 12,1 nella zona 1 (campione 4).

Tabella 3 Risultati analisi del suolo

Campo	Zona	Campione	sabbia	limo	argilla	carbonio organico	azoto totale
1	1	1	38,6	24,9	36,5	11,77	0,65
1	2	2	39,9	28,2	31,9	12,58	0,52
1	3	3	37,1	29,3	33,6	10,26	0,55
2	1	4	37,9	26,5	35,6	14,38	1,19
2	2	5	39	26,7	34,3	13,16	0,95
2	3	6	38,8	28,5	32,7	15,42	0,68
Campo	Zona	Campione	C/N	sostanza organica	pH	fosforo assimilabile	cec
1	1	1	18,1	20,3	7,99	50,6	11,3
1	2	2	24,2	21,7	7,96	53,2	10,1
1	3	3	18,7	17,7	7,95	46,8	11,3
2	1	4	12,1	24,8	8,08	58,2	9,7
2	2	5	13,9	22,7	8,05	49,3	8,3
2	3	6	22,7	26,6	8,02	56,3	10,4

Le analisi del suolo hanno confermato la presenza di variabilità all'interno del campo, se pur moderata, di seguito la tabella riporta la differenza percentuale tra le due zone che sono agli estremi della classificazione. Di seguito la tabella che mostra il fenomeno.

8.4 Bilancio dell'azoto & mappa di prescrizione

Il bilancio dell'azoto viene calcolato per zona. Nel sito d'interesse si hanno 6 zone/campione.

Applicando la formula per tre le zone:

$$Nc + Nf + An + (Kc * Fc) + (Ko * Fo) = (Y * B) + C + D$$

Campione1: è stata stimata una produzione di 90 qli/ha

La tessitura calcolata attraverso i valori di argilla, limo e sabbia del campione 1, risulta essere franco-argilloso

Nc: azoto derivante da erba medica è di 70 kg N/ha;

Nf: fertilizzazione organica assente;

An: apporti naturali di cui:

An1: deposizioni secche e umide dall'atmosfera 20 kg N/ha;

An2: b1 azoto immediatamente disponibile per la coltura. Si calcola sulla base della tessitura e del contenuto di azoto totale del suolo;

$$26 \times 0,65 = 16,90 \text{ kg N/ha};$$

b2 azoto derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica. Si calcola sulla base della tessitura, del contenuto di sostanza organica del suolo e del rapporto C/N:

$$20 \times 2,3(\text{S.O.}) = 40,60 \text{ kg N/ha};$$

Gli apporti di azoto derivanti dalla mineralizzazione della sostanza organica sono disponibili per la coltura in relazione al periodo in cui essa si sviluppa;

Pertanto b2 = azoto liberato in un anno x coefficiente tempo:

$$40,60 \times 0,75 = 30,45 \text{ kg N/ha};$$

$$Kc \times Fc = 46\% \times x$$

Ko: assente;

Fo: assente;

Y: produzione della coltura: 90 quintali/ha;

B: coefficienti unitari di asportazione ovvero contenuto in azoto dei prodotti ottenuti dalle colture: Mais è 1,56 N/quintali;

$$Y \times B = 90 \times 1,56 = 140,4 \text{ kg N/ha};$$

C: prendiamo in considerazione il metodo per drenaggio in base alla tessitura: è 40 kg N/ha;

$$D: \text{An2} \times \text{fatt.correzione} = (16,90 + 30,45) \times 0,40 = 18,94 \text{ kg N/ha};$$

$$70 + 67,35 + 0,46x = 140,40 + 40 + 18,94$$

$$0,46x = 199,34 - 137,35 =$$

$$61,99 / 0,46 = 134,7$$

$$F_c = 135 \text{ Kg/ha}$$

Campione 2: E' stata stimata una produzione di 90 qli/ha circa di mais

La tessitura calcolata attraverso i valori di argilla, limo e sabbia del campione 2, risulta essere franco-argilloso

Nc: azoto derivante da erba medica è di 70 kg N/ha;

Nf: fertilizzazione organica assente;

An: apporti naturali di cui:

An1: deposizioni secche e umide dall'atmosfera 20 kg N/ha;

An2: b1 azoto immediatamente disponibile per la coltura. Si calcola sulla base della tessitura e del contenuto di azoto totale del suolo;

$$26 * 0,52 = 13,52 \text{ kg N/ha};$$

b2 azoto derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica. Si calcola sulla base della tessitura, del contenuto di sostanza organica del suolo e del rapporto C/N:

$$20 * 2,17 (S.O.) = 43,40 \text{ kg N/ha};$$

Gli apporti di azoto derivanti dalla mineralizzazione della sostanza organica sono disponibili per la coltura in relazione al periodo in cui essa si sviluppa;

Pertanto $b2 = \text{azoto liberato in un anno} \times \text{coefficiente tempo}$:

$$43,40 * 0,75 = 32,55 \text{ kg N/ha};$$

$$K_c * F_c = 46\% * x$$

Ko: assente;

Fo: assente;

Y: produzione della coltura: 90 quintali/ha;

B: coefficienti unitari di asportazione ovvero contenuto in azoto dei prodotti ottenuti dalle colture: Mais è 1,56 N/quintali;

$$Y * B = 90 * 1,56 = 140,4 \text{ kg N/ha};$$

C: prendiamo in considerazione il metodo per drenaggio in base alla tessitura: è 40 kg N/ha;

$$D: A_{n2} * \text{fatt.correzione} = (13,52 + 32,55) * 0,40 = 18,43 \text{ kg N/ha};$$

$$70 + 66,07 + 0,46x = 140,40 + 40 + 18,43 =$$

$$0,46x = 198,83 - 136,07 =$$

$$62,76/0,46=136,43$$

$$F_c=136\text{Kg/ha}$$

Campione 3: E' stata stimata una produzione di 90 qli/ha circa di mais.

La tessitura calcolata attraverso i valori di argilla, limo e sabbia del campione 3, risulta essere franco-argilloso

Nc: azoto derivante da erba medica è di 70 kg N/ha;

Nf: fertilizzazione organica assente;

An: apporti naturali di cui:

An1: deposizioni secche e umide dall'atmosfera 20 kg N/ha;

An2: b1 azoto immediatamente disponibile per la coltura. Si calcola sulla base della tessitura e del contenuto di azoto totale del suolo;

$$26*0,55=14,30 \text{ kg N/ha};$$

b2 azoto derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica. Si calcola sulla base della tessitura, del contenuto di sostanza organica del suolo e del rapporto C/N:

$$20*1,77(\text{S.O.}) = 35,40 \text{ kg N/ha};$$

Gli apporti di azoto derivanti dalla mineralizzazione della sostanza organica sono disponibili per la coltura in relazione al periodo in cui essa si sviluppa;

Pertanto b2 = azoto liberato in un anno x coefficiente tempo:

$$35,40*0,75 = 26,55\text{kg N/ha};$$

$$K_c*F_c = 46\%*x$$

Ko: assente;

Fo: assente;

Y: produzione della coltura: 90 quintali/ha;

B: coefficienti unitari di asportazione ovvero contenuto in azoto dei prodotti ottenuti dalle colture: Mais è 1,56 N/quintali;

$$Y*B= 90*1,56=140,4 \text{ kg N/ha};$$

C: prendiamo in considerazione il metodo per drenaggio in base alla tessitura: è 40 kg N/ha;

$$D: \text{An2*fatt.correzione} = (14,30+26,55) *0,40= 40,85\text{kg N/ha};$$

$$70+60,85+0,46x=140,40+40+16,34=$$

$$0,46x=196-130,85=$$

$$65,89/0,46= 143$$

$$Fc=143 \text{ Kg/ha}$$

Campione 4: E' stata stimata una produzione di 90 qli/ha circa di mais.

La tessitura calcolata attraverso i valori di argilla, limo e sabbia del campione 4, risulta essere franco-argilloso

Nc: azoto derivante da erba medica è di 70 kg N/ha;

Nf: fertilizzazione organica assente;

An: apporti naturali di cui:

An1: deposizioni secche e umide dall'atmosfera 20 kg N/ha;

An2: b1 azoto immediatamente disponibile per la coltura. Si calcola sulla base della tessitura e del contenuto di azoto totale del suolo;

$$26*1,19=30,94\text{kg N/ha};$$

b2 azoto derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica. Si calcola sulla base della tessitura, del contenuto di sostanza organica del suolo e del rapporto C/N:

$$20*2,48(\text{S.O.}) = 49,60 \text{ kg N/ha};$$

Gli apporti di azoto derivanti dalla mineralizzazione della sostanza organica sono disponibili per la coltura in relazione al periodo in cui essa si sviluppa;

Pertanto b2 = azoto liberato in un anno x coefficiente tempo:

$$49,60*0,75 = 37,20 \text{ kg N/ha};$$

$$Kc*Fc = 46\%*x$$

Ko: assente;

Fo: assente;

Y: produzione della coltura: 90 quintali/ha;

B: coefficienti unitari di asportazione ovvero contenuto in azoto dei prodotti ottenuti dalle colture: Mais è 1,56 N/quintali;

$$Y*B= 90*1,56=140,4 \text{ kg N/ha};$$

C: prendiamo in considerazione il metodo per drenaggio in base alla tessitura: è 40 kg N/ha;

$$D: An2 * fatt.correzione = (30,94 + 37,20) * 0,40 = 27,26 \text{ kg N/ha};$$

$$70 + 88,14 + 0,46x = 140,40 + 40 + 27,26 =$$

$$0,46x = 207,66 - 158,14 =$$

$$49,52 / 0,46 = 107$$

$$Fc = 107 \text{ Kg/ha}$$

Campione 5: E' stata stimata una produzione di 90 qli/ha circa di mais.

La tessitura calcolata attraverso i valori di argilla, limo e sabbia del campione 5, risulta essere franco-argilloso

Nc: azoto derivante da erba medica è di 70 kg N/ha;

Nf: fertilizzazione organica assente;

An: apporti naturali di cui:

An1: deposizioni secche e umide dall'atmosfera 20 kg N/ha;

An2: b1 azoto immediatamente disponibile per la coltura. Si calcola sulla base della tessitura e del contenuto di azoto totale del suolo;

$$26 * 0,95 = 24,70 \text{ kg N/ha};$$

b2 azoto derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica. Si calcola sulla base della tessitura, del contenuto di sostanza organica del suolo e del rapporto C/N:

$$20 * 2,27(S.O.) = 45,40 \text{ kg N/ha};$$

Gli apporti di azoto derivanti dalla mineralizzazione della sostanza organica sono disponibili per la coltura in relazione al periodo in cui essa si sviluppa;

Pertanto b2 = azoto liberato in un anno x coefficiente tempo:

$$45,40 * 0,75 = 34,05 \text{ kg N/ha};$$

$$Kc * Fc = 46\% * x$$

Ko: assente;

Fo: assente;

Y: produzione della coltura: 90 quintali/ha;

B: coefficienti unitari di asportazione ovvero contenuto in azoto dei prodotti ottenuti dalle colture: Mais è 1,56 N/quintali;

$$Y * B = 90 * 1,56 = 140,4 \text{ kg N/ha};$$

C: prendiamo in considerazione il metodo per drenaggio in base alla tessitura: è 40 kg N/ha;

D: $An2 * fatt.correzione = (24,70 + 34,05) * 0,40 = 23,50$ kg N/ha;

$70 + 78,75 + 0,46x = 140,40 + 40 + 23,50$

$0,46x = 203,90 - 148,75$

$55,15 / 0,46 = 119,89$

$Fc = 120$ Kg/ha

Campione 6: E' stata stimata una produzione di 90 qli/ha circa di mais

La tessitura calcolata attraverso i valori di argilla, limo e sabbia del campione 6 , risulta essere franco-argilloso

Nc: azoto derivante da erba medica è di 70 kg N/ha;

Nf: fertilizzazione organica assente;

An: apporti naturali di cui:

An1: deposizioni secche e umide dall'atmosfera 20 kg N/ha;

An2: b1 azoto immediatamente disponibile per la coltura. Si calcola sulla base della tessitura e del contenuto di azoto totale del suolo;

$26 * 0,68 = 17,68$ kg N/ha;

b2 azoto derivante dalla mineralizzazione della sostanza organica. Si calcola sulla base della tessitura, del contenuto di sostanza organica del suolo e del rapporto C/N:

$20 * 2,66(S.O.) = 53,20$ kg N/ha;

Gli apporti di azoto derivanti dalla mineralizzazione della sostanza organica sono disponibili per la coltura in relazione al periodo in cui essa si sviluppa;

Pertanto $b2 =$ azoto liberato in un anno x coefficiente tempo:

$53,20 * 0,75 = 39,90$ kg N/ha;

$Kc * Fc = 46\% * x$

Ko: assente;

Fo: assente;

Y: produzione della coltura: 90 quintali/ha;

B: coefficienti unitari di asportazione ovvero contenuto in azoto dei prodotti ottenuti dalle colture: Mais è 1,56 N/quintali;

$$Y*B= 90*1,56=140,4 \text{ kg N/ha};$$

C: prendiamo in considerazione il metodo per drenaggio in base alla tessitura: è 40 kg N/ha;

$$D: An2*fatt.correzione = (17,68+39,90) *0,40= 23,03 \text{ kg N/ha};$$

$$70+77,58+0,46x=140,40+40+23,03$$

$$0,46x=203,43-147,58$$

$$55,85/0,46=121,41$$

$$Fc=121\text{Kg/ha}$$

Di seguito la tabella mostra i risultati che si sono ottenuti dal bilancio dell'azoto e i rispettivi confronti tra concimazioni convenzionali e concimazione di precisione.

Tabella 4 Confronto tra costi

Campione	Bilancio N AP kg/ha	Dose tradizionale kg/ha	Costo concime per tradizionale (Euro/ha)	Dose AP kg/ha	Costo concime in AP (Euro/ha)	Risparmio euro/ha
1	61,99	400	196	135	66	130
2	62,76	400	196	136	67	129
3	65,89	400	196	143	70	126
4	49,52	400	196	108	53	143
5	55,15	400	196	120	59	137
6	55,85	400	196	121	59	137

Si può notare ad esempio nel campione 1 che nella concimazione tradizionale, distribuendo omogeneamente il concime si ha un costo del solo concime pari a 196 €/ha, mentre utilizzando una distribuzione specifica per la zona il costo del concime si riduce a 66 €/ha, con un risparmio a ettaro di 130 €/ha. Anche nel campione 2 possiamo trovare un risparmio ad ettaro simile, 129 €/ha, dato dalla differenza tra 196 €/ha nella concimazione tradizionale e 67 €/ha in quella di precisione. Il valore che presenta maggior risparmio è dato dal campione 4, di ben 143 €/ha, dovuto probabilmente al valore dell'azoto totale più alto degli altri campioni (1,19).

Per la tipologia di fertilizzante utilizzato si è scelta l'urea, concime che presenta anche un ottimo rapporto qualità/prezzo rispetto ad altri concimi azotati presenti sul mercato, ha titolo in azoto pari al 46% ed un costo di 0,49€/kg.

Per il solo costo del fertilizzante della zona 1 l'agricoltore spenderebbe circa 196 €/ha, mentre per la zona 2 spenderebbe circa 96 €/ha.

Ad oggi la fertilizzazione che l'agricoltore effettua è pari a 400 kg/ha divise in due distribuzioni; 200kg alla fase di seconda/terza foglia vera, mentre i restanti 200kg distribuiti alla fase di quinta/sesta foglia vera. Pertanto, la differenza in termini economici fra l'applicazione uniforme e quella a rateo variabile è di circa 130 €/ha nell'analisi del primo campione.

Capitolo 9

DISCUSSIONI

Negli ultimi anni, la caratterizzazione ad alta risoluzione delle proprietà fisico-chimiche del suolo si è affermata come uno dei pilastri fondamentali per l'ottimizzazione degli input agronomici nell'ambito della transizione digitale dell'agricoltura (Casa et al., 2018). In questo scenario, la mappatura della conducibilità elettrica apparente (EC_a) rappresenta una risposta tecnologica matura ed efficiente per interpretare la variabilità spaziale dei suoli aziendali.

Rispetto ai metodi di campionamento tradizionali, che richiedono tempi prolungati e un elevato dispendio economico a fronte di una limitata rappresentatività statistica, il rilievo sensoriale della EC_a consente di coprire superfici estese in tempi estremamente ridotti. Utilizzando sistemi a strascico o a induzione elettromagnetica accoppiati a trattori o quad, o tramite rilievi pedonali per piccoli appezzamenti, (Castrignanò et al., 2019). L'investimento economico richiesto si concentra prevalentemente sul noleggio o l'acquisto della strumentazione, sulle competenze professionali necessarie per il processamento dei dati e il costo dell'operatore che lo attua. Tuttavia, sotto l'aspetto interpretativo, è fondamentale ribadire che la EC_a non fornisce una quantificazione diretta di nutrienti chiave come l'azoto, il fosforo o la sostanza organica, bensì riflette l'effetto combinato di proprietà stabili e dinamiche, quali la tessitura, l'umidità e la capacità di scambio cationico (Priori et al., 2013).

Di conseguenza, per la redazione di un bilancio nutrizionale accurato (in particolare per l'azoto), l'analisi chimica diretta in laboratorio resta un passaggio imprescindibile. Il vero valore aggiunto della mappatura della conducibilità elettrica risiede quindi nella capacità di delimitare le cosiddette Zone omogenee. All'interno di queste macroaree omogenee è possibile impostare strategie di campionamento intelligente (smart sampling), superando i rigidi e inefficienti schemi geometrici classici (come le griglie

o i percorsi a "W") a favore di un prelievo mirato che massimizza la precisione del dato con il minor numero di campioni possibile (Mazzetto et al., 2020).

Dalle analisi effettuate il campo non presenta grandi anomalie, anche la dotazione di fosforo è buona, di seguito si ha una tabella relativa alla quantità di fosforo necessaria per il mais, non serve quindi apportarne altro con concimazioni.

Limite inferiore e superiore della classe di dotazione "normale" in P2O5 (mg/kg)

Classe coltura	Tendenzialmente sabbioso	Franco	Tendenzialmente argilloso
frumento duro, frumento tenero, sorgo, avena, orzo	da 18 a 25	da 23 a 28	da 30 a 39
mais ceroso, mais da granella, soia, girasole	da 1a a 21	da 18 a 25	da 23 a 30
barbabietola, bietola	da 23 a 30	da 30 a 39	da 34 a 44
tabacco, patata, pomodoro da industria, pisello fresco, pisello da industria, asparago, carciofo, cipolla, aglio, spinacio, lattuga, cocomero, melone, fagiolino da industria, fagiolo da industria, fragola, melanzana, peperone, cavolfiore	da 25 a 30	da 30 a 35	da 35 a 40
medica e altri erbai	da 34 a 41	da 41 a 50	da 46 a 55
Arboree	da 16 a 25	da 21 a 39	da 25 a 48

Fonte Regione Campania

Figura 17 Quantità di P2O5 necessaria per il mais

Un' ulteriore incremento della precisione e dell'efficienza di queste tecniche sarebbe dovuta all'adozione di una macchina raccoglitrice a pesata continua, in grado di restituire dati di resa per le singole zone prese in esame.

Capitolo 10

CONCLUSIONI

Le analisi condotte nel presente lavoro di tesi hanno evidenziato come l'impiego di strumenti prossimali per la misurazione della conducibilità elettrica del suolo rappresenti un valido supporto per la caratterizzazione della variabilità spaziale delle proprietà fisico-chimiche del terreno. Tali strumenti, tuttavia, non possono sostituire i campionamenti del suolo, ma devono essere necessariamente integrati con essi al fine di ottenere una mappatura accurata e affidabile delle principali caratteristiche nutrizionali.

L'applicazione del bilancio dell'azoto, basata sull'integrazione dei dati di conducibilità, delle analisi chimiche del suolo, ha consentito di ottimizzare la gestione della fertilizzazione azotata, determinando una riduzione costi passando da 196 €/ha a 66 €/ha. Tale ottimizzazione si è tradotta in un risparmio economico di 130 €/ha nel primo campione analizzato, nel migliore dei casi arrivando anche a 147 €/ha.

I dati di resa si sono rivelati uno strumento utile per il lavoro di tesi in oggetto; tuttavia, la loro affidabilità risulta maggiore in appezzamenti dove si utilizzano tecniche come la pesata continua nelle raccogliatrici, nei quali le operazioni di raccolta generano altri dati per un miglior calcolo del bilancio dell'azoto.

In conclusione, i risultati di questo studio confermano come l'adozione delle tecniche di agricoltura di precisione rappresenti un approccio efficace per migliorare l'efficienza d'uso dei fattori produttivi, ridurre i costi di gestione e contribuire al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità economica e ambientale promossi dalle attuali politiche agricole europee.

BIBLIOGRAFIA

Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Kocher, M. F., & Singh, R. D. (2004). *On-the-go soil sensors for precision agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, 44(1), 71-91.

Agriculture and Horticulture Development Board (AHDB). (2026). *Soil scanning surveys and electrical conductivity variation*. AHDB Knowledge Library.

Alasia, L., Balestra, G., & Remondino, M. (2017). *Il ruolo del contoterzismo nell'adozione dell'agricoltura di precisione in Italia: Analisi economica e barriere all'investimento*. Rivista di Economia Agraria, 72(2), 185-204.

Balafoutis, A., Beck, B., Fountas, S., Vangeyte, J., Walczyk, T., Bodria, L., Woo, E., Constantin, O., Mylonas, D., & Panagiotopoulos, P. (2017). *Precision agriculture technologies positively contributing to greenhouse gas mitigation*. Sustainability, 9(7), 1239.

Basso, B., Cammarano, D., Troccoli, A., Chen, D., & Ritchie, J. T. (2012). *Long-term wheat yield spatial and temporal stability using GIS and crop simulation model*. Agronomy Journal, 104(3), 740-746.

Ben-Dor, E., Chabrillat, S., Demattê, J. A. M., Taylor, G. R., Hill, J., Whiting, M. L., & Sommer, S. (2009). *Using imaging spectroscopy to study soil properties*. Remote Sensing of Environment, 113, S38-S55.

Bezdek, J. C., Ehrlich, R., & Full, W. (1984). *FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm*. Computers & Geosciences, 10(2-3), 191-203.

Biermacher, J. T., Epplin, F. M., Brorsen, B. W., Solie, J. B., & Raun, W. R. (2009). *Economic feasibility of an overnight switch to variable rate nitrogen fertilizer application for winter wheat*. Journal of Agricultural and Applied Economics, 41(3), 611-623.

Biermacher, J. T., Siewerdt, F., Epplin, F. M., Solie, J. B., Stone, W. R., & Raun, W. R. (2009). *Economic feasibility of site-specific optical sensor-directed variable rate nitrogen fertilizer for winter wheat*. Precision Agriculture, 10(3), 213-230.

Bisaglia, C. (2018). *Tecnologie e prospettive per l'agricoltura di precisione*. CREA - Centro di ricerca Ingegneria e Trasformazioni agroalimentari.

- Burgess, T. M., & Webster, R. (1980). *Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging*. Journal of Soil Science, 31(2), 315-331.
- Casa, R., Castaldi, F., Pascucci, S., & Palombo, A. (2018). *Applicazioni di agricoltura di precisione per la gestione della fertilizzazione azotata*. Rivista di Agronomia, 13(1), 12-25.
- Casa, R., et al. (2018). *Piattaforme di telerilevamento e prossimali per l'agricoltura di precisione: Stato dell'arte e prospettive in Italia*. Rivista di Agronomia, 52(2), 115-128.
- Casa, R., Castrignanò, A., & Troccoli, A. (2019). *Agricoltura di precisione: Metodi e tecnologie per una coltivazione sostenibile*. Edagricole-New Business Media.
- Castrignanò, A., De Benedetto, D., & Ladisa, G. (2012). *Use of electromagnetic induction sensor for delineating management zones in Mediterranean agriculture*. Soil Science Society of America Journal, 76(4), 1313-1325.
- Castrignanò, A., et al. (2018). *Spatial Microeconometrics*. In: Precision Agriculture: Evolution, Science and Technology. Springer, Cham.
- Castrignanò, A., Buttafuoco, G., Khosla, R., & Mouazen, A. M. (2019). *Sensoristica prossimale e geostatistica per la delimitazione delle zone di gestione uniforme nel bacino del Mediterraneo*. Italus Hortus, 26(2), 45-58.
- Censini, M. (2019). *Electromagnetic methods for near-surface applications: a critical analysis of different investigation approaches*. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova.
- Chang, J., Clay, D. E., Carlson, C. G., Clay, S. A., Malo, D. D., Senthilkumar, S., & Ellsbury, M. M. (2004). *Defining variables and refining management zone boundaries with principal component analysis and clustering*. Journal of Plant Nutrition, 27(10), 1693-1708.
- Chuvieco, E. (2020). *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach*. CRC press.
- Clevers, J. G., & Kooistra, L. (2012). *Using Sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of agricultural crops*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5(2), 574-583.
- Corwin, D. L., & Lesch, S. M. (2005). *Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, 46(1-3), 11-43.
- Demattê, J. A. M., Alves, M. R., Gallo, B. C., Fongaro, C. T., & Tarallo, Z. (2014). *Multi-temporal satellite imagery for soil spectral characterization and mapping*. Scientia Agricola, 71(6), 498-510.

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). *Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services*. Remote Sensing of Environment, 120, 25-36.

Emery, X. (2001). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley, New York.

European Commission (2020). *A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system*. Communication from the Commission, COM(2020) 381 final, Brussels.

Food and Agriculture Organization [FAO]. (2023). *The Status of Digital Agriculture in the World: Challenges, opportunities and structural transformations*. FAO Publications.

Fraisse, C. W., Sudduth, K. A., & Kitchen, N. R. (2001). *Delineation of site-specific management zones by unsupervised cluster analysis of topographic and soil properties*. Transactions of the ASAE, 44(6), 1523-1531.

Fridgen, J. J., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Wiebold, W. J., & Fraisse, C. W. (2004). *Management Zone Analyst (MZA) software for sub-field management zone delineation*. Agronomy Journal, 96(1), 100-108.

Gitelson, A. A. (2004). *Wide dynamic range vegetation index for remote sensing of biophysical characteristics of vegetation*. Journal of Plant Physiology, 161(2), 165-173.

HH Publisher. (2025). *Function and application of Soil Electrical Conductivity (EC) sensor in agriculture: A Review*. Asian Agri-History Research Journal, 6(1), a0000552.

Heil, K., & Schmidhalter, U. (2017). *The application of EM38 and Veris sensors to determine spatial soil heterogeneity*. Geoderma, 305, 343-356.

Houborg, R., & McCabe, M. F. (2018). *A Cubesat enabled spatio-temporal enhancement method (CESTEM) for automatic flux and variable mapping*. Remote Sensing, 10(4), 572.

Huete, A. R. (1988). *A soil-adjusted vegetation index (SAVI)*. Remote Sensing of Environment, 25(3), 295-309.

Incrocci, L., Massa, D., & Pardossi, A. (2017). *Gestione della concimazione a rateo variabile nelle colture erbacee e orticole: Principi di nutrizione minerale e sensori ottici prossimali*. Rivista di Agronomia, 52(3), 145-162.

Inglada, J., Vincent, A., Arias, M., Tassone, B., & Morin, D. (2017). *Operational cropland mapping with Sentinel-2; a Scientific Products Validation contribution*. Remote Sensing, 9(6), 611.

International Society of Precision Agriculture [ISPA]. (2019). *Official Definition of Precision Agriculture*. <https://www.ispag.org/about/definition>

ISTAT. (2021). *7° Censimento generale dell'agricoltura. Struttura e dimensione delle aziende agricole italiane*. Istituto Nazionale di Statistica.
<https://www.istat.it/it/censimenti/agricoltura>

ISTAT. (2024). *Superficie agricola utilizzata (SAU): aggiornamenti strutturali e dinamiche recenti*. Istituto Nazionale di Statistica.

Jones, H. G., & Vaughan, R. A. (2010). *Remote sensing for vegetation principles and applications*. Oxford University Press.

Kayad, A., Marinello, F., et al. (2019). *Monitoring crop spatial variability using satellite imagery and proximal sensing in North-Eastern Italy*. Precision Agriculture, 20(3), 512-532.

Knight, S., Kiani, M., & King, A. (2019). *Quantifying the economic and environmental efficiency of GNSS-guided satellite autosteer systems in large-scale arable farming*. Precision Agriculture, 20(5), 987-1004.

Kuennen, M., et al. (2020). *Evaluation of pull-type and autonomous carrier platforms for proximal soil sensing in European cropping systems*. Precision Agriculture, 21(5), 1089-1107.

Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). *Setting the record straight on precision agriculture adoption*. Agronomy Journal, 111(4), 1552-1569.

MacQueen, J. (1967). *Some methods for classification and analysis of multivariate observations*. Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1(14), 281-297.

Marinello, F., et al. (2017). *Technical and economic evaluation of proximal and remote sensing applications in Italian viticulture*. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 19(2), 74-83.

Matese, A., & Di Gennaro, S. F. (2015). *Tecnologia e sensoristica per l'irrigazione di precisione: L'integrazione tra sensori ipogei e sistemi di supporto alle decisioni (DSS)*. Italian Journal of Agrometeorology, 20(2), 45-58.

Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., Genesio, L., Vaccari, F. P., Primicerio, J., Belli, C., Zaldei, A., & Fiorillo, F. (2015). *Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture*. Remote Sensing, 7(3), 2971-2990.

Matheron, G. (1963). *Principles of geostatistics*. Economic Geology, 58(8), 1246-1266.

McBratney, A. B., Webster, R., & Burgess, T. M. (1981). *The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of soil properties---I*. Computers & Geosciences, 7(4), 335-365.

McNeill, J. D. (1980). *Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers*. Technical Note TN-6, Geonics Ltd., Mississauga, ON, Canada.

- Misturini, D. (2025). *Mappatura dei suoli basilare per l'agricoltura e per l'ambiente*. Il Contoterzista, Edagricole.
- Mouazen, A. M., et al. (2007). *On-line measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor*. Soil and Tillage Research, 93(1), 13-27.
- Mulder, V. L., de Bruin, S., Schaepman, M. E., & Mayr, T. R. (2011). *The use of remote sensing in soil science: A review*. Geoderma, 162(1-2), 1-19.
- Mulla, D. J. (1991). *Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield*. Soil Science Society of America Journal, 55(4), 1100-1107.
- Mulla, D. J. (2013). *Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps*. Biosystems Engineering, 114(4), 358-371.
- Mulla, D. J., & Schepers, J. S. (2015). *History of Precision Agriculture*. In: Principles of Precision Agriculture. ASA-CSSA-SSSA, Madison.
- Mazzetto, F., Calcante, A., & Sacco, P. (2020). *Tecnologie e metodi per il campionamento guidato del suolo in agricoltura di precisione*. Ingegneria Agraria, 51(3), 112-124.
- National Research Council [NRC]. (1997). *Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management*. National Academies Press.
- Nutini, F., Ali, A., & Boschetti, M. (2021). *The role of Sentinel-2 in the context of the Common Agricultural Policy (CAP) monitoring: A review of European experiences*. European Journal of Remote Sensing, 54(1), 324-340.
- Nyéki, A., Kovács, A. J., & Neményi, M. (2026). *Digitalization of European agriculture: Policy frameworks, Farm to Fork compliance, and variable rate technology adoption*. European Journal of Agronomy, 172, 127410.
- Odeh, I. O., Chittleborough, D. J., & McBratney, A. B. (1992). *Soil pattern recognition with fuzzy-c-means: Application to classification and soil-landform mapping*. Soil Science Society of America Journal, 56(2), 505-516.
- Oksanen, T., Kosonen, J., & Visala, A. (2005). *ISOBUS tractor simulator in development of open architecture ISO 11783 controller application*. IFAC Proceedings Volumes, 38(1), 275-280.
- Osservatorio Smart Agrifood. (2024). *L'Agricoltura 4.0 in Italia alla prova della maturità: Numeri, tecnologie e modelli di adozione*. Politecnico di Milano e Università degli Studi di Brescia.
- Osservatorio Smart Agrifood. (2025). *La digitalizzazione della filiera agrifood in Italia: Trend di mercato, barriere e adozione delle tecnologie 4.0*. Politecnico di Milano e Università degli Studi di Brescia.

- Pennesi, A. (2026). *Applicazione di tecnologie di agricoltura di precisione mediante mappatura della conducibilità elettrica apparente*. Tesi di Laurea, Università Politecnica delle Marche.
- Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). *Aspects of precision agriculture*. *Advances in Agronomy*, 67, 1-85.
- Priori, S., Costantini, E. A. C., & Pellegrini, S. (2013). *La conducibilità elettrica apparente del suolo come proxy per la mappatura della tessitura e della capacità idrica nei vigneti italiani*. *Bollettino della Società Italiana della Scienza del Suolo*, 62(1), 89-101.
- Rouse, J. W., Haas, R H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, 309-317.
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... & Zhu, Z. (2014). *Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global study*. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154-172.
- Rsham, A., et al. (2022). *Agricultural robotics in the European context: Current trends under the Horizon framework*. *Robotics and Autonomous Systems*, 148, 103945.
- Saiz, J. A., Kumar, A., & Zhang, L. (2026). *Automation in smallholder farming systems: Drone applications and low-cost sensor integration in the Asia-Pacific region*. *Precision Agriculture*, 27(2), 341-365.
- Sartori, L., et al. (2021). *Operational comparison between proximal sensing and Copernicus Sentinel-2 data for variable rate fertilization in European contexts*. *European Journal of Agronomy*, 124, 126230.
- Schimmelpfennig, D. (2016). *Farm profits and adoption of precision agriculture* (Economic Research Report No. 217). U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service.
- Simbahan, G. C., Dobermann, A., & Ping, J. L. (2004). *Screening available soil data for delineating management zones in precision agriculture*. *Soil Science Society of America Journal*, 68(5), 1801-1815.
- Sozzi, M., Kayad, A., Marinello, F., et al. (2020). *Comparing satellite imagery solutions for precision agriculture in the European context*. *Agronomy*, 10(11), 1636.
- Stafford, J. V. (2000). *Implementing precision agriculture in the 21st century*. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(3), 267-275.
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R. A., Mouazen, A. M., & Wetterlind, J. (2010). *Visible and near infrared spectroscopy in soil science*. *Advances in Agronomy*, 107, 163-215.

- Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Bollero, G. A., Bullock, D. G., & Wiebold, W. J. (2003). *Comparison of electromagnetic induction and direct-contact methods for soil electrical conductivity measurement*. Transactions of the ASAE, 46(2), 473-481.
- Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Wiebold, W. J., Batchelor, W. D., Bollero, G. A., Bullock, D. G., ... & Yan, L. (2005). *Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the United States Corn Belt*. Computers and Electronics in Agriculture, 46(1-3), 263-283.
- Sudmanns, M., Augustin, H., Killigh, M., et al. (2020). *Big Earth data architecture and cloud computing for Sentinel-2 time series in Europe*. International Journal of Digital Earth, 13(7), 815-833.
- Trivelli, L., Apicella, A., Chiarello, F., Rana, R., Fantoni, G., & Tarabella, A. (2019). *From precision agriculture to Industry 4.0: Unveiling technological trends in the agrifood sector*. British Food Journal, 121(7), 1473-1493.
- Veloso, A., Mermoz, S., Bouvet, A., Le Toan, T., Planells, M., Dejoux, J. F., & Ceschia, E. (2017). *Understanding the temporal behavior of crops using Sentinel-1 and Sentinel-2 data*. Remote Sensing of Environment, 201, 360-373.
- Villa, P., Bresciani, M., et al. (2015). *Remote sensing of macrophyte communities in temperate lakes: Application of Sentinel-2 simulated imagery*. Remote Sensing of Environment, 157, 181-192.
- Viri, S. (2016). *Struttura fondiaria e digital divide nell'agro-sistema italiano: Un'analisi statistica della demografia aziendale*. QA Rivista dell'Associazione Rossi-Doria, 2016(4), 112-135.
- Viscarra Rossel, R. A., Walvoort, D. J. J., McBratney, A. B., Janik, L. J., & Skjemstad, J. O. (2006). *Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties*. Geoderma, 131(1-2), 59-75.
- Vrieling, A., et al. (2018). *Estimating the onset of the growing season in Europe using Sentinel-2 times series*. Remote Sensing of Environment, 209, 154-165.
- Vrochidou, E., et al. (2022). *Autonomous navigation and sensor integration in agricultural robots for European viticulture*. Agronomy, 12(4), 923.
- Wetzel, P., et al. (2021). *Large-scale soil property estimation using the European LUCAS spectral library: Performance and limitations of chemometric models*. European Journal of Soil Science, 72(4), 1602-1618.
- Yu, X., Smith, J. D., & Silva, F. (2026). *Global structural variations in precision agriculture: A comparative analysis of variable rate technology (VRT) in North and South*

American large-scale cropping systems. Computers and Electronics in Agriculture, 231, 108950.