



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE AGRARIE E DEL TERRITORIO

**AGRICOLTURA DI PRECISIONE:
STUDIO DELLA CONCIMAZIONE UREICA
CON DRONE SUI SEMINATIVI**

**precision agriculture:
study of drone-based urea fertilization on arable
crops**

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
Dennis Patrignani

Relatore:
PROF./DOTT. LUIGI LEDDA

Correlatore:
DOTT. MARCO FIORENTINI

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI.....	8
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI.....	11
CAPITOLO 1 AGRICOLTURA DI PRECISIONE.....	15
1.1 La mappatura degli studi scientifici in AP	16
1.2 Il mercato dell'AP in Italia.....	21
1.2.1 Le tipologie di contributi	24
1.3 La variabilità	27
1.4 La georeferenziazione della variabilità	30
1.5 La misurazione della variabilità	34
1.5.1 Il telerilevamento	34
1.5.1.1 La radiazione elettromagnetica	35
1.5.1.2 La riflettanza della vegetazione e i suoi indici di vegetazione.....	37
1.5.1.3 La riflettanza del suolo	40
1.5.1.4 La sensoristica.....	42
1.5.1.5 Le piattaforme di telerilevamento	46
1.6 L'analisi della variabilità.....	49
1.6.1 Geographic Information Systems (GIS)	50
1.6.2 La geostatistica.....	50
1.6.3 I modelli di simulazione e i sistemi di supporto alle decisioni (DSS)	51
1.7 Gestione aziendale dei dati.....	52
CAPITOLO 2 I DRONI.....	55
2.1 Il Quadro Normativo per l'Impiego degli UAV in Agricoltura	55
2.1.1 Il ruolo dell'ENAC e la transizione normativa in Italia	57
2.1.2 I percorsi autorizzativi in Categoria Specifica	57
2.1.2.1 PDRA S01: Il FTS (Flight Termination System) e il superamento dell'obbligo di paracadute.....	61

2.1.3 Certificazione del pilota e adempimenti dell'operatore	62
2.1.4 L'irrorazione degli agrofarmaci tramite UAS.....	65
2.1.4.1 .Le sperimentazioni regionali: il caso della Lombardia	66
2.1.5 Distribuzione dei fertilizzanti vs degli agrofarmaci.....	68
2.1.6 Le conseguenze della non conformità: casi recenti di volo abusivo	68
2.2 Specifiche tecniche degli UAV	69
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI.....	74
3.1 Descrizione aziendale.....	74
3.2 Descrizione del sito sperimentale.....	74
3.3 Gestione agronomica.....	75
3.4 Caratteristiche della concimazione	76
3.4.1 Con trattore	76
3.4.2 Con drone.....	77
3.4.2.1 Caratteristiche del T50.....	77
3.4.2.2 Piano di distribuzione	80
3.5 Monitoraggio della coltura.....	82
3.6 Dati di resa – mietitrebbia a pesata continua.....	83
CAPITOLO 4 RISULTATI	84
4.1 Concimazione con il drone.....	84
4.2 Monitoraggio della coltura.....	90
4.3 Dati di resa	91
CAPITOLO 5 DISCUSSIONI.....	98
5.1 Attività future consigliate.....	98
5.2 Vantaggi e svantaggi della concimazione granulare tramite UAS.....	102
CAPITOLO 6 CONCLUSIONI	105
BIBLIOGRAFIA	106

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 2-1: Confronto fra gli scenari PDRA-S01 e PDRA-S02	58
Tabella 2-2: Confronto tecnico fra il T50 e le piattaforme UAV di fascia alta DJI Agras T100 e XAG P150 Max (DJI agriculture, 2025; XAG, 2025;).	70
Tabella 3-1: Gestione agronomica dell'avena.....	75
Tabella 3-2: Gestione agronomica frumento duro	76
Tabella 3-3: Gestione agronomica girasole.....	76
Tabella 4-1: indicatori del piano di distribuzione	88
Tabella 4-2: valore economico del calpestio e ammortamento del drone	95
Tabella 4-3: Stima del costo per effettuare distribuzioni granulari professionali tramite il DJI Agras T100.....	96
Tabella 4-4: Stima del costo per effettuare distribuzioni granulari professionali tramite il DJI Agras T50.....	97
Tabella 5-1: Confronto fra il cantiere rilevato e lo scenario a carico ordinario di 47 kg	99

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1: tecnologie applicabili all'AP (Sharma et al., 2018).....	16
Figura 1-2: distribuzione degli articoli indicizzati al WoSCC, sull'agricoltura di precisione dal 2010 (Radočaj et al., 2023).	17
Figura 1-3: distribuzione degli articoli indicizzati al WoSCC, sull'agricoltura di precisione dal 2010, in base all'estensione del paese in km2 (Radočaj et al., 2023).	18
Figura 1-4: distribuzione degli articoli indicizzati al WoSCC, sull'agricoltura di precisione e sugli indici di vegetazioni dal 2010 (Radočaj et al., 2023).	19
Figura 1-5: distribuzione in percentuale degli articoli indicizzati al WoSCC dal 2010, sugli indici di vegetazioni rispetto al totale delle pubblicazioni sull' Agricoltura di Precisione (Radočaj et al., 2023).	20
Figura 1-6: L'evoluzione del valore del mercato italiano di Agricoltura 4.0 (Politecnico di Milano Dipartimento di Ingegneria Gestionale & Osservatorio Smart Agrifood, 2025)	21
Figura 1-7: spettro elettromagnetico (Cahyadi et al., 2020).....	35
Figura 1-8: Modulazione della firma spettrale in funzione dello stress vegetativo.....	38
Figura 1-9: curva spettrale della vegetazione (Sahoo et al., 2015)	39
Figura 1-10: rappresentazione dei principali cromofori del suolo (Chabrillat et al., 2019).	41
Figura 1-11: Articoli dal 2010 al 2022 indicizzati al WoSCC, in riferimento all'AP e alle tipologie di sensore applicato (Radočaj et al., 2023).....	46
Figura 2-1: mappa delle sperimentazioni in Italia (aretè, 2026)	67
Figura 2-2: Alcuni principali esiti dei progetti di sperimentazione in Italia (aretè, 2026)	67
Figura 3-1: Immagine satellitare della posizione del sito sperimentale	74
Figura 3-2: Delineazione del sito sperimentale, analisi della sua pendenza-giacitura e	75
Figura 3-3: DJI T50 con batterie e caricatore.....	80
Figura 3-4: piano di volo generale	81
Figura 3-5: piano di volo dettagliato	82
Figura 3-6: Drone DJI Mavic 3M	82
Figura 3-7: Mietitrebbia Jhon Deere T560.....	83
Figura 4-1: mappa dei voli per la concimazione	88

Figura 4-2: mappe NDVI	91
Figura 4-3: mappa di resa puntuale John Deere	92
Figura 4-4: mappa interpolazione delle rese	93
Figura 4-5: Variogramma sperimentale e modello spaziale matematico di fitting	93
Figura 4-6: Mappatura stimata delle traiettorie effettuate durante la concimazione e il trattamento.	97

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

AP	Agricoltura di Precisione
FAO	Food and Agriculture Organization
LDN	Land Degradation Neutrality
FAO	Food and Agriculture Organization
SAPR	Sistema Aereo a Pilotaggio Remoto
WOSCC	Web Of Science Core Collection
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
VRA	Variable Rate Application
VI	Vegetation Indices
SWIR	Short Wave InfraRed
NIR	Near-Infrared
LAI	Leaf Area Index
MIR	Mid-Infrared
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
FMIS	Farm Management Information System
SSCM	Site-Specific Crop Management
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
LIDAR	Light Detection and Ranging
RADAR	Radio Detection and Ranging
LWIR	Long-Wave Infrared
RGB	Red-Green-Blue

GSD	Ground Sampling Distance
GIS	Geographic Information Systems
NAVSTAR	Navigation System with Timing and Ranging
GLONASS	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
ESA	Agenzia Spaziale Europea
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
BDS	BeiDou Navigation Satellite System
DSS	Decision Support Systems
PPK	Post-Processed Kinematic
RTK	Real Time Kinematic
VLOS	Visual Line Of Sight
BVLOS	Beyond Visual Line Of Sight
ENAC	Ente Nazionale per l'Aviazione Civile
ALTMOC	Alternative Means of Compliance,
UAS	Unmanned Aircraft System
STS	Scenario Standard
OM	Manuale delle Operazioni
EASA	The European Authority for aviation safety
PDRA	Pre-Defined Risk Assessment
SORA	Specific Operations Risk Assessment
LUC	Light Unmanned Certificate
FTS	Flight Termination System
MTOM	Massa Massima al Decollo
PAN	Piano d'Azione Nazionale
SCIA	Segnalazione Certificata di Inizio Attività
UNCAI	Unione Nazionale Contoterzisti Agromeccanici e Industriali

DEM	Digital Elevation Model
CV	Coefficiente di Variazione
MRL	Maximum Residue Limit
FPV	First Person View

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Il settore primario si trova oggi ad affrontare una delle sfide più complesse della sua storia millenaria: garantire la sicurezza alimentare globale in un contesto di risorse limitate e di cambiamenti climatici. L'evoluzione storica dell'agricoltura, passata da pratiche empiriche tradizionali a sistemi meccanizzati, sta vivendo oggi un nuovo cambio di paradigma, spesso definito come Agricoltura 4.0 o Digital Farming. Questa transizione non è più un'opzione, ma una necessità dettata da pressioni economiche, demografiche e ambientali senza precedenti.

Le stime demografiche più recenti delle Nazioni unite (United Nations Department for Economic and Social Affairs, 2025) riportano che la popolazione mondiale ha raggiunto gli 8,2 miliardi di individui nel 2024 e si prevede che continuerà a crescere fino a toccare un picco di circa 10,3 miliardi a metà degli anni '80 del duemila. Tale incremento genererà una pressione sostanziale sui sistemi produttivi. Secondo le proiezioni della FAO al 2050 (The State of Food and Agriculture, 2020), per soddisfare la domanda alimentare globale non sarà sufficiente replicare i modelli produttivi del passato, ma sarà necessario adottare "percorsi alternativi" (Alternative Pathways) che garantiscano la sicurezza alimentare mitigando al contempo l'impatto sulle risorse naturali. L'intensificazione produttiva deve inoltre confrontarsi con la scarsità idrica, la riduzione della fertilità dei suoli e la necessità di preservare la biodiversità.

Il suolo rappresenta la risorsa primaria della produttività agricola e dell'erogazione di servizi ecosistemici essenziali (The State of Food and Agriculture, 2025). La sua vulnerabilità è accentuata da una fondamentale asimmetria temporale: la pedogenesi richiede scale temporali millenarie (Mason et al., 2016), mentre i processi di degrado possono manifestarsi con rapidità considerevole (Vlek, Paul L.G. et al., 2017), minacciando contestualmente i consorzi simbiotici suolo-microbiota che regolano la biodisponibilità dei nutrienti (Wubs et al., 2016). A scala globale, la progressiva perdita di funzionalità pedologica, con ricadute sulla produzione di biomassa, la regolazione idrica e il sequestro del carbonio; configura il degrado del suolo come una minaccia strutturale per la sicurezza alimentare mondiale (Lal, 2009).

All'interno degli ecosistemi agricoli, il deterioramento è primariamente riconducibile all'impoverimento del pool di nutrienti causato da regimi di successione colturale intensivi e da una gestione non conservativa della fertilità. Nelle aree soggette a regimi irrigui, la salinizzazione rappresenta un fattore di rischio critico, spesso accompagnato da fenomeni erosivi, sia di natura idrica che eolica, che accelerano l'asportazione degli orizzonti superficiali più fertili (IPBES, 2018) (Status of the World's Soil Resources, 2015).

Ulteriori pressioni antropiche derivano dall'impiego di meccanizzazione pesante, responsabile della compattazione del suolo (o costipamento), che ne altera la porosità e la conducibilità idraulica, limitando lo sviluppo radicale e gli scambi gassosi, influenzando negativamente anche la presenza di una maggiore biodiversità. A ciò si aggiunge l'impatto chimico derivante dall'uso inefficiente di fitofarmaci e fertilizzanti di sintesi, che può indurre fenomeni di inquinamento puntuale e diffuso, alterando la microflora e la microfauna edafica. La persistenza di regimi a monocoltura, infine, compromette la biodiversità e la resilienza del sistema, innescando un ciclo di degrado della sostanza organica che si traduce in una perdita di struttura, nell'aumento del deflusso superficiale (runoff) (Den Biggelaar et al., 2003).

Sebbene i fattori e le manifestazioni specifiche del degrado varino, le pratiche di gestione del territorio non sostenibili ne sono una causa comune. Comprendere gli impatti del degrado del territorio sulla produttività agricola e come questi impatti possano essere temporaneamente mascherati da un maggiore utilizzo di input, è essenziale per orientare gli sforzi volti a evitare, ridurre e invertire il degrado del territorio.

Al fine di indirizzare le strategie di conservazione pedologica, la Convenzione delle Nazioni Unite per la lotta alla desertificazione (UNCCD) ha definito una gerarchia di intervento prioritaria, articolata nelle fasi di evitare, ridurre e invertire il degrado che rappresenta il fondamento teorico per il raggiungimento della Neutralità del Degrado del Suolo (Land Degradation Neutrality - LDN). Tale struttura gerarchica riflette un criterio di efficienza economica e sistemica: la prevenzione del deterioramento su suoli integri e produttivi è considerata la strategia più efficace, in quanto preserva l'integrità dei servizi ecosistemici prima della manifestazione di danni irreversibili.

Laddove i processi di degradazione risultino già in atto, l'azione deve prioritariamente mirare alla mitigazione e all'arresto della loro progressione mediante l'implementazione di modelli di gestione sostenibile del territorio (Sustainable Land Management). In presenza di suoli gravemente compromessi o in stato di abbandono, si rendono necessari interventi di natura

trasformativa volti all'inversione del danno; tali misure implicano tipicamente operazioni di ripristino ecologico, mutamenti nella destinazione d'uso del suolo e investimenti strutturali a lungo termine, intervenendo su sistemi che hanno ormai oltrepassato le soglie critiche di resilienza per un utilizzo produttivo autonomo (The State of Food and Agriculture, 2025)

In questo scenario, la sostenibilità economica e quella ambientale diventano due facce della stessa medaglia. La gestione efficiente degli input produttivi, in particolare dei fertilizzanti, è cruciale. L'eccesso di concimazione non rappresenta solo un costo superfluo per l'azienda agricola, erodendo i margini di profitto, ma comporta gravi rischi ambientali, quali la lisciviazione dei nitrati e l'inquinamento delle falde.

La risposta a tali problematiche risiede nell'adozione dell'Agricoltura di Precisione (AP). Abbandonando la logica della gestione uniforme dell'appezzamento, l'AP mira a gestire la variabilità spaziale e temporale del campo, intervenendo con la giusta dose, nel momento giusto e nel punto giusto.

All'interno di questo ecosistema tecnologico, i Sistemi Aerei a Pilotaggio Remoto (SAPR), comunemente noti come droni o UAV (Unmanned Aerial Vehicles), rappresentano una tecnologia abilitante fondamentale. Grazie all'integrazione di sensori multispettrali, gli UAV permettono di monitorare lo stato nutrizionale delle colture con una risoluzione centimetrica, impossibile da ottenere con gli attuali rilievi satellitari. L'elaborazione di questi dati consente la creazione di "Mappe di Prescrizione" per la distribuzione a Rateo Variabile (VRA) dei concimi, ottimizzando l'efficienza d'uso dei nutrienti, e l'applicabilità diretta nella distribuzione da parte degli UAV. Questo risolverebbe un enorme problema delle attuali trattrici ovvero: il passaggio delle ruote provoca una riduzione della resa nelle fasce interessate. L'entità del danno non è però costante, ma dipende principalmente da due fattori:

- Condizioni del suolo → Se il terreno è bagnato, il peso della trattrice comprime gli aggregati e riduce la porosità. Ne conseguono una minore disponibilità di ossigeno per le radici e una maggiore resistenza alla penetrazione, che ostacola l'approfondimento dell'apparato radicale e quindi l'assorbimento di acqua e nutrienti. Lo stesso passaggio, effettuato su un terreno asciutto e in tempera, produce invece effetti molto più contenuti: la condizione idrica del suolo al momento dell'intervento è pertanto determinante.
- Fase fenologica → Durante l'accestimento le piante schiacciate possono essere in parte compensate dall'emissione di nuovi culmi dai nodi basali; inoltre, i tessuti meristematici presenti nei nodi permettono ai culmi coricati di raddrizzarsi attraverso il fenomeno della

ginocchiatura, ossia l'accrescimento di un solo lato del nodo, che forma una sorta di ginocchio e rialza la pianta. Nell'avena tale capacità assume particolare rilievo, poiché la specie ha taglia elevata ed è quindi predisposta all'allettamento. Con l'inizio della levata la pianta non emette più nuovi culmi e gli internodi si allungano e si irrigidiscono: una quota crescente di culmi viene perciò spezzata anziché soltanto piegata, e il danno diventa in larga parte irrecuperabile. La capacità di ginocchiatura si esaurisce completamente alla spigatura, momento oltre il quale i nodi perdono l'attività meristematica e la pianta coricata non è più in grado di rialzarsi. Ne deriva che più l'intervento di concimazione con la trattrice viene posticipato, maggiore è la perdita di resa lungo le carreggiate, fino al suo annullamento.

È doveroso considerare che nella tecnica convenzionale, la concimazione azotata di copertura dei cereali autunno-vernini viene eseguita tendenzialmente in due stadi fenologici differenti: entro l'inizio della fase di levata, stadio identificato e codificato come BBCH 31 (Meier, 2018), ed in prossimità della fase di botticella BBCH 45 (Meier, 2018).

L'impiego del UAV svincola integralmente l'operazione da tali vincoli. In assenza di contatto sia con il suolo sia con la coltura, la finestra di intervento non è più delimitata dallo stadio fenologico raggiunto né dalla portanza del terreno, ma unicamente dall'esigenza di azoto della pianta e dai limiti operativi della piattaforma. Diviene pertanto possibile frazionare l'apporto ureico ed eseguire le applicazioni, eventualmente a rateo variabile, anche in piena levata o in fase di botticella, ossia in corrispondenza del periodo di massimo fabbisogno azotato della coltura, con benefici attesi sull'efficienza d'uso dell'azoto, l'annullamento del danno meccanico ai culmi e il costipamento del suolo.

Il presente elaborato di tesi si propone di analizzare inizialmente le tecnologie applicabili all'AP, dopodiché descriverà il contesto normativo per l'utilizzo degli UAV ed alcune delle loro specifiche tecniche, infine verrà studiato l'impiego degli UAV nelle operazioni di concimazione, valutando come questa tecnologia possa integrarsi nei modelli aziendali per coniugare produttività e sostenibilità. Verranno esaminati gli aspetti tecnici del telerilevamento e le dinamiche di distribuzione, al fine di dimostrare come l'innovazione digitale possa tradursi in un vantaggio competitivo concreto per l'impresa agricola moderna.

Capitolo 1

AGRICOLTURA DI PRECISIONE

L'Agricoltura di Precisione (AP) è stata definita dalla Società Internazionale per l'Agricoltura di Precisione come " una strategia di gestione che raccoglie, elabora e analizza dati temporali, spaziali e individuali e li combina con altre informazioni per supportare le decisioni gestionali in base alla variabilità stimata per migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse, la produttività, la qualità, la redditività e la sostenibilità della produzione agricola " (Società internazionale di agricoltura di precisione, 2024).

L'AP si configura come l'attuale paradigma tecnologico volto all'ottimizzazione delle rese produttive, garantendo al contempo elevati standard qualitativi e una contestuale razionalizzazione dei fattori di produzione (Comba et al., 2018). L'AP è una disciplina fondata sull'integrazione di sistemi digitali e sensoristica avanzata, finalizzata a massimizzare l'efficienza gestionale attraverso il monitoraggio analitico dello stato colturale e la modulazione puntuale degli input. L'adozione di tali strategie consente di ottenere un miglioramento delle performance colturali (output), mitigando significativamente l'impatto ambientale mediante il contenimento degli sprechi di risorse idriche, energetiche e chimiche, quali fertilizzanti e fitofarmaci (Gimenez et al., 2015).

Sotto il profilo storico, l'origine dell'AP viene convenzionalmente ricondotta alla fine degli anni '90, in concomitanza con l'implementazione dei primi sistemi di posizionamento satellitare (GPS) sulle macchine operatrici. Questo scenario è stato reso possibile dalla declassificazione e dall'apertura agli usi civili del sistema di posizionamento satellitare GPS, precedentemente limitato ad esclusivi scopi militari statunitensi.

L'implementazione dell'Agricoltura di Precisione si fonda sull'integrazione sinergica di un ecosistema tecnologico avanzato, finalizzato all'acquisizione, alla gestione e all'analisi dei dati di campo. Come schematizzato nella Figura 1, tale framework operativo si avvale del contributo coordinato di diversi sistemi: i Sistemi Satellitari di Navigazione Globale (GNSS) per il posizionamento spaziale, i Sistemi Informativi Geografici (GIS) per la gestione dei dati georeferenziati e le tecniche di Telerilevamento per l'acquisizione di informazioni spettrali.

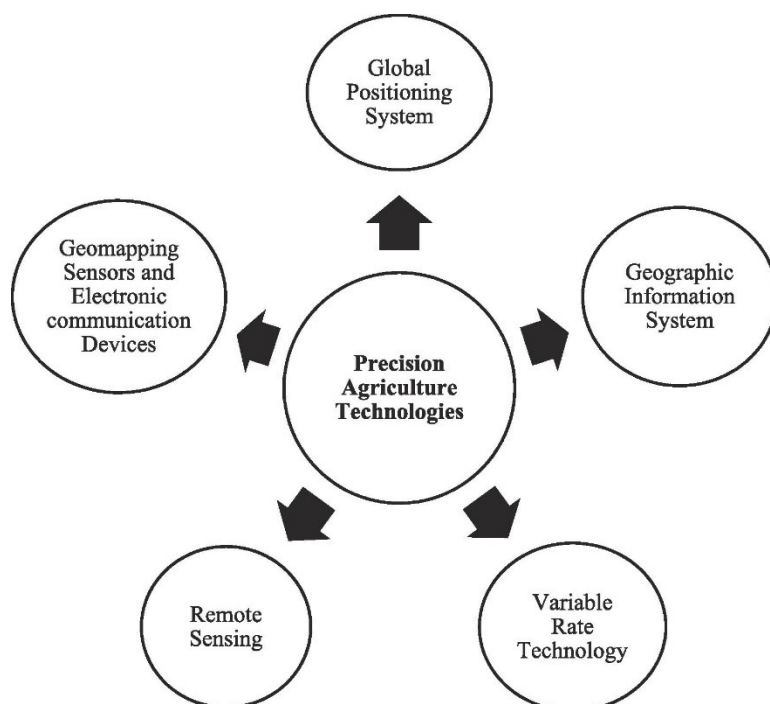


Figura 1-1: tecnologie applicabili all'AP (Sharma et al., 2018)

L'architettura è completata dalla geomappatura, dalla sensoristica avanzata, dai protocolli di comunicazione elettronica e dalle Tecnologie a Rateo Variabile (figura 1-1); queste ultime rappresentano l'elemento attuativo fondamentale per la distribuzione differenziata degli input colturali in base alle reali esigenze del campo (Sharma et al., 2018).

1.1 La mappatura degli studi scientifici in AP

Al fine di delineare un quadro quantitativo della produzione scientifica internazionale in materia di Agricoltura di Precisione, è possibile fare riferimento a un'analisi bibliometrica condotta sulla banca dati Web of Science Core Collection (WoSCC) (Radočaj et al., 2023). L'indagine ha articolato la ricerca su quattro dimensioni analitiche distinte: il volume complessivo di contributi scientifici per paese indicizzati con il descrittore "agricoltura di precisione"; un indice normalizzato che rapporta tale volume alla superficie territoriale di ciascun paese, al fine di rendere comparabili realtà geograficamente eterogenee; il numero di pubblicazioni che associano l'agricoltura di precisione allo studio degli indici di vegetazione; e infine la quota percentuale di quest'ultimi rispetto al totale, andando ad evidenziare il peso che gli indici di vegetazione rivestono nel panorama della ricerca di settore.

I risultati complessivi evidenziano come, su un corpus di 9.937 articoli corrispondenti ai criteri di ricerca, il 98,7% risulti pubblicato a partire dall'anno 2000, confermando come lo sviluppo scientifico in questo ambito sia un fenomeno essenzialmente contemporaneo, concentrato negli ultimi due decenni (Radočaj et al., 2023).

Sul piano della distribuzione geografica, gli Stati Uniti si confermano il paese maggiormente attivo, con 2.172 contributi indicizzati, seguiti dalla Cina con 1.557 pubblicazioni, dall'India con 802 e dal Brasile con 791 (figura 1-2). Tale primato statunitense riflette un livello di adozione tecnologica particolarmente avanzato, documentato dalla rapida diffusione di sistemi GNSS a bordo delle macchine operatrici e dall'impiego crescente di piattaforme UAV per l'ottimizzazione delle operazioni di semina, concimazione e gestione colturale; mentre per il telerilevamento rimane ancora ad oggi negli stati uniti indispensabile l'utilizzo delle immagini satellitari a causa delle elevate estensioni delle superfici agricole. La Cina, pur collocandosi al secondo posto per volume di produzione scientifica, si distingue per un orientamento tematico specifico, con una marcata concentrazione su obiettivi di sostenibilità ambientale, tra cui la riduzione dell'impiego di fertilizzanti e fitofarmaci e l'ottimizzazione delle risorse idriche, in risposta alle criticità

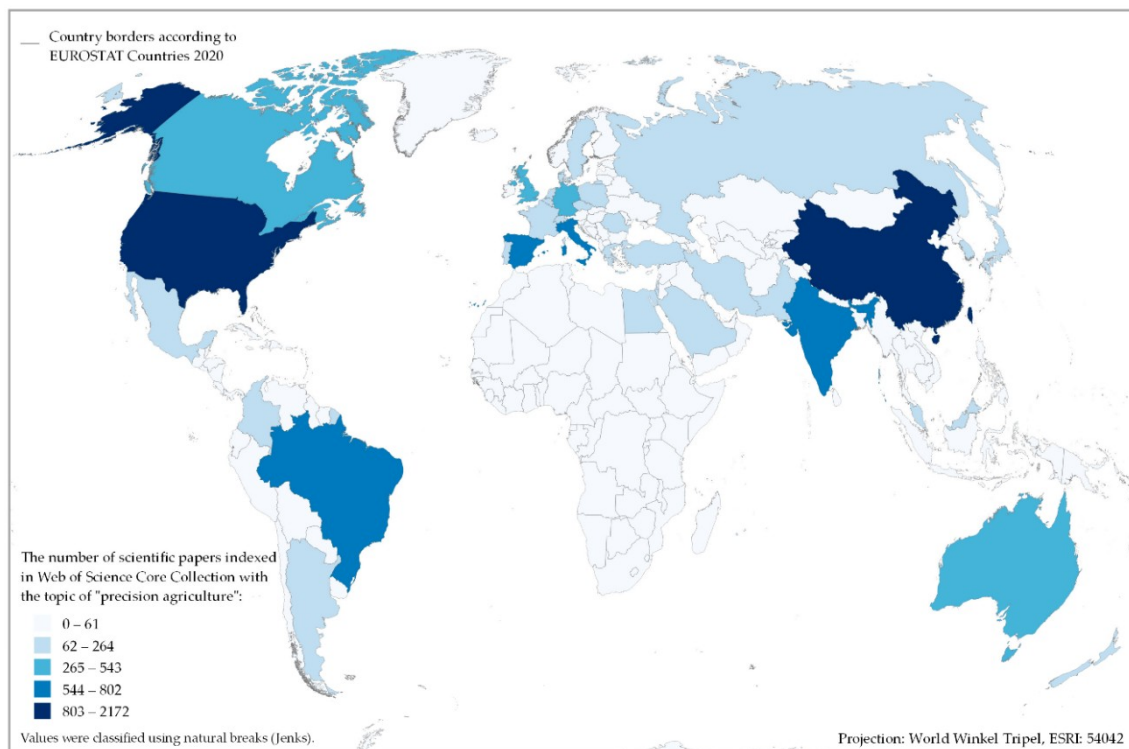


Figura 1-2: distribuzione degli articoli indicizzati al WoSCC, sull'agricoltura di precisione dal 2010 (Radočaj et al., 2023).

storiche legate all'inquinamento dei suoli e delle acque nel proprio territorio (Radočaj et al., 2023).

Un'analisi particolarmente significativa è quella condotta attraverso l'indice normalizzato per superficie territoriale: quest'ultimo rivela uno sviluppo globalmente più omogeneo di quanto il solo dato assoluto lascerebbe supporre, con la rilevante eccezione del continente africano, che risulta significativamente sottorappresentato rispetto alle proprie dimensioni territoriali, segnalando un divario strutturale nell'accesso e nell'adozione delle tecnologie di Agricoltura di Precisione (figura 1-3).

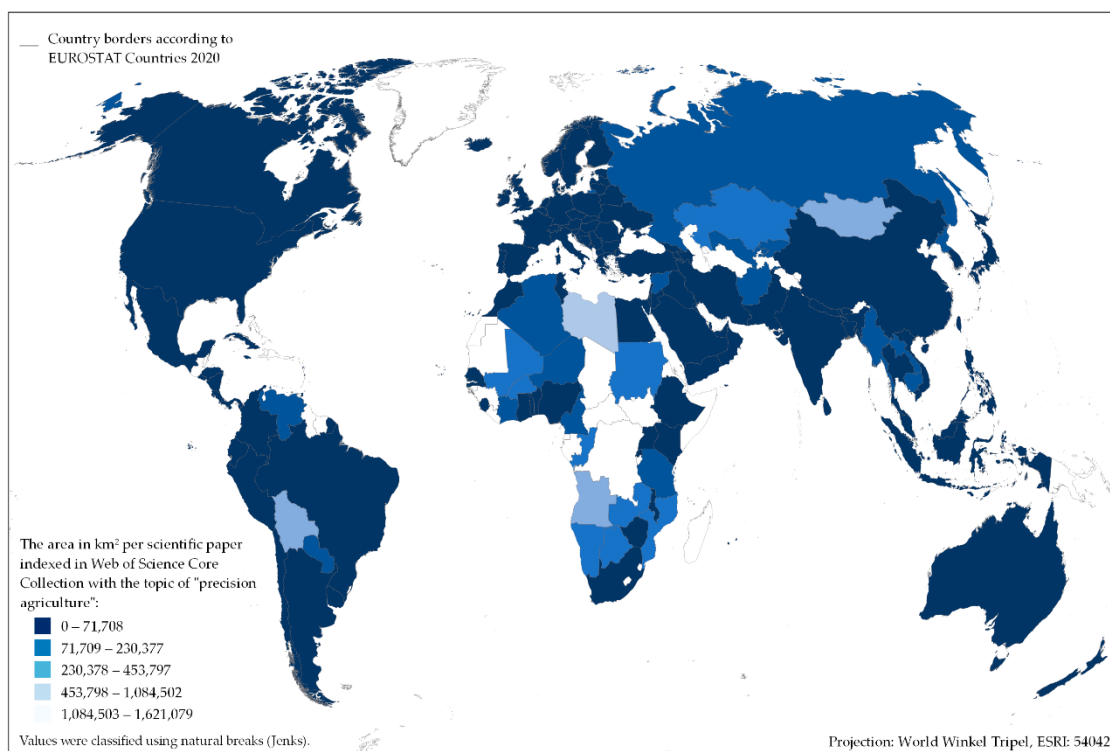


Figura 1-3: distribuzione degli articoli indicizzati al WoSCC, sull'agricoltura di precisione dal 2010, in base all'estensione del paese in km² (Radočaj et al., 2023).

Restringendo l'analisi ai soli contributi che integrano esplicitamente gli indici di vegetazione nell'ambito dell'Agricoltura di Precisione, si osserva come il volume assoluto delle pubblicazioni risulti sensibilmente inferiore rispetto al corpus complessivo, pur mantenendo una distribuzione geografica sostanzialmente analoga a quella già descritta (figura 1-4). In questo sottoinsieme tematico, la Cina si colloca al primo posto con 262 articoli, seguita dagli Stati Uniti con 239; a questi si affiancano i principali paesi europei, che in tale specifica categoria esprimono una presenza scientifica di rilievo. Spagna, Italia e Germania figurano rispettivamente con 119, 115 e 108 pubblicazioni, confermando come il contesto europeo abbia sviluppato una solida tradizione

di ricerca sull'impiego degli indici spettrali per il monitoraggio e la gestione delle colture (Radočaj et al., 2023).

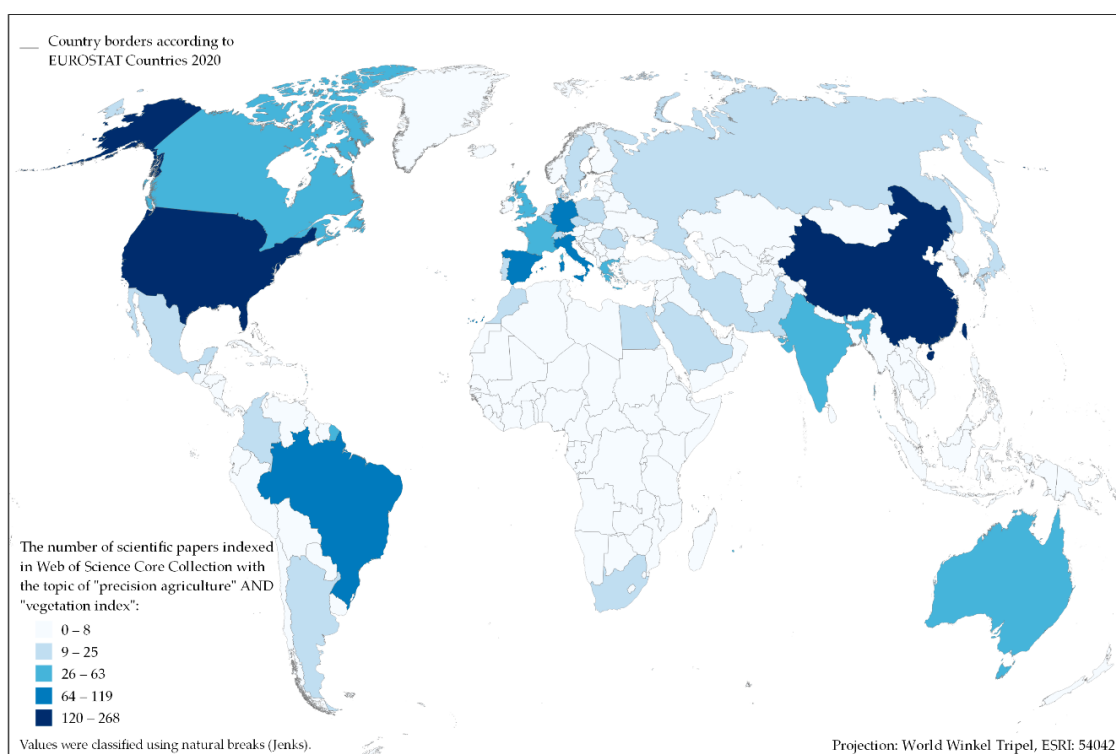


Figura 1-4: distribuzione degli articoli indicizzati al WoSCC, sull'agricoltura di precisione e sugli indici di vegetazioni dal 2010 (Radočaj et al., 2023).

Di particolare interesse analitico è il rapporto tra gli studi che hanno adottato gli indici di vegetazione e il totale delle pubblicazioni nazionali in materia di Agricoltura di Precisione: tale indice relativo presenta una distribuzione geografica considerevolmente più equilibrata su scala globale (figura 1-5). Tra i paesi con almeno dieci contributi complessivi nel settore, alcune realtà africane, tra cui Sudafrica, Zimbabwe, Mali e Marocco si collocano in posizioni di rilievo in questa graduatoria relativa, segnalando una propensione specifica verso l'utilizzo degli indici di vegetazione come strumento privilegiato di monitoraggio, verosimilmente in ragione della sua accessibilità metodologica rispetto ad altre tecnologie di precisione. Tale dato suggerisce che questi paesi potranno trarre significativi benefici dall'ulteriore sviluppo e dalla progressiva diffusione di queste tecniche nell'ambito dei propri sistemi produttivi agricoli.

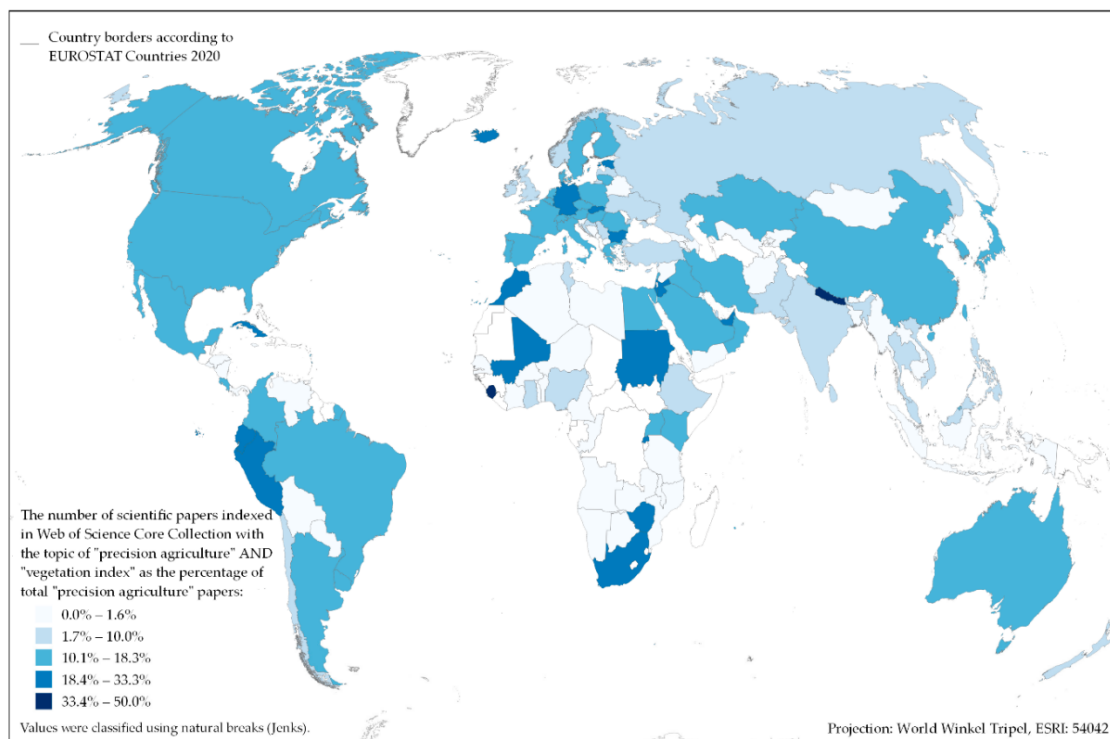


Figura 1-5: distribuzione in percentuale degli articoli indicizzati al WoSCC dal 2010, sugli indici di vegetazioni rispetto al totale delle pubblicazioni sull' Agricoltura di Precisione (Radočaj et al., 2023).

Va tuttavia rilevato come il percorso di transizione verso l'Agricoltura di Precisione nel continente africano si trovi ancora in una fase iniziale, nonostante un crescente interesse istituzionale e un progressivo incremento degli investimenti nel settore. Le principali barriere strutturali all'adozione sono riconducibili a due ordini di fattori: da un lato, la limitata disponibilità di risorse finanziarie per sostenere i costi di investimento iniziale in macchinari e sensoristica avanzata; dall'altro, la persistente carenza infrastrutturale in termini di connettività digitale, che compromette la gestione e la trasmissione dei dati in tempo reale, presupposto tecnico fondamentale per l'operatività dei sistemi di Agricoltura di Precisione (Radočaj et al., 2023).

1.2 Il mercato dell'AP in Italia

Il mercato italiano dell'Agricoltura 4.0 ha registrato per la prima volta una contrazione (Politecnico di Milano Dipartimento di Ingegneria Gestionale & Osservatorio Smart Agrifood, 2025).

L'annata agraria 2024, segnata da criticità climatiche che hanno impattato severamente su produzioni e prezzi, rappresenta uno spartiacque per l'innovazione digitale nel settore primario. In netta discontinuità con il trend espansivo che ha caratterizzato l'ultimo quinquennio. Dopo un ciclo di crescita ininterrotta, sostenuta massicciamente dagli incentivi pubblici, il valore del mercato nel 2024 si è attestato a 2,3 miliardi di euro, segnando un calo dell'8% rispetto ai picchi raggiunti nel 2023 (figura 1-6).

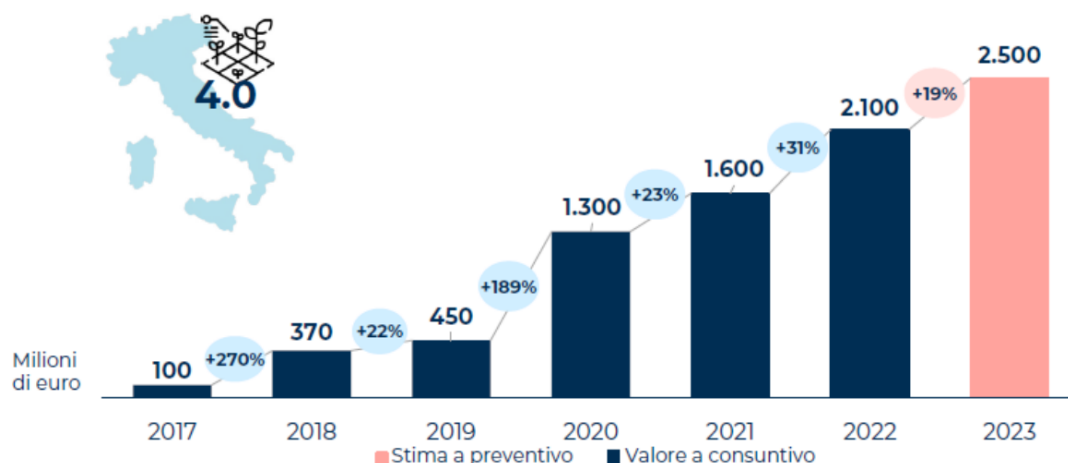


Figura 1-6: L'evoluzione del valore del mercato italiano di Agricoltura 4.0 (Politecnico di Milano Dipartimento di Ingegneria Gestionale & Osservatorio Smart Agrifood, 2025)

Tale flessione non è però omogenea, ma evidenzia un cambio di paradigma rispetto al passato. Mentre gli anni precedenti erano stati trainati da investimenti massivi in hardware (macchinari connessi e attrezzature), il 2024 ha visto un crollo di questa voce (rispettivamente 29% e 26,5% del totale), fisiologico dopo la saturazione generata dalle agevolazioni 4.0. Al contrario, si osserva una tenuta e una crescita delle soluzioni software e immateriali (FMIS, DSS e sistemi di monitoraggio), che pur non compensando il calo volumetrico dell'hardware, segnalano un passaggio da un'agricoltura basata sull'acquisto del mezzo a una basata sulla valorizzazione del dato.

La riduzione degli incentivi statali, che l'81% dei provider tecnologici aveva identificato come il principale motore della crescita storica, unita alla contrazione dei redditi agricoli, ha dunque svelato un mercato che, pur rallentando nei numeri assoluti, sta evolvendo verso una maggiore consapevolezza gestionale. Nonostante la stasi degli investimenti, la superficie coltivata con tecnologie 4.0 rimane stabile (9,5%), confermando che la digitalizzazione è ormai strutturale, specialmente nelle realtà più organizzate come cooperative e Organizzazioni di Produttori (Politecnico di Milano Dipartimento di Ingegneria Gestionale & Osservatorio Smart Agrifood, 2025).

Al fine di contestualizzare adeguatamente la diffusione delle tecnologie di Agricoltura di Precisione nel panorama produttivo nazionale, risulta opportuno richiamare i principali dati emersi dalla prima edizione dell'Indagine Multiscopo dell'Agricoltura, condotta dall'Istituto Nazionale di Statistica nell'ambito del Censimento Permanente dell'Agricoltura (ISTAT, 2026). Tale indagine, pubblicata nel febbraio 2026 con riferimento all'anno 2024, fornisce un quadro statisticamente rappresentativo dei comportamenti e delle strategie operative delle aziende agricole italiane in materia di innovazione e sostenibilità ambientale, costituendo pertanto una fonte di primario riferimento per l'analisi del contesto in cui si inserisce il presente elaborato.

Al fine di contestualizzare adeguatamente la diffusione delle tecnologie di Agricoltura di Precisione nel panorama produttivo nazionale, risulta opportuno richiamare i principali dati emersi dalla prima edizione dell'Indagine Multiscopo dell'Agricoltura, condotta dall'Istituto Nazionale di Statistica nell'ambito del Censimento Permanente dell'Agricoltura (ISTAT, 2026). Tale indagine, pubblicata nel febbraio 2026 con riferimento all'anno 2024, fornisce per la prima volta un quadro statisticamente rappresentativo dei comportamenti e delle strategie operative delle aziende agricole italiane in materia di innovazione e sostenibilità ambientale, costituendo pertanto una fonte di primario riferimento per l'analisi del contesto in cui si inserisce il presente elaborato.

I risultati dell'indagine delineano un sistema agricolo nazionale caratterizzato da una propensione all'innovazione ancora contenuta e, soprattutto, profondamente disomogenea sul piano territoriale. Nel 2024, soltanto il 12% delle aziende agricole italiane ha dichiarato di aver realizzato, nel quinquennio precedente, interventi volti a innovare la tecnica di produzione e/o la gestione aziendale (ISTAT, 2026). Tale dato medio cela tuttavia una marcata eterogeneità geografica: le aziende del Nord-est e del Nord-ovest registrano tassi di innovazione rispettivamente del 24,5% e del 19,4%, mentre le ripartizioni del Centro, del Sud e delle Isole si

attestano su valori sensibilmente inferiori, pari rispettivamente al 10%, al 6,2% e all'8,1%. Emerge inoltre una correlazione positiva tra la propensione all'innovazione e la dimensione aziendale misurata in termini di superficie agricola utilizzata: le aziende di grande dimensione (oltre 50 ettari) presentano un tasso di adozione pari al 34,6%, a fronte del 7,9% rilevato nelle realtà più piccole (fino a 10 ettari). Tali evidenze confermano e quantificano quanto già segnalato dalla letteratura di settore circa la centralità della scala dimensionale e della localizzazione geografica come determinanti strutturali della capacità di investimento in tecnologia (Report-Agricoltura-di-precisione_Osservatorio-ICSC, 2024).

Sul piano delle motivazioni che orientano le scelte di investimento, le aziende innovatrici esprimono una valutazione positiva dei benefici conseguiti, con particolare riferimento all'ottimizzazione della produzione (82,2%), alla gestione dei mezzi di produzione (72,5%) e alla riduzione dei costi operativi (63,6%) (ISTAT, 2026). Questi risultati sono di notevole rilevanza per il presente elaborato, in quanto indicano come le tecnologie di precisione vengano percepite dagli operatori in primo luogo come strumenti di efficienza gestionale ed economica, prima ancora che come leve di sostenibilità ambientale. È significativo rilevare come le aziende del Mezzogiorno, pur presentando tassi di innovazione inferiori alla media nazionale, orientino i propri investimenti con una maggiore diversificazione tematica, con particolare attenzione alla gestione efficiente delle risorse idriche (53%) e al contrasto delle fitopatie (60,1%), in ragione delle specificità climatiche e pedologiche dei territori di riferimento.

Un aspetto di rilievo concerne i canali decisionali e le modalità di finanziamento degli investimenti innovativi. L'indagine evidenzia come l'86,6% delle decisioni favorevoli all'innovazione sia maturato autonomamente all'interno delle aziende, a conferma di una cultura imprenditoriale che privilegia l'autosufficienza decisionale (ISTAT, 2026). Sul versante del finanziamento, il 76,5% delle aziende innovatrici ha fatto ricorso a risorse proprie, mentre il 40,3% ha dichiarato di aver utilizzato i fondi della Politica Agricola Comune (PAC) come fonte di co-finanziamento; tale strumento risulta particolarmente rilevante per le aziende del Mezzogiorno, dove la sua incidenza raggiunge il 59,7% nel Sud e il 54,5% nelle Isole.

Un ulteriore elemento critico emerso dall'indagine riguarda le barriere strutturali all'adozione delle tecnologie riconducibili all'Agricoltura 4.0. Tra le aziende che nel 2024 non hanno investito in innovazione, il 38,1% attribuisce tale scelta a vincoli di natura economico-finanziaria, quota che sale al 45,5% tra le aziende meridionali (ISTAT, 2026). A ciò si affianca la carenza di

personale dotato di competenze tecniche adeguate, segnalata dal 28,8% degli operatori, con una prevalenza nelle regioni del Sud (35,3%) rispetto al Nord, dove tale criticità interessa circa il 19% delle aziende. Particolarmente significativo, in ottica prospettica, è il dato relativo all'intenzione di adottare tecniche di Agricoltura 4.0 entro il 2027, che coinvolge soltanto il 5,9% delle aziende agricole italiane, segnalando come il percorso di transizione digitale del settore primario sia ancora nelle sue fasi iniziali e richieda interventi strutturali di lungo periodo (ISTAT, 2026).

Il quadro complessivo che emerge dall'indagine ISTAT (2026) conferma, con evidenza statistica, la presenza di un duplice divario: uno territoriale, tra le realtà produttive del Nord e quelle del Mezzogiorno, e uno dimensionale, tra imprese di grande scala e piccole aziende a conduzione familiare. Entrambe le fratture rappresentano ostacoli concreti alla diffusione capillare dell'Agricoltura di Precisione e, in particolare, delle tecnologie UAV per la concimazione a rateo variabile, che richiedono investimenti iniziali significativi e competenze tecniche specializzate per una piena valorizzazione del loro potenziale agronomico ed economico (ISTAT, 2026).

1.2.1 Le tipologie di contributi

La transizione verso modelli di Agricoltura di Precisione richiede investimenti significativi in tecnologie digitali, sensoristica avanzata e sistemi UAV, il cui costo di acquisizione rappresenta spesso il principale ostacolo per le imprese agricole italiane, in particolare quelle di piccole e medie dimensioni (ISTAT, 2026). A partire dal secondo decennio del Duemila, il legislatore nazionale e le autorità di gestione regionale hanno progressivamente strutturato un sistema articolato di incentivi economici, finalizzato ad abbattere tale barriera e a favorire la diffusione dell'Agricoltura 4.0 lungo l'intera filiera agroalimentare.

In tale percorso evolutivo, un ruolo fondativo è stato svolto dalla Politica Agricola Comune 2014-2020, che ha rappresentato il primo quadro programmatico europeo a riconoscere esplicitamente l'Agricoltura di Precisione come strumento di attuazione degli obiettivi di competitività e sostenibilità del settore primario (linee guida per lo sviluppo dell'agricoltura di precisione in Italia, 2017). Nell'ambito dei Programmi di Sviluppo Rurale regionali, le misure di maggiore rilevanza per la diffusione delle tecnologie di AP sono risultate la Misura 4 'Investimenti in immobilizzazioni materiali', che ha consentito di finanziare l'acquisto di macchinari, strumenti e reti funzionali al miglioramento della sostenibilità economica dei processi produttivi, e la Misura 16 'Cooperazione', nelle sotto misure 16.1 e 16.2, finalizzata al trasferimento dell'innovazione dal mondo della ricerca alle realtà aziendali attraverso la costituzione di Gruppi Operativi

(programma di sviluppo rurale della regione Marche 2014-2020, 2015). Parallelamente, la Misura 1 ‘Trasferimento di conoscenze e azioni di informazione’ e la Misura 2 ‘Servizi di consulenza’ hanno contribuito a rafforzare il capitale umano necessario per l’adozione consapevole delle tecnologie digitali in campo agricolo. È significativo rilevare come, già in tale fase programmatica, quattordici regioni italiane — tra cui le Marche — abbiano inserito riferimenti espliciti all’Agricoltura di Precisione nei rispettivi PSR, segnalando una crescente sensibilità istituzionale verso la questione, pur in assenza di un quadro normativo nazionale organicamente dedicato.

Attualmente la programmazione degli incentivi si articola su due livelli distinti ma complementari, quello nazionale e quello regionale, ciascuno dei quali concorre, a sostenere la transizione digitale del settore primario.

A livello nazionale, il quadro normativo di riferimento trova un suo pilastro nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), strumento finanziario straordinario finanziato da Next Generation EU, il programma di rilancio economico attivato dall’Unione Europea e dedicato agli stati membri (governo italiano, 2021). Il PNRR rappresenta il documento di programmazione strategica nazionale che definisce gli investimenti e le riforme strutturali da attuare nel periodo 2021-2026, e nel settore primario si declina principalmente attraverso la Missione 2 (‘Rivoluzione verde e transizione ecologica’), componente M2C1 (‘Economia circolare e agricoltura sostenibile’). Nell’ambito di tale componente, è stato previsto uno stanziamento di 500 milioni di euro finalizzato all’intervento 2.3 “Innovazione e meccanizzazione nel settore agricolo e alimentare”. L’obiettivo è duplice: da un lato, ottimizzare la distribuzione dei prodotti fitosanitari, riducendone il consumo fino al 40%; dall’altro, abbattere drasticamente le emissioni (-95%) attraverso il rinnovo del parco macchine, sostituendo i vetusti mezzi Euro 1 con moderni trattori Euro 5."

A livello regionale, un ruolo altrettanto strategico è svolto dal Complemento di Sviluppo Rurale della Regione Marche (CSR) 2023-2027, strumento programmatico attuativo della Politica Agricola Comune (PAC) 2023-2027 e del relativo Piano Strategico Nazionale (PSP). Il CSR Marche rappresenta la visione strategica della Regione per lo sviluppo rurale in coerenza con il contenuto del PSP, e per il periodo 2023-2027 dispone di un budget complessivo di 390,8 milioni di euro, attivando oltre trenta interventi di sviluppo rurale (complemento regionale per lo sviluppo rurale del piano strategico nazionale della pac, 2023).

La strategia regionale ruota attorno a cinque assi portanti — qualità e orientamento al mercato, sostenibilità, innovazione e conoscenza, sostegno ai giovani imprenditori e semplificazione amministrativa — che conferiscono al programma una visione sistemica e integrata dello sviluppo del settore primario marchigiano.

Tra gli strumenti di maggiore rilevanza per la diffusione delle tecnologie di Agricoltura 4.0 sul territorio regionale si distingue l'Intervento SRD01 ('Investimenti produttivi agricoli per la competitività delle aziende agricole'). Gli obiettivi specifici dell'intervento SRD01 comprendono il miglioramento dell'orientamento al mercato e l'incremento della competitività aziendale, anche attraverso una maggiore attenzione alla ricerca, alla tecnologia e alla digitalizzazione, nonché un obiettivo trasversale di ammodernamento del settore, promuovendo e condividendo conoscenze, innovazioni e processi di digitalizzazione nell'agricoltura e nelle aree rurali. Rientrano tra le spese ammissibili l'acquisto di macchinari, attrezzature hardware e software, nonché gli investimenti in innovazione tecnologica e gestionale dei processi produttivi, inclusi i sistemi di telerilevamento e i software per la gestione delle mappe di prescrizione a rateo variabile (VRA). Il sostegno è concesso sotto forma di contributo in conto capitale, con un'intensità di aiuto pari al 40% della spesa ammessa per le aziende situate in aree non svantaggiate e al 50% per le aziende in zone montane svantaggiate; le percentuali salgono rispettivamente al 50% e al 60% per i giovani agricoltori. La spesa massima ammissibile a contributo per domanda è fissata a 3.000.000 di euro. L'intervento SRD01 può essere attivato contestualmente all'Intervento SRD02 ('Investimenti produttivi agricoli per ambiente, clima e benessere animale'), attraverso un pacchetto integrato che consente di cofinanziare con un'unica domanda sia gli investimenti orientati alla competitività che quelli finalizzati al miglioramento delle performance climatico-ambientali aziendali. Tale meccanismo di pacchettizzazione riconosce la natura duale degli investimenti in AP: tecnologie come i SAPR per la distribuzione a rateo variabile, i sistemi IoT per il monitoraggio idrico o le piattaforme DSS generano simultaneamente un vantaggio economico per l'imprenditore, attraverso la razionalizzazione degli input, e un beneficio ambientale concreto, attraverso la riduzione delle emissioni e delle perdite per lisciviazione.

Al supporto alla formazione, alla consulenza e alla diffusione dell'informazione è destinato il 3,5% della dotazione finanziaria del CSR Marche 2023-2027, a riconoscimento del fatto che la sola disponibilità di incentivi all'acquisto non è sufficiente senza un adeguato accompagnamento tecnico nella fase di implementazione. Tale componente formativa risulta particolarmente rilevante per le realtà aziendali meno strutturate, nelle quali l'adozione di tecnologie complesse come i software FMIS o i protocolli di analisi multispettrale richiede investimenti non solo materiali, ma anche in capitale umano qualificato.

Nel complesso, la sinergia tra gli strumenti nazionali del PNRR e il quadro regionale del CSR Marche 2023-2027 delinea un sistema di incentivi multi-livello che, almeno sotto il profilo della dotazione finanziaria, si configura come favorevole alla diffusione dell'Agricoltura di Precisione nelle Marche. Tuttavia, come evidenziato dall'analisi del mercato 4.0, la riduzione progressiva degli incentivi e la contrazione dei redditi agricoli osservata nel 2024 hanno rivelato la necessità di politiche non episodiche ma strutturali, capaci di sostenere la domanda di innovazione anche al di là dei cicli di programmazione comunitaria.

nonostante la disponibilità di strumenti finanziari, l'effettiva diffusione di tali tecnologie nel contesto produttivo italiano deve confrontarsi con persistenti criticità strutturali. La letteratura di settore evidenzia come la frammentazione del tessuto agricolo, caratterizzato prevalentemente da piccole e medie imprese (PMI), rappresenti un ostacolo critico alla capacità d'investimento e alla formazione tecnica del personale. A ciò si aggiunge l'elevata obsolescenza delle macchine agricole attualmente in uso e il persistente digital divide, manifestato dalla limitata diffusione della banda larga nelle zone rurali, che limita la connettività necessaria per la gestione dei dati in tempo reale. (Report-Agricoltura-di-precisione_Osservatorio-ICSC, 2024).

1.3 La variabilità

Tra le caratteristiche che contraddistinguono maggiormente il comparto agricolo, assume particolare rilievo la condizione di intrinseca variabilità che caratterizza lo svolgimento dell'attività agricola. A differenza dei processi manifatturieri, nei quali le condizioni operative possono essere standardizzate e controllate con elevata precisione, la produzione agricola è strutturalmente esposta a fenomeni naturali impossibili da controllare da parte dell'operatore. Tale condizione genera una variabilità articolata lungo due dimensioni fondamentali, quella spaziale e quella temporale, che si manifesta, in ultima analisi, come incostanza delle rese colturali all'interno del medesimo sistema produttivo (Cillis et al., 2015).

Sul piano spaziale, la variabilità si esprime attraverso la disomogeneità produttiva riscontrabile all'interno di uno stesso appezzamento: ogni punto del campo presenta caratteristiche proprie, differenziandosi dai punti adiacenti per proprietà pedologiche, microtopografiche, idriche e biologiche.

Sul piano temporale, invece, la medesima porzione di suolo manifesta performance produttive sensibilmente diverse da un anno all'altro, in risposta alla variazione delle condizioni

meteorologiche stagionali, alla rotazione colturale e all'evoluzione delle dinamiche biotiche ed abiotiche del suolo. La comprensione, la quantificazione e la gestione di questa duplice variabilità costituiscono pertanto le fondamenta imprescindibili per l'applicazione di corrette tecniche di Agricoltura di Precisione (Cillis et al., 2015).

Al fine di strutturare analiticamente questo complesso di fenomeni, la letteratura scientifica di riferimento (Zhang et al., 2002) ha proposto una tassonomia che individua sei macro-categorie di generatori di variabilità in ambito agricolo.

1. Yield variability, identifica la variabilità di produttività direttamente rilevabile come fluttuazione delle rese; essa rappresenta la risultante integrata di tutti gli altri fattori e costituisce il parametro di output fondamentale per la valutazione dell'efficienza gestionale.
2. Field variability, raggruppa i fattori di natura topografica: l'altitudine, la pendenza, l'esposizione solare, l'ombreggiamento e l'effetto-margine. Queste caratteristiche condizionano la distribuzione dell'acqua e dell'energia radiante sulla superficie agricola, influenzando indirettamente la disponibilità di nutrienti e la capacità portante del suolo.
3. Soil variability è ascrivibile, invece, la componente di variabilità legata alle caratteristiche chimico-fisiche del suolo: la tessitura, la struttura, il contenuto in sostanza organica, il pH, la capacità di scambio cationico e la disponibilità dei macro e microelementi nutritivi. Questa categoria riveste un'importanza centrale per il tema della concimazione a rateo variabile, oggetto specifico del presente elaborato, in quanto le differenze pedologiche spazialmente distribuite all'interno di un appezzamento rappresentano la base informativa primaria per la costruzione delle Mappe di Prescrizione.
4. Crop variability riflette le differenze genetiche e fisiologiche tra le diverse colture in rotazione, nonché la variabilità intra-parcellare ascrivibile all'eterogeneità della densità di investimento, alla difformità nella germinazione e alle variazioni fenotipiche indotte da stress biotici o abiotici localizzati.
5. Variability in anomalous factors che sono le perturbazioni di natura anomala sono invece ricondotte alla quinta categoria, denominata, che comprende la presenza di agenti fitopatogeni, infestanti e parassiti animali, nonché gli effetti di eventi meteorologici avversi quali grandinate, gelate tardive e periodi di siccità prolungata. La loro distribuzione spaziale all'interno del campo è per definizione irregolare e non stazionaria, il che la rende particolarmente difficile da modellizzare con approcci statistici convenzionali.

6. La management variability racchiude le fonti di variabilità riconducibili alle scelte operative dell'agricoltore, tra cui le modalità di distribuzione degli input, la qualità delle lavorazioni meccaniche, i tempi di intervento e le tecniche irrigue adottate; si tratta dell'unica categoria interamente sotto il controllo decisionale dell'operatore e, conseguentemente, quella su cui l'Agricoltura di Precisione può esercitare il maggior potere correttivo immediato (Zhang et al., 2002) .

lo studio e la rilevazione della variabilità spaziale e temporale, hanno fatto sì che in letteratura, l'agricoltura di precisione venga anche chiamata come Site-Specific Crop Management (SSCM), ovvero gestione delle colture sito-specifica (Muhie, 2022). Tale denominazione alternativa non è meramente terminologica, ma riflette una precisa scelta dove il campo agricolo non è un'unità omogenea da gestire in modo uniforme, bensì un mosaico di micro-ambienti, ciascuno caratterizzato da specifiche condizioni pedologiche, idriche e biologiche, che richiedono risposte agronomiche differenziate e localizzate.

È proprio in questo aspetto che risiede la differenza strutturale più significativa rispetto all'agricoltura convenzionale: mentre quest'ultima tratta l'appezzamento come un'unità di gestione omogenea, applicando dosi uniformi di fertilizzanti, fitofarmaci e acqua sull'intera superficie; l'Agricoltura di Precisione suddivide il campo in unità gestionali elementari di dimensioni ridotte (management zones), per ognuna delle quali vengono definiti trattamenti specifici calibrati sulle effettive esigenze locali (Kitchen et al., 2005).

Questa concezione trova una delle sue formulazioni più autorevoli nel contributo di Pierce e Nowak (Pierce & Nowak, 1999), i quali identificavano come obiettivo cardine dell'SSCM quello di adattare gli input e le pratiche agricole alle condizioni localizzate all'interno di un campo, intervenendo con la risorsa appropriata, nella porzione di suolo appropriata e nel momento fonologicamente più opportuno. Tale principio, sintetizzabile nella formula operativa del "giusto input, nel posto giusto, al momento giusto", anticipa con notevole lucidità il modello tecnologico che si sarebbe consolidato nei decenni successivi attraverso l'integrazione di sistemi GNSS, sensoristica avanzata e tecnologie di distribuzione a rateo variabile.

Il monitoraggio sistematico e la gestione integrata di queste categorie di variabilità divengono pertanto centrali per ottimizzare la conduzione delle colture, massimizzando il potenziale produttivo dell'azienda mediante un impiego razionale e differenziato delle risorse. L'Agricoltura di Precisione adotta a tal fine un framework metodologico che integra tecniche di telerilevamento, georeferenziazione, modellizzazione spaziale e applicazione degli input a rateo variabile (VRA),

consentendo di rilevare la variabilità presente nel sistema e di adattare ad essa le decisioni colturali con un livello di risoluzione spaziale e temporale impossibile da conseguire con i tradizionali approcci di gestione uniforme dell'appezzamento (Zhang et al., 2002).

Al fine di garantire l'efficacia operativa del SSCM, le unità gestionali elementari (management zones) individuate devono essere univocamente georeferenziate all'interno di un sistema di coordinate globale. Tale inquadramento spaziale, reso possibile dall'integrazione di sistemi Global Navigation Satellite System (GNSS), costituisce il presupposto tecnico imprescindibile per la corretta interpretazione analitica delle misure e per la successiva attuazione di strategie d'intervento differenziate in base alla variabilità rilevata.

1.4 La georeferenziazione della variabilità

La tecnologia GNSS affonda le proprie radici nel 1973, anno in cui il Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti avviò il progetto che avrebbe portato allo sviluppo del primo sistema di navigazione satellitare globale, denominato NAVSTAR (Navigation System with Timing and Ranging) e universalmente noto con l'acronimo GPS (Global Positioning System) (Calcante et al., 2016). Da quella prima iniziativa di origine prettamente militare, il panorama dei sistemi di posizionamento satellitare si è progressivamente articolato, dando origine a una pluralità di costellazioni gestite da differenti soggetti istituzionali, ciascuna con specifiche caratteristiche tecniche in termini di numero di satelliti, parametri orbitali, frequenze di trasmissione e livello di operatività raggiunto.

Tra i sistemi attualmente disponibili, quattro rivestono particolare rilevanza per le applicazioni in ambito di Agricoltura di Precisione:

1. Il sistema NAVSTAR-GPS, di proprietà del Governo degli Stati Uniti e gestito dalla United States Air Force, rappresenta il sistema di riferimento storico e tecnologico, avendo raggiunto la piena operatività nel 1993 con 24 satelliti (Caterina G. Manning, 2023). Il segmento spaziale conta oggi oltre 30 satelliti operativi, monitorati da una rete di stazioni di controllo terrestri. Il posizionamento tridimensionale del ricevitore si ottiene attraverso il calcolo del tempo di propagazione dei segnali provenienti da almeno quattro satelliti simultaneamente visibili (Caterina G. Manning, 2023).
2. Il sistema GLONASS, sviluppato dall'Unione Sovietica a partire dal 1982, ha raggiunto la piena copertura globale nel 2011 dopo un processo di modernizzazione avviato nei primi anni Duemila. La costellazione, composta da 24 satelliti distribuiti su tre piani orbitali, garantisce un'accuratezza di ordine metrico. Il suo principale vantaggio in

Agricoltura di Precisione risiede nella piena interoperabilità con il segnale GPS, che consente ai ricevitori multi-costellazione di migliorare la geometria di posizionamento e l'affidabilità complessiva (Jerez & Alves, 2019).

3. Il sistema Galileo, di proprietà dell'Unione Europea e gestito dal GSA, è operativo dal 15 dicembre 2016 ed è l'unico sistema nato con finalità esclusivamente civile. Con il completamento della costellazione (30 satelliti, di cui 27 operativi) avvenuto il 28 aprile 2024, il sistema garantisce un'accuratezza spaziale inferiore ai 10 centimetri, costituendo il presupposto tecnologico per la creazione di mappe di prescrizione (ASI, 2026).
4. Il sistema BDS, sviluppato dalla Repubblica Popolare Cinese, ha completato la propria implementazione in tre fasi progressive (BDS-1, BDS-2, BDS-3), raggiungendo la copertura globale nel 2020. La costellazione, composta da 50 satelliti, garantisce un'accuratezza spaziale intrinseca superiore ai 2 metri, risultando pienamente competitiva con gli standard internazionali delle principali costellazioni GNSS (BeiDou Navigation Satellite System, 2026).

La disponibilità di ricevitori multi-costellazione, in grado di elaborare simultaneamente i segnali provenienti da più sistemi GNSS, costituisce oggi un vantaggio operativo determinante nelle applicazioni di Agricoltura di Precisione: un maggior numero di satelliti visibili si traduce direttamente in una geometria di posizionamento più favorevole, in una riduzione dei tempi di acquisizione del segnale e in una maggiore robustezza del rilevamento in condizioni ambientali difficili, quali la presenza di ostacoli vegetali o strutture artificiali ai margini dei campi.

Tuttavia, Il posizionamento satellitare standard, garantisce accuratezze nell'ordine del metro, insufficienti per le applicazioni di Agricoltura di Precisione che richiedono la georeferenziazione delle management zones con errori inferiori ai 10–20 centimetri. Al fine di raggiungere tale livello di accuratezza, si ricorre alla tecnica del posizionamento differenziale in tempo reale, nota con l'acronimo RTK (Real Time Kinematic), la quale si fonda sulla misura di fase della portante del segnale satellitare anziché sul solo codice PRN. La lunghezza d'onda della portante L1, pari a circa 19 centimetri, conferisce a questa misura una risoluzione intrinsecamente superiore, consentendo di raggiungere accuratezze plano-altimetriche dell'ordine di pochi centimetri, a condizione che venga risolta la cosiddetta ambiguità di fase intera (Casa Raffaele, 2016).

Il principio operativo del metodo RTK prevede l'impiego di almeno due ricevitori: una stazione base, posizionata su un punto a coordinate note, e un ricevitore rover, montato sull'operatore o sulla macchina operatrice. La stazione base elabora la differenza tra la distanza geometrica calcolata verso ciascun satellite e la pseudodistanza misurata, ottenendo una correzione

differenziale (PRC, Pseudorange Correction) che viene trasmessa in tempo reale al rover. Il rover applica tale correzione alle proprie misure, eliminando i principali errori sistematici comuni ai due ricevitori, tra cui gli errori di orologio del satellite, quelli di effemeride e in larga parte i ritardi ionosferici e troposferici, determinando la propria posizione con accuratezza centimetrica.

Un limite operativo del classico sistema RTK biricevitore è rappresentato dalla distanza massima ammissibile tra base e rover, convenzionalmente stimata in 10–15 km, oltre la quale la correlazione spaziale degli errori atmosferici si riduce significativamente, compromettendo l'accuratezza della soluzione. Tale vincolo risulta particolarmente restrittivo in contesti operativi ampi, come nel caso di aziende agricole dislocate su vasti territori.

Il superamento di questa limitazione è reso possibile dall'adozione di reti di stazioni permanenti GNSS, che erogano servizi di posizionamento differenziale di rete, denominati NRTK (Network RTK). In tale architettura, un centro di calcolo riceve in tempo reale le osservazioni di un insieme di stazioni di riferimento distribuite sul territorio, modella spazialmente gli errori ionosferici e troposferici mediante combinazioni lineari delle osservazioni (differenze semplici, doppie e triple), e genera correzioni di area interpolate nella posizione del rover. Questo approccio consente di estendere l'operatività del posizionamento RTK ben oltre il limite dei 30 km dalla stazione permanente più vicina, mantenendo accuratezze centimetriche.

Le reti RTK possono essere gestite sia da enti pubblici che da enti privati, consentendo una copertura abbastanza omogenea su tutto il territorio nazionale. Per usufruire di questi servizi, agli utenti viene richiesto il pagamento di un canone.

Ai fini delle applicazioni in Agricoltura di Precisione, la disponibilità di servizi NRTK presenta vantaggi operativi determinanti: consente l'impiego di un singolo ricevitore rover montato sul drone o sulla macchina operatrice, eliminando la necessità di installare e gestire una stazione base locale, con conseguente riduzione dei costi operativi e semplificazione logistica delle campagne di rilievo e di distribuzione a rateo variabile.

Nell'ambito delle applicazioni per l'Agricoltura di Precisione, la necessità di georeferenziare con accuratezza centimetrica sia le missioni di telerilevamento multispettrale che quelle di distribuzione a rateo variabile ha portato alla consolidazione di due distinte metodologie di posizionamento di precisione: il già descritto Real Time Kinematic (RTK) e il Post-Processed Kinematic (PPK). Pur condividendo il medesimo fondamento matematico i due approcci si differenziano sostanzialmente per la modalità e il momento in cui la correzione differenziale viene applicata alle osservazioni del ricevitore rover.

Nel sistema RTK, come illustrato nel paragrafo precedente, la correzione viene calcolata dalla stazione base e trasmessa al rover in tempo reale mediante collegamento radio o rete cellulare, consentendo la determinazione della posizione con accuratezza centimetrica istante per istante durante il volo.

Il PPK adotta invece una strategia differita: durante la missione, il ricevitore rover registra autonomamente le osservazioni grezze di fase e codice su tutte le frequenze disponibili, mentre una stazione base, fisica o virtuale, nella forma di un file RINEX scaricato da una rete di stazioni permanenti, acquisisce simultaneamente le proprie osservazioni. La correzione differenziale non viene applicata in volo, bensì in fase di post-elaborazione, calcolando le differenze doppie tra le osservazioni dei due ricevitori per i medesimi satelliti e le medesime epoche. Il principale vantaggio di questo approccio risiede nell'eliminazione della dipendenza da una connessione dati stabile durante il volo: il drone opera in modo del tutto autonomo, e la qualità del posizionamento non è condizionata da eventuali interruzioni del segnale di correzione in tempo reale, un'eventualità tutt'altro che rara in contesti rurali caratterizzati da scarsa copertura della rete cellulare.

Dal punto di vista dell'accuratezza ottenibile, il PPK presenta in molte condizioni operative un vantaggio rispetto all'RTK: la disponibilità dell'intera sequenza temporale delle osservazioni consente al software di post-elaborazione di risolvere le ambiguità di fase con algoritmi più robusti, sfruttando le osservazioni sia precedenti che successive a ogni istante di calcolo (approccio forward-backward). Ciò si traduce in una maggiore percentuale di fissaggio corretto delle ambiguità e in una riduzione degli errori residui, in particolare nelle fasi di inizializzazione del volo e in presenza di brevi interruzioni del segnale (cycle slip), che nel PPK possono essere corrette in post-elaborazione mentre nell'RTK comportano una reinizializzazione con conseguente periodo di ridotta accuratezza.

Nella pratica operativa dell'Agricoltura di Precisione, i due metodi trovano quindi una naturale collocazione in fasi distinte del workflow di concimazione a rateo variabile. Il PPK è la tecnologia preferita per le missioni UAV di acquisizione multispettrale finalizzate alla generazione delle Mappe di Prescrizione: la georeferenziazione centimetrica dei fotogrammi in post-elaborazione garantisce la massima accuratezza nell'allineamento spaziale delle immagini e nella successiva produzione degli indici di vegetazione, quali NDVI e NDRE, senza vincoli di connettività in campo. L'RTK è invece la tecnologia fondamentale nella fase di distribuzione: in quanto aggiorna la posizione del drone in tempo reale durante il volo di erogazione, assicurando la corrispondenza spaziale tra le zone di prescrizione e i punti di effettiva applicazione del fertilizzante, con deviazioni laterali tipicamente inferiori ai 10 centimetri.

1.5 La misurazione della variabilità

Come esposto in precedenza, la georeferenziazione della variabilità rilevata costituisce il presupposto tecnico imprescindibile per la sua gestione operativa. L'attuazione di strategie sito-specifiche richiede tuttavia la quantificazione analitica di svariate grandezze rilevabili grazie all'impiego di sensori atti alla trasduzione delle variabili fisiche in segnali elettrici, successivamente digitalizzati, elaborati da sistemi computazionali e associati a coordinate spaziali univoche. Sotto il profilo metodologico, è opportuno distinguere tra il rilievo prossimale (proximal sensing), qualora la misurazione richieda il contatto diretto o l'estrema vicinanza tra il sensore e il target, e il telerilevamento (remote sensing), laddove l'acquisizione delle informazioni avvenga in remoto, ovvero a una distanza significativa dall'oggetto osservato.

Visto lo scopo della tesi, si procederà, nei prossimi capitoli, a descrivere in modo più dettagliato e completo il telerilevamento.

1.5.1 *Il telerilevamento*

Il telerilevamento, si definisce come il complesso di metodologie finalizzate all'acquisizione di informazioni biofisiche relative a oggetti o superfici distanti, operando in assenza di contatto fisico diretto con l'oggetto da rilevare. Tale tecnologia si fonda sulla rilevazione e sulla successiva analisi della radiazione elettromagnetica emessa o riflessa che, dopo aver interagito con la superficie indagata, viene riemessa ed intercettata da sensori alloggiati su piattaforme aeree, come i Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR), satellitari e macchine agricole (Casa Raffaele, 2016).

In ambito agronomico, le applicazioni del telerilevamento sfruttano le specifiche proprietà ottiche della matrice pedologica e del materiale vegetale (canopy). I flussi energetici catturati dai sensori vengono convertiti in segnali digitali i quali, previo ricorso ad algoritmi di elaborazione fotogrammetrica e radiometrica, consentono l'estrazione di informazioni derivanti dalle diverse bande spettrali (Fiorentini et al., 2021). L'integrazione di questi dati all'interno di un framework di analisi spaziale permette la generazione di Mappe di Prescrizione (Finco et al., 2023). Tali output cartografici risultano fondamentali per la gestione sito-specifica, in quanto suddividono l'appezzamento in zone di gestione differenziate (management zones) sulla base delle reali esigenze vegetative rilevate, abilitando l'attuazione di strategie a rateo variabile (Casa Raffaele, 2016).

1.5.1.1 La radiazione elettromagnetica

Il telerilevamento si fonda sul principio fisico della radiazione elettromagnetica, fenomeno ondulatorio che si propaga nello spazio alla velocità della luce, pari a circa 3×10^8 m/s nel vuoto. La denominazione deriva dalla sua natura composita: tale radiazione è costituita simultaneamente da una componente elettrica e da una magnetica, tra loro perpendicolari e ortogonali rispetto alla direzione di propagazione (Zwinkels, 2015). Due parametri fondamentali ne caratterizzano il comportamento fisico: la lunghezza d'onda, definita come la distanza intercorrente tra due creste consecutive della perturbazione, e la frequenza, espressa in Hertz, che indica il numero di cicli completi registrabili nell'unità di tempo. Tra i due parametri sussiste una relazione di proporzionalità inversa: al crescere della lunghezza d'onda corrisponde una diminuzione della frequenza, e viceversa.

L'insieme ordinato di tutte le radiazioni elettromagnetiche, classificate in funzione della rispettiva lunghezza d'onda, costituisce lo spettro elettromagnetico (figura 1-7).

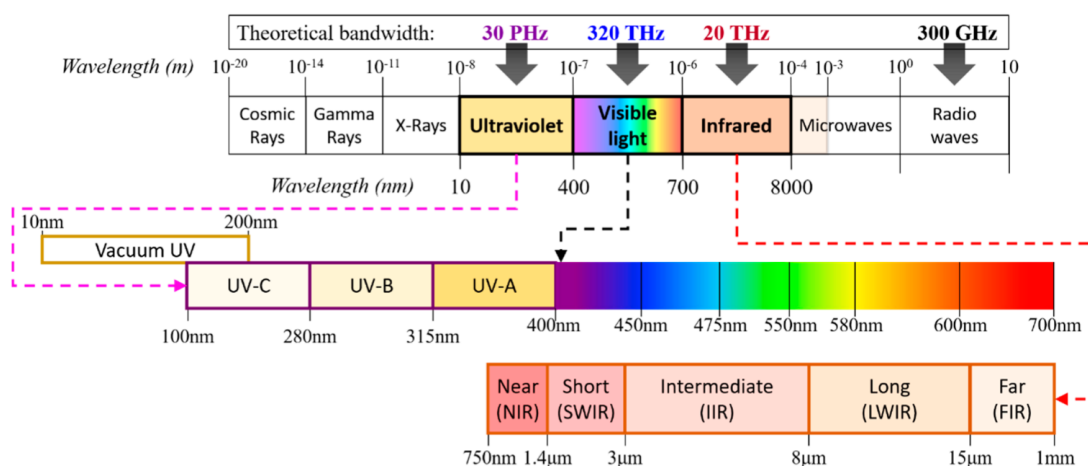


Figura 1-7: spettro elettromagnetico (Cahyadi et al., 2020).

Tale spettro si articola convenzionalmente in sette bande principali: raggi gamma, raggi X, radiazione ultravioletta, luce visibile, infrarosso, microonde e onde radio; ciascuna delle quali è caratterizzata da un intervallo specifico di lunghezze d'onda e da proprietà fisiche e applicative distinte (Casa Raffaele, 2016).

Nell'ambito delle applicazioni di telerilevamento per l'Agricoltura di Precisione, rivestono particolare rilevanza due regioni spettrali.

La prima è la luce visibile (VIS), coincidente con la cosiddetta Radiazione Fotosinteticamente Attiva (Photosynthetically Active Radiation, PAR), ovvero l'intervallo di lunghezze d'onda

percepibile dall'occhio umano e direttamente coinvolto nei processi fotosintetici delle colture. Tale regione si suddivide nelle seguenti bande cromatiche: violetto (390–450 nm), indaco (450–475 nm), blu (476–495 nm), verde (495–570 nm), giallo (570–590 nm), arancione (590–620 nm) e rosso (620–760 nm).

La seconda regione di interesse è quella dell'infrarosso (IR), ulteriormente articolata in tre sotto-bande in funzione della lunghezza d'onda: l'infrarosso vicino o NIR (Near InfraRed, 0,78–2,5 μm), l'infrarosso medio o MIR (Mid InfraRed, 2,5–50 μm) e l'infrarosso lontano o FIR (Far InfraRed, 50–1000 μm) (Berger et al., 2022).

La radiazione solare che raggiunge la superficie di una coltura o del suolo sottostante può dar luogo a tre fenomeni fisici distinti: riflessione, assorbimento e trasmissione; la cui proporzione relativa varia in funzione sia della lunghezza d'onda della radiazione incidente che delle proprietà ottiche e strutturali del materiale colpito (Li et al., 2010). Il principio di conservazione dell'energia impone che la somma delle frazioni di energia riflessa, assorbita e trasmessa sia in ogni caso pari all'unità.

- L'assorbimento è la capacità di un materiale di trattenere al proprio interno l'energia trasportata dalla radiazione elettromagnetica, convertendola in energia termica o chimica. Esso è quantificato dall'assorbanza, definita come il rapporto tra la radiazione assorbita e quella incidente.
- La trasmissione descrive invece il fenomeno per cui la radiazione attraversa il materiale e ne fuoriesce dalla superficie opposta, subendo una attenuazione variabile in funzione delle proprietà del mezzo.
- Il parametro di maggiore rilevanza per le applicazioni di telerilevamento in Agricoltura di Precisione è tuttavia la riflettanza, definita come il rapporto tra la radiazione riflessa dalla superficie e quella incidente su di essa. Oltre alle caratteristiche intrinseche della superficie, altri fattori vanno a comporre il valore di riflettanza finale, quali: l'irraggiamento, l'angolazione del sensore al momento della rilevazione ed infine le condizioni ambientali.

Tale grandezza adimensionale assume valori compresi tra 0 e 1: un valore prossimo allo zero indica che la superficie assorbe pressoché integralmente la radiazione incidente, mentre un valore prossimo all'unità indica una riflessione quasi totale.

La firma spettrale di una coltura, ovvero l'andamento caratteristico della riflettanza al variare della lunghezza d'onda, costituisce l'informazione diagnostica primaria che i sensori multispettrali montati sugli UAV acquisiscono e che, opportunamente elaborata,

consente la costruzione degli indici di vegetazione alla base delle Mappe di Prescrizione per la concimazione a rateo variabile (Li et al., 2010).

1.5.1.2 *La riflettanza della vegetazione e i suoi indici di vegetazione*

Le caratteristiche spettrali di una coltura non sono casuali, bensì il risultato diretto della sua composizione biochimica e della sua struttura biofisica, come: il contenuto in pigmenti fotosintetici, il tenore idrico, la biomassa, l'indice di area fogliare (LAI) e l'architettura cellulare del tessuto fogliare determinano in modo sistematico e prevedibile la quantità di radiazione elettromagnetica che viene assorbita, trasmessa o riflessa in ciascuna porzione dello spettro (Sahoo et al., 2015).

Le foglie rappresentano le superfici primarie di scambio energetico e gassoso all'interno della chioma vegetale. La loro risposta spettrale, comune nelle caratteristiche generali a tutte le specie vegetali, si articola in tre distinti domini di riflettanza che corrispondono ad altrettante regioni dello spettro elettromagnetico:

- Nel dominio del visibile (VIS, 400–700 nm), la riflettanza della vegetazione risulta complessivamente contenuta, in quanto questa regione è dominata dall'assorbimento da parte dei pigmenti fogliari. I principali responsabili di tale assorbimento sono la clorofilla a e b, i carotenoidi, le xantofille e i polifenoli, la cui azione si sovrappone lungo tutto l'intervallo visibile. Il pigmento che intercetta maggiormente la luce del visibile è la clorofilla a nelle piante superiori e, insieme alla clorofilla b, costituisce circa il 65% del contenuto pigmentario totale. L'elevato assorbimento nelle bande del blu e del rosso induce un caratteristico picco di riflettanza nella banda del verde, attorno ai 550 nm, responsabile della colorazione tipicamente verde della vegetazione sana (foto 1-8). I carotenoidi, attivi principalmente tra 440 e 480 nm, e i polifenoli, che assorbono con intensità decrescente dal blu al rosso, completano il quadro delle interazioni spettrali nel visibile (Sahoo et al., 2015).

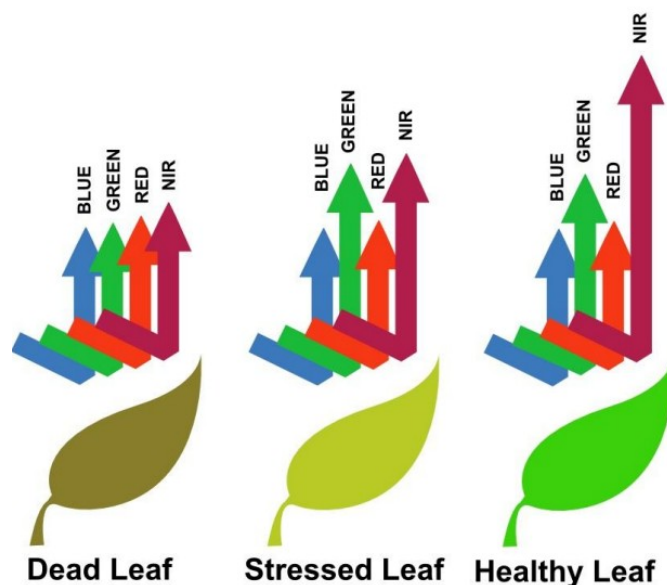


Figura 1-8: Modulazione della firma spettrale in funzione dello stress vegetativo

- Nel dominio dell'infrarosso vicino (NIR, 700–1300 nm), la componente spettrale cambia drasticamente attraversando la vegetazione: i pigmenti fogliari e la cellulosa diventano sostanzialmente trasparenti alla radiazione incidente, con conseguente drastica riduzione dell'assorbimento e corrispondente incremento dei valori di riflettanza e trasmittanza, che raggiungono in questa regione i loro massimi assoluti. Tale fenomeno è attribuibile principalmente ai processi di diffusione multipla che si generano alle interfacce aria-cellula-acqua all'interno del mesofillo fogliare. Il livello del cosiddetto plateau NIR risulta direttamente correlato alla densità e alle dimensioni cellulari, nonché all'abbondanza di spazi intercellulari: strutture cellulari più complesse e numerose generano una maggiore diffusione e, di conseguenza, valori di riflettanza più elevati. Questa proprietà rende il dominio NIR particolarmente sensibile ai parametri strutturali della chioma, quali il LAI e la biomassa, ed è alla base del principio di funzionamento degli indici di vegetazione più diffusi, tra cui l'NDVI (Sahoo et al., 2015).
- Nel dominio dell'infrarosso medio (MIR, 1300–2500 nm), denominato anche infrarosso a onde corte (SWIR, Short Wave InfraRed), le proprietà ottiche della foglia sono governate principalmente dall'acqua e dagli altri costituenti organici del tessuto fogliare. Le principali bande di assorbimento dell'acqua si collocano attorno a 1450, 1940 e 2700 nm.

La presenza di acqua in questa regione spettrale determina un effetto di intrappolamento della radiazione che sopprime i processi di diffusione, producendo un marcato

decremento della riflettanza rispetto al plateau NIR. Anche proteine strutturali, cellulosa, lignina e amido contribuiscono alla modulazione della riflettanza in questa regione. La sensibilità della banda SWIR al contenuto idrico fogliare la rende uno strumento diagnostico di notevole rilevanza per il monitoraggio dello stress idrico nelle colture, nonché per la stima della biomassa e del contenuto in cellulosa (Sahoo et al., 2015).

L'insieme di queste caratteristiche spettrali, considerate nella loro evoluzione lungo l'intero intervallo di lunghezze d'onda analizzato, costituisce la cosiddetta firma spettrale della vegetazione (vedi figura 1-9): una curva di riflettanza caratteristica e diagnostica che varia in funzione dello stato fisiologico, nutrizionale e sanitario della coltura. Variazioni nella concentrazione di clorofilla, alterazioni del contenuto idrico o modificazioni strutturali indotte da stress biotici e abiotici si traducono in modifiche sistematiche e quantificabili della firma spettrale, rendendo il telerilevamento iperspettrale uno strumento particolarmente efficace per il monitoraggio non distruttivo e spazialmente distribuito delle colture agricole (Sahoo et al., 2015).

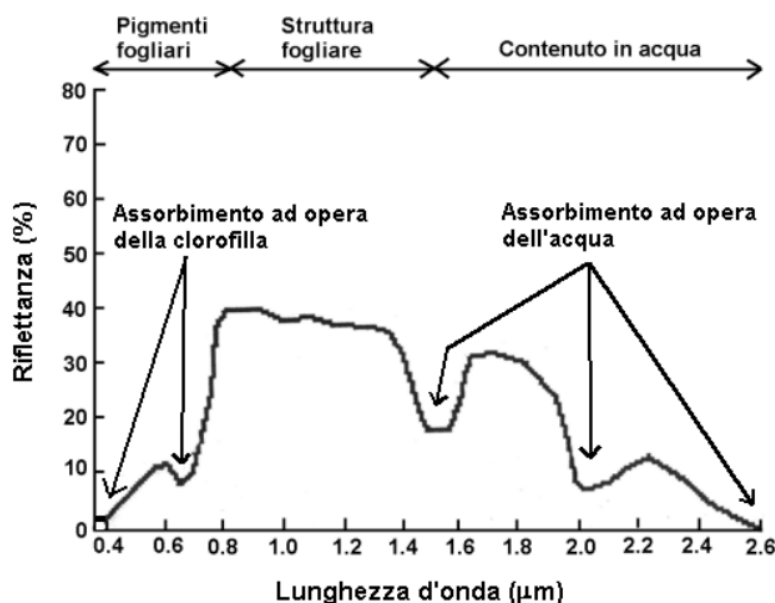


Figura 1-9: curva spettrale della vegetazione (Sahoo et al., 2015)

Le proprietà spettrali caratteristiche della vegetazione, descritte nel precedente, costituiscono la base informativa a partire dalla quale vengono elaborati gli indici di vegetazione (Vegetation Indices, VI). Nella loro accezione più generale, tali indici si definiscono come combinazioni matematiche, dei valori di riflettanza acquisiti in bande spettrali selezionate, progettate per massimizzare la sensibilità a specifiche variabili biofisiche della coltura

minimizzando contestualmente l'influenza di fattori perturbativi quali la geometria di illuminazione, la variabilità atmosferica e il contributo spettrale del suolo (Yan et al., 2025).

Il principio fisico alla base della maggior parte degli indici di vegetazione è il marcato contrasto spettrale che si osserva tra la banda del rosso (RED, circa 670 nm), caratterizzata da assorbimento elevato per effetto della clorofilla, e la banda dell'infrarosso vicino (NIR, circa 800 nm), nella quale la riflettanza della vegetazione raggiunge i propri valori massimi per effetto della diffusione multipla all'interno del mesofillo fogliare. L'amplificazione di tale contrasto permette di distinguere con elevata sensibilità le superfici vegetate da quelle non vegetate e di rilevare variazioni dello stato fisiologico legate a stress nutrizionali, idrici o biotici.

L'indice di vegetazione di maggiore impiego nella letteratura scientifica e nella pratica dell'Agricoltura di Precisione è il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Rouse et al., 1974). Il suo calcolo si fonda sulla differenza normalizzata tra la riflettanza nel NIR (ρ_{NIR}) e quella nel rosso (ρ_{RED}):

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED})$$

I valori dell'indice sono compresi nell'intervallo $[-1; +1]$: superfici non vegetate, quali suolo nudo o corpi idrici, restituiscono valori prossimi allo zero o negativi, mentre la vegetazione attiva in condizioni fisiologiche ottimali genera valori compresi tipicamente tra 0,6 e 0,9. Sebbene l'NDVI rappresenti lo strumento di riferimento per la stima del vigore vegetativo, la costruzione di mappe di biomassa e la delineazione delle zone di gestione, esso presenta due limitazioni strutturali rilevanti: la saturazione del segnale in condizioni di elevata densità fogliare ($LAI > 3$), che riduce significativamente la sua sensibilità nella gamma superiore dei valori, e l'influenza della riflettanza del suolo in condizioni di copertura vegetale ridotta o disomogenea. Queste limitazioni portano alla scelta/combinazione di altri indici di vegetazione più complessi e specifici in base alle reali esigenze, come ad esempio: IMSAVI2, ARVI, GARI, e NDRE (Orsini et al., 2023).

1.5.1.3 La riflettanza del suolo

Analogamente a quanto osservato per la vegetazione, la matrice pedologica presenta una firma spettrale caratteristica, la cui analisi costituisce una delle metodologie di telerilevamento più consolidate per la valutazione indiretta delle proprietà fisico-chimiche del suolo.

Gli strumenti disponibili, che nel prossimo capitolo verranno dettagliati, sono in grado di effettuare queste analisi, consentendo: una copertura globale, elevata risoluzione spaziale, capacità di monitoraggio a lungo termine, non invasività, rapporto costo-efficacia.

Tali analisi si pongono come obiettivi la valutazione della fertilità del suolo, dell'umidità, dei nutrienti, della tessitura e della composizione, dove la riflettanza spettrale si è dimostrata adatta (figura 1-10).

Tuttavia, per garantire l'accuratezza del dato, si rende necessaria una fase di validazione attraverso campionamenti diretti e analisi di laboratorio. L'integrazione delle metodologie chimiche tradizionali funge da protocollo complementare indispensabile, permettendo di calibrare i sensori e di ottenere risultati dotati di un superiore grado di precisione e affidabilità scientifica, in quanto vanno a migliorare l'influenza negativa di fattori perturbativi, come, la copertura vegetale residua, le condizioni atmosferiche al momento del rilievo e la calibrazione del sensore impiegato, i quali possono introdurre incertezze sistematiche nella stima delle proprietà del suolo. Inoltre le tecniche di telerilevamento forniscono informazioni esclusivamente sulla superficie del suolo e non sono in grado di penetrare gli strati più profondi del profilo pedologico (Iderawumi Ph.D et al., 2023).

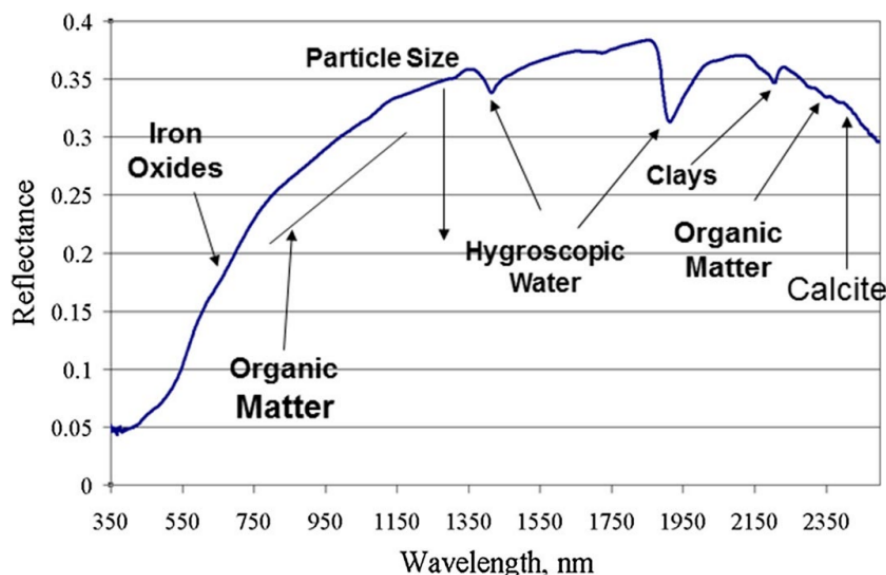


Figura 1-10: rappresentazione dei principali cromofori del suolo (Chabrillat et al., 2019).

L'approccio si fonda sulla misurazione della riflettanza della radiazione elettromagnetica attraverso un ampio intervallo di lunghezze d'onda, tipicamente esteso dalle regioni del visibile (VIS) fino all'infrarosso a onde corte (SWIR), consentendo l'identificazione e la quantificazione di specifici attributi pedologici sulla base dei modelli spettrali rilevati (Iderawumi Ph.D et al., 2023).

Nel dominio del visibile (400–700 nm), la riflettanza del suolo è primariamente condizionata dalla presenza di materia organica e di minerali ossidrilici del ferro.

Tali componenti determinano caratteristici pattern di assorbimento nelle bande del blu e del rosso, la cui intensità è correlata al contenuto di carbonio organico e al grado di alterazione pedogenetica. All'aumentare del tenore di sostanza organica, si osserva una progressiva riduzione dei valori di riflettanza lungo l'intero intervallo visibile, rendendo questa regione spettrale particolarmente diagnostica per la valutazione della fertilità del suolo.

Nel dominio dell'infrarosso vicino (700–1300 nm), la risposta spettrale del suolo risulta principalmente sensibile al contenuto di umidità e alla presenza delle argille. L'acqua, per le sue caratteristiche di assorbimento selettivo, induce una riduzione della riflettanza proporzionale al contenuto idrico volumetrico, rendendo questa banda uno strumento di notevole interesse per il monitoraggio dello stato idrico del profilo pedologico superficiale (Iderawumi Ph.D et al., 2023). Nell'intervallo dell'infrarosso a onde corte (SWIR, 1300–2500 nm), le proprietà ottiche del suolo sono governate congiuntamente dal carbonato di calcio e dall'gesso (Iderawumi Ph.D et al., 2023).

La comparazione delle firme spettrali acquisite su suoli con caratteristiche differenti consente di individuare pattern sistematici associati a specifiche proprietà. Tali relazioni empiriche vengono successivamente formalizzate in modelli predittivi, i quali permettono di stimare le caratteristiche del suolo su ampie superfici a partire dai soli dati di telerilevamento, riducendo significativamente il ricorso al campionamento fisico tradizionale (Iderawumi Ph.D et al., 2023).

1.5.1.4 *La sensoristica*

I sistemi di telerilevamento operano attraverso la rilevazione della radiazione elettromagnetica che interagisce con le superfici indagate, sia per effetto di riflessione che di emissione diretta. Sulla base del meccanismo fisico di acquisizione, la letteratura di settore distingue tradizionalmente i sistemi di rilievo in due macro-categorie: i sensori attivi e i sensori passivi (Casa Raffaele, 2016).

- I sensori attivi si caratterizzano per la presenza di una sorgente di energia propria, integrata nel sistema di acquisizione, che emette un segnale elettromagnetico diretto verso il bersaglio e ne misura la componente riflessa o retro diffusa. Questa proprietà conferisce loro una sostanziale indipendenza dalle condizioni di illuminazione ambientale, rendendoli operativi tanto di giorno quanto di notte e in condizioni di copertura nuvolosa, poiché il segnale acquisito è riferito esclusivamente alla sorgente interna e non alla radiazione solare incidente.

Tra le tecnologie attive di maggiore impiego in ambito di telerilevamento agricolo troviamo:

- il sistema RADAR (*Radio Detection and Ranging*) sfrutta la propagazione di onde radio (microonde) per rilevare la presenza, la posizione e le caratteristiche geometriche degli oggetti intercettati. Il principio operativo si fonda sull'emissione di un impulso radio che, diffondendosi nell'ambiente circostante, genera una quota di energia retro diffusa in direzione del ricevitore; l'analisi del segnale di ritorno consente di ricostruire informazioni sulla struttura e sulla rugosità delle superfici investigate, con applicazioni che spaziano dalla mappatura topografica all'analisi dello stato del suolo (Iderawumi Ph.D et al., 2023).
- Il sistema LiDAR (*Light Detection and Ranging*) adotta invece un impulso laser pulsato per misurare con elevata precisione la distanza tra il sensore e il bersaglio, calcolando il tempo di ritorno del segnale riflesso. L'elaborazione delle nuvole di punti tridimensionali così generate consente di ricavare parametri biofisici della coltura, quali altezza massima della chioma, copertura superficiale e architettura strutturale, inoltre di produrre modelli digitali del suolo e della vegetazione ad alta risoluzione, di notevole utilità per la stima della biomassa e per la delineazione delle zone di gestione differenziate (Ten Harkel et al., 2019).
- I sensori passivi non dispongono di una sorgente di energia propria, ma sfruttano la radiazione solare quale unica fonte di illuminazione. Essi acquisiscono la componente della radiazione elettromagnetica riflessa dalla superficie oggetto della rilevazione, operando tipicamente attraverso una coppia di fotorivelatori: il primo quantifica la radiazione incidente sulla coltura, mentre il secondo misura la componente riflessa dalla copertura vegetale, consentendo il calcolo della riflettanza per differenza (Casa Raffaele, 2016).

All'interno di questa categoria si distinguono i sensori ottici, che catturano la radiazione riflessa negli intervalli del visibile (VIS), dell'infrarosso vicino (NIR) e dell'infrarosso a onde corte (SWIR), producendo immagini che costituiscono la base informativa per il calcolo degli indici di vegetazione; ed i sensori termici, per contro, operano nella regione dell'infrarosso termico (LWIR), convenzionalmente compresa tra 8 e 14 μm , rilevando la radiazione emessa dagli oggetti in funzione della loro temperatura superficiale, in accordo con la legge di Stefan-Boltzmann, secondo cui qualsiasi corpo con temperatura superiore allo zero assoluto emette radiazione termica in misura proporzionale alla quarta potenza della propria temperatura assoluta. Nelle applicazioni agronomiche, i sensori termici trovano impiego prevalente nel monitoraggio dello stress idrico delle colture, in

quanto le variazioni del potenziale idrico fogliare si riflettono direttamente in alterazioni della temperatura della chioma, rilevabili come anomalie nella firma termica della superficie agricola (Matese & Di Gennaro, 2018).

Nell'ambito dei sistemi di acquisizione passiva, le camere ottiche si differenziano principalmente in funzione della loro risoluzione spettrale, ovvero della capacità di discriminare e registrare la radiazione elettromagnetica riflessa all'interno di bande spettrali più o meno ampie e numerose. In termini generali, all'incremento del numero di bande acquisite corrisponde un proporzionale aumento della capacità diagnostica del sensore, e dunque del suo potere risolutivo sul piano spettrale.

Nella pratica dell'Agricoltura di Precisione, tre categorie di sensori ottici trovano impiego prevalente, ciascuna caratterizzata da specifiche prestazioni e da distinti profili di costo-efficacia.

- Le camere digitali RGB (Red-Green-Blue) operano esclusivamente nell'intervallo del visibile, acquisendo immagini attraverso l'analisi di sequenze di fotogrammi nelle tre bande cromatiche fondamentali. Sebbene il loro costo contenuto le renda accessibili a una vasta platea di operatori, la limitazione allo spettro visibile ne circoscrive l'impiego a specifiche applicazioni, tra cui la fotogrammetria aerea e la ricostruzione tridimensionale di superfici agrarie (Casa Raffaele, 2016; Klodt et al., 2015; Matese et al., 2016).
- Le camere multispettrali rappresentano attualmente la tipologia di sensore maggiormente diffusa nelle applicazioni SAPR per l'Agricoltura di Precisione. Tali strumenti acquisiscono tipicamente da quattro a dodici bande spettrali distinte, con ampiezze di banda comprese tra 15 e 70 nm e un intervallo spettrale coperto che si estende indicativamente tra i 450 e i 1000 nm (Casa Raffaele, 2016). Pur presentando una risoluzione spettrale contenuta, insufficiente a risolvere i dettagli fini della curva di riflettanza, queste camere si dimostrano particolarmente efficaci per il calcolo degli indici vegetazionali e per la generazione di mappe di vigore colturale, consentendo di rilevare risposte differenziate in condizioni di carenza nutrizionale, stress idrico o presenza di agenti fitopatogeni.

Sul piano costruttivo, è possibile operare una doppia classificazione di questi sensori. Il primo criterio riguarda la modalità di acquisizione delle lunghezze d'onda: si distinguono a tal fine i sensori single imager, che impiegano un unico elemento ottico dotato di filtri intercambiabili per le diverse bande, dai sensori

multi imager, che prevedono un'ottica dedicata per ciascuna banda spettrale (Moshou et al., 2005; Svensgaard et al., 2014). Il secondo criterio attiene alla tecnologia del piano focale: i sensori global shutter acquisiscono simultaneamente tutti i pixel dell'immagine, eliminando le distorsioni geometriche indotte dalle vibrazioni della piattaforma e risultando pertanto preferibili in condizioni operative caratterizzate da elevata instabilità; i sensori rolling shutter, viceversa, effettuano la scansione progressiva del piano focale dall'alto verso il basso, il che li rende scarsamente adatti ad alte velocità di volo (Casa Raffaele, 2016).

- Le camere iperspettrali rappresentano la soluzione tecnologicamente più avanzata tra le tipologie esaminate. La loro capacità di acquisire centinaia di bande spettrali contigue, con ampiezze tipicamente comprese tra 5 e 10 nm e un intervallo spettrale esteso da circa 350 a 1000 nm, consente di ricostruire con elevata fedeltà la firma spettrale dei target indagati, identificando i caratteristici picchi di assorbimento associati a specifiche sostanze biochimiche (Lu et al., 2020). Grazie a tale risoluzione diagnostica, l'imaging iperspettrale abilita la stima di un ampio spettro di variabili biofisiche e biochimiche, tra cui il contenuto di clorofilla, carotenoidi e acqua fogliare, il LAI e la biomassa, lo stato nutrizionale in termini di disponibilità di azoto e l'incidenza di patologie fogliari, nonché proprietà pedologiche superficiali quali il tenore di umidità, la sostanza organica e il carbonio del suolo (Lu et al., 2020). A fronte di tali potenzialità, l'imaging iperspettrale sconta due limitazioni strutturali: l'elevata complessità del flusso di elaborazione dei dati e il costo particolarmente elevato della strumentazione, che ne restringe ancora l'adozione su larga scala nel contesto operativo.

Un articolo scientifico, dopo aver analizzato tutte le pubblicazioni all'interno della banca dati Web of Science Core Collection (WoSCC), ha evidenziato l'utilizzo quantitativo a livello sperimentale dei sensori attivi e passivi applicati in agricoltura di precisione, utili al fine di calcolare gli indici di vegetazione. Inoltre emerge come le camere multispettrali, iperspettrali e RGB costituiscano i sistemi di acquisizione predominanti negli studi indicizzati a partire dal 2010 (vedi figura 1-9), con un incremento progressivo e marcato delle pubblicazioni nel periodo compreso tra il 2010 e il 2022 (Radočaj et al., 2023).

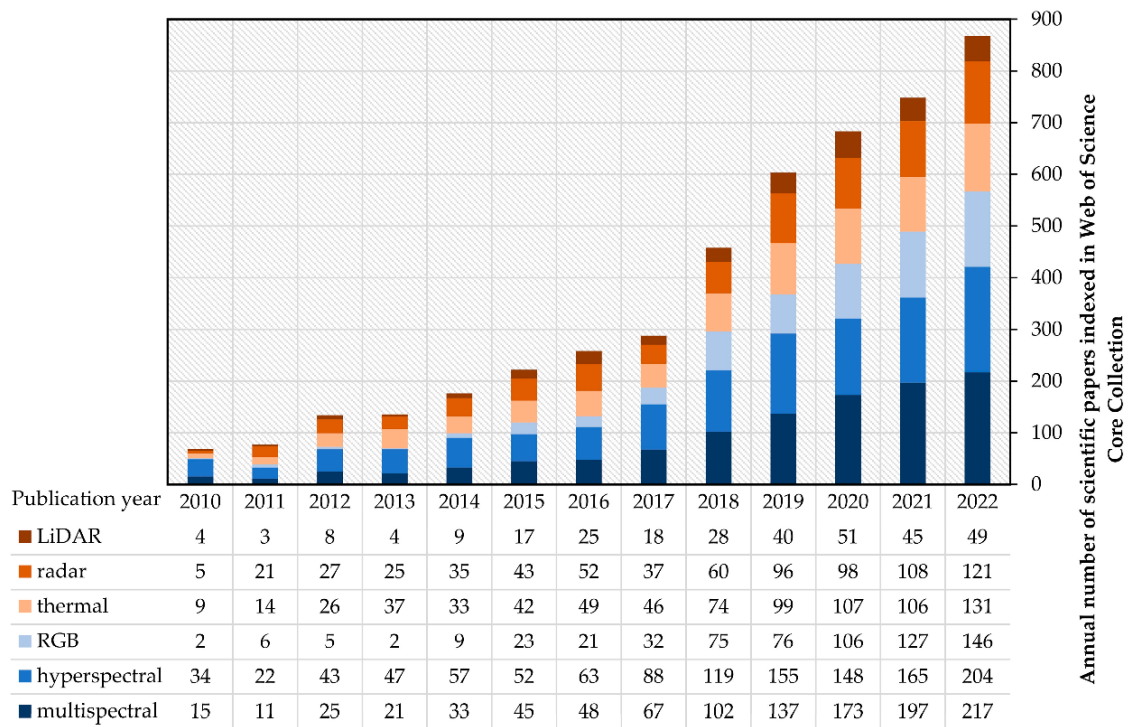


Figura 1-11: Articoli dal 2010 al 2022 indicizzati al WoSCC, in riferimento all'AP e alle tipologie di sensore applicato (Radočaj et al., 2023).

1.5.1.5 Le piattaforme di telerilevamento

L'acquisizione di dati spettrali per le applicazioni di Agricoltura di Precisione può avvenire mediante l'impiego di tre distinte categorie di piattaforme di telerilevamento: i sistemi satellitari, le piattaforme aeree con pilota a bordo e i Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR). Oltre che per la risoluzione spettrale già trattata, queste piattaforme si differenziano anche per:

- La risoluzione spaziale → rappresenta la capacità di un sensore, montato su una piattaforma, di discriminare il dettaglio minimo distinguibile all'interno di un'immagine digitale. Essa è direttamente correlata alla densità di pixel che costituiscono il dataset: un incremento della risoluzione spaziale comporta una riduzione della superficie al suolo rappresentata dalla singola unità informativa (pixel), parametro tecnicamente definito come Ground Sampling Distance (GSD). Ne deriva che le acquisizioni ad alta risoluzione garantiscono una superiore densità di informazioni spaziali, permettendo una caratterizzazione della superficie indagata estremamente dettagliata e una precisione analitica superiore nei modelli successivamente applicabili (es: stima della vigoria)(Casa Raffaele, 2016).

Tra i parametri tecnici che maggiormente differenziano le tre piattaforme, la risoluzione spaziale riveste un ruolo determinante nella capacità di rappresentare la variabilità intra-parcellare del sistema colturale. I sistemi satellitari di nuova generazione, pur avendo raggiunto risoluzioni dell'ordine di 1–5 metri per i prodotti commerciali ad alta risoluzione (lontani da quelli di vecchia generazione che consentono di accedere ai dati in maniera gratuita a scapito di una risoluzione che varia da decine a centinaia di metri) presentano ancora limitazioni significative per numerose applicazioni di Agricoltura di Precisione che richiedono dati a scala centimetrica (Sishodia et al., 2020).

Le piattaforme aeree con pilota a bordo si collocano in una posizione intermedia, con risoluzioni tipicamente comprese tra 0,25 e 0,5 metri per pixel, in funzione della quota di volo e delle caratteristiche ottiche del sensore installato.

I sistemi SAPR, operando a quote sensibilmente inferiori, generalmente comprese tra 50 e 200 metri dal suolo, sono in grado di acquisire immagini con risoluzioni spaziali dell'ordine di pochi centimetri per pixel, rendendo possibile la distinzione tra elementi strutturali della superficie indagata (es: coltura) altrimenti non distinguibili con le piattaforme a quota maggiore (Matese et al., 2015).

Il confronto sperimentale su due vigneti italiani ha evidenziato con chiarezza come la risoluzione spaziale rappresenti il parametro chiave che governa la quantità di informazione spaziale effettivamente campionata da ciascuna piattaforma (Matese et al., 2015). Nelle aree caratterizzate da un'elevata eterogeneità vegetativa intra-parcellare, la piattaforma UAV ha mostrato una distribuzione NDVI significativamente più ampia e un coefficiente di variazione superiore rispetto alle piattaforme aerea e satellitare, attribuibili alla capacità della risoluzione centimetrica di discriminare le chiome vegetali dalle superfici inter-fila. I sistemi satellitari, viceversa, producono una mediazione spettrale tra chioma e inter-fila, restituendo una distribuzione di valori più compressa e un minore potere diagnostico nelle condizioni di alta variabilità spaziale. La piattaforma aerea si è collocata in una posizione intermedia rispetto alle altre due in termini di distribuzione degli istogrammi NDVI e di variabilità statistica rilevata.

Un'ulteriore implicazione pratica di tale differenza risolutiva riguarda la possibilità di applicare filtri spaziali selettivi. L'alta risoluzione dei sistemi SAPR consente di escludere dal calcolo degli indici vegetazionali il contributo spettrale delle superfici inter-fila, operazione non praticabile con le piattaforme a risoluzione più grossolana, nelle quali l'inter-fila contribuisce in modo sistematico alla risposta radiometrica acquisita,

introducendo un'inesattezza nella stima del vigore vegetativo della sola chioma (Matese et al., 2015).

- La risoluzione temporale e la flessibilità operativa → Sul piano della risoluzione temporale, il sistema satellitare presenta il vantaggio intrinseco di garantire una copertura periodica e sistematica delle aree agricole, con frequenze di rivisitazione che, nei sistemi costellazione più avanzati, possono raggiungere la cadenza giornaliera o sub-giornaliera a differenza dei sistemi più datati, che si aggirano tra i 2-10gg (Sishodia et al., 2020). Tale caratteristica lo rende particolarmente adatto al monitoraggio stagionale dell'evoluzione colturale e alla costruzione di serie storiche pluriennali, consentendo analisi di tipo dinamico impossibili da condurre con singole campagne di rilievo. Di contro, la dipendenza dalla copertura nuvolosa costituisce una limitazione strutturale significativa per i sensori operanti nelle regioni del visibile e dell'infrarosso: in presenza di nuvole, l'acquisizione risulta compromessa o impossibile, con conseguente irregolarità della copertura temporale nei periodi critici del ciclo vegetativo (Matese et al., 2015).

Le piattaforme aeree con pilota a bordo consentono una pianificazione delle campagne di rilievo più flessibile rispetto al satellite, potendo essere programmate in funzione delle specifiche fasi fenologiche di interesse agronomico. Tuttavia, la complessità organizzativa e i costi operativi delle missioni aeree ne limitano la ripetibilità nel corso della stagione colturale, rendendole più adatte a rilievi programmati su larga scala piuttosto che a monitoraggi ad alta frequenza temporale (Matese et al., 2015).

I sistemi SAPR si distinguono per il massimo grado di flessibilità operativa: possono essere impiegati su richiesta in qualsiasi momento della stagione, indipendentemente dalle condizioni di illuminazione solare e in larga misura indipendentemente dalla copertura nuvolosa parziale, consentendo l'acquisizione di immagini spettrali nelle finestre temporali di maggiore interesse agronomico.

La principale limitazione dei sistemi SAPR sul piano dell'autonomia operativa è rappresentata dalla limitata endurance di volo, che restringe la superficie massima acquisibile in una singola missione e rende questa piattaforma meno competitiva rispetto all'aereo e al satellite per applicazioni su superfici di grande estensione (Matese et al., 2015).

- L'analisi economica in funzione della scala di applicazione → La selezione della piattaforma di telerilevamento più appropriata non può prescindere da una valutazione del profilo economico associato a ciascuna tecnologia in rapporto alla scala spaziale dell'intervento. L'analisi dei costi condotta da Matese et al. (2015), articolata nelle voci

di acquisizione, georeferenziazione e ortorettifica e processamento delle immagini, ha evidenziato l'esistenza di un punto di pareggio economico tra le tre piattaforme collocato leggermente al di sopra dei 5 ettari di superficie (Matese et al., 2015).

Per superfici inferiori a tale soglia, il sistema SAPR risulta la soluzione più conveniente sul piano del rapporto costo-efficacia, grazie ai bassi costi di acquisizione che compensano le maggiori esigenze di processamento legate all'elevato numero di fotogrammi. Per superfici dell'ordine dei 50 ettari, invece, il sistema UAV diventa la soluzione economicamente meno favorevole, in quanto il numero di immagini necessarie per coprire l'area cresce in modo esponenziale, con una corrispondente lievitazione dei costi di georeferenziazione e mosaicatura. In tale contesto dimensionale, la piattaforma aerea e quella satellitare acquisiscono un vantaggio competitivo, con il satellite che mantiene un costo di acquisizione sostanzialmente invariante rispetto alla superficie indagata, in quanto una singola scena copre indifferentemente estensioni di alcuni ettari o di diverse decine di chilometri quadrati.

Inoltre, la disponibilità crescente di sistemi SAPR a basso costo stia progressivamente modificando il panorama applicativo dell'AP, rendendo accessibile il telerilevamento ad alta risoluzione spaziale anche alle aziende di piccole e medie dimensioni, per le quali l'acquisizione di immagini satellitari commerciali ad alta risoluzione o l'organizzazione di campagne aeree risulterebbe economicamente insostenibile.

Allo stesso tempo, il costo complessivo dell'impiego di sistemi SAPR a scala commerciale, comprensivo di equipaggiamento, software di processamento e formazione degli operatori, rimane un investimento significativo per le aziende con risorse limitate, sebbene la tendenza al ribasso dei costi delle tecnologie di sensori e la progressiva standardizzazione dei flussi di lavoro per l'elaborazione delle immagini lascino prevedere una maggiore diffusione di queste soluzioni nel medio termine (Matese et al., 2015).

1.6 L'analisi della variabilità

La fase di rilevamento della variabilità, descritta nei paragrafi precedenti, produce un insieme eterogeneo di dati georeferenziati che, nella loro forma grezza, non sono direttamente traducibili in decisioni agronomiche operative. Affinché tali informazioni possano costituire la base per la definizione di strategie di gestione sito-specifica, è necessario sottoporle a un processo strutturato di analisi, visualizzazione e archiviazione, che si avvale dell'integrazione sinergica di strumenti matematici, statistici e informatici.

1.6.1 *Geographic Information Systems (GIS)*

Tra gli strumenti informatici a supporto dell'Agricoltura di Precisione, i Geographic Information Systems (GIS), in italiano Sistemi Informativi Geografici, occupano una posizione centrale nel ciclo di gestione del dato spaziale. Un sistema GIS può essere definito come una piattaforma software integrata finalizzata alla raccolta, all'archiviazione, alla trasformazione e alla restituzione cartografica di dati georeferenziati. La sua architettura consente di operare analisi multistrato su basi di dati complesse, estraendo informazioni aggiuntive rispetto a quelle contenute nei dataset originali.

Sul piano della struttura del dato, i GIS gestiscono due tipologie fondamentali di informazione geografica. Il dato di tipo vettoriale rappresenta gli oggetti spaziali mediante geometrie elementari — punti, linee e poligoni — alle quali sono associate tabelle di attributi descrittivi; un esempio applicativo è costituito dalla delimitazione dei confini degli appezzamenti, corredati da informazioni sulla superficie e sul perimetro. Il dato di tipo raster, per contro, è strutturato come una matrice di pixel, ciascuno dei quali è portatore di uno o più valori numerici riferiti a una specifica grandezza misurata, come nel caso delle immagini multispettrali acquisite da piattaforme satellitari o UAV, nelle quali ogni pixel registra i valori di riflettanza nelle bande di interesse.

Le operazioni analitiche condotte all'interno di un ambiente GIS possono essere ricondotte a tre macro-categorie funzionali: le analisi di tipo topologico, che indagano le relazioni geometriche e spaziali tra gli oggetti; quelle di tipo insiemistico, volte all'identificazione di relazioni tra attributi di elementi distinti; e le operazioni di tipo matematico, che comprendono l'algebra dei layer e il calcolo di indicatori statistici sui valori associati ai singoli pixel o elementi vettoriali.

In un esempio di workflow dell'Agricoltura di Precisione, il GIS costituisce l'ambiente operativo nel quale i dati acquisiti nella fase di telerilevamento vengono corretti, filtrati, visualizzati e analizzati al fine di produrre le Mappe di Prescrizione necessarie per l'attuazione delle strategie a rateo variabile. La capacità di archiviare serie temporali di mappe tematiche consente inoltre di analizzare in modo quantitativo la componente dinamica della variabilità, fornendo all'operatore una base informativa solida per la formulazione di strategie gestionali di lungo periodo e per l'implementazione di sistemi di supporto alle decisioni.

1.6.2 *La geostatistica*

La quantificazione e la modellizzazione della variabilità spaziale dei parametri agronomici richiede il ricorso a tecniche proprie della geostatistica, disciplina definita come lo studio dei fenomeni regionalizzati, ovvero di quei fenomeni distribuiti nello spazio e nel tempo che

presentano una struttura di autocorrelazione spaziale (Emery X., 2001). Il concetto di autocorrelazione spaziale implica che le osservazioni effettuate in punti geograficamente prossimi tendano a presentare valori più simili rispetto a quelle rilevate a distanze maggiori: una proprietà intrinseca di tutti i fenomeni naturali che governano la produttività agricola e che rende la geostatistica uno strumento particolarmente adatto al supporto dell'AP.

Tra le applicazioni geostatistiche di maggiore rilevanza operativa si distingue il kriging, tecnica di interpolazione spaziale che consente la stima ottimale di una variabile in punti non campionati, sfruttando la struttura di correlazione spaziale desunta dall'insieme dei campioni disponibili (Casa Raffaele, 2016). Tale approccio risulta indispensabile ogniqualvolta una grandezza agronomica, come il contenuto in azoto del suolo o l'indice di area fogliare, è misurabile soltanto in modo discontinuo, ma la sua variabilità deve essere nota a una risoluzione spaziale più elevata ai fini della gestione differenziata dell'appezzamento. Una estensione di tale tecnica, denominata cokriging, permette di integrare la variabile di interesse primario con una variabile ausiliaria correlata, misurata a risoluzione più elevata, al fine di migliorare la precisione e la risoluzione spaziale della stima. Un esempio applicativo di notevole rilevanza per il tema della concimazione a rateo variabile è rappresentato dalla mappatura delle caratteristiche pedologiche, nella quale le misure dirette ottenute da campionamenti puntuali vengono integrate con i dati di riflettanza derivanti dal rilievo prossimale o da piattaforme UAV, consentendo la stima delle proprietà del suolo a una scala spaziale più dettagliata (Casa Raffaele, 2016).

Il kriging a blocchi rappresenta un'altra tecnica di interpolazione geostatistica volta alla stima del valore medio assunto da una variabile regionalizzata all'interno di specifici domini spaziali, definiti appunto blocchi, elaborando l'informazione derivante da misurazioni puntuali.

Strettamente connessa all'obiettivo della gestione sito-specifica è infine l'applicazione della geostatistica alla delineazione delle zone di gestione o management zones (trattate nel paragrafo 1.3). Tale operazione, che costituisce il passaggio analitico fondamentale tra il rilevamento della variabilità e la generazione delle Mappe di Prescrizione, viene tipicamente condotta all'interno degli ambienti GIS, i quali integrano nativamente gli strumenti di analisi geostatistica descritti.

1.6.3 I modelli di simulazione e i sistemi di supporto alle decisioni (DSS)

Il processo di trasformazione del dato georeferenziato in una decisione agronomica operativa si concretizza grazie ai modelli di simulazione colturale poi connessi ai sistemi di supporto alle decisioni (Decision Support Systems, DSS).

I modelli di simulazione sono strumenti computazionali che descrivono, mediante un sistema di equazioni matematiche (algoritmi), le interazioni dinamiche che intercorrono tra la pianta, il suolo e l'atmosfera (Basso & Ritchie, 2015). La loro funzione primaria consiste nel simulare, in modo

virtuale e a costo computazionale contenuto, gli effetti produttivi e ambientali pluriennali di diverse alternative gestionali in risposta alle condizioni ambientali locali, consentendo all'operatore di identificare le variabili che maggiormente condizionano le scelte gestionali al fine di massimizzare la produttività e minimizzare l'impatto ambientale (Basso et al., 2005).

Integrati nel paradigma dell'Agricoltura di Precisione, i DSS ricevendo in ingresso:

- i dati acquisiti nella fase di telerilevamento, comprensivi delle informazioni sulla variabilità spaziale e temporale delle condizioni colturali e pedologiche
- le previsioni dei modelli del sistema suolo-pianta-atmosfera
- le informazioni legate ai prelievi di campionamenti

restituiscono indicazioni gestionali differenziate per ciascuna management zone precedentemente delineata grazie a sistemi GIS.

Le applicazioni dei DSS portano un contributo dimostrato su tre livelli distinti:

- Storico → un esempio è il monitoraggio della lisciviazione dei nitrati in zone vulnerabili negli ultimi 30 anni (Basso et al., 2016).
- Tattica → consentono di prevedere la pratica agronomica migliore per la stagione in corso, come per esempio stabilire la quantità in kg di azoto da apportare al grano in base alle condizioni pedoclimatiche della management zone (Basso et al., 2011).
- Strategica → efficientare la gestione degli input nel lungo termine (Basso et al., 2011).

In sintesi i DSS in congiunzione con i mezzi dell'Agricoltura di Precisione (es: spandiconcime a VRA) consentono all'azienda agricola di assistere ai processi decisionali e gestionali dell'attività, restituendo consigli, che se messi in pratica, determinano vantaggi a livello: economico (es: risparmio sul fertilizzante), ambientale (es: minor lisciviazione dei nitrati), efficacia operativa (es: maggior tempestività/programmazione degli interventi) e produttività (aumento delle rese).

1.7 Gestione aziendale dei dati

L'applicazione integrata delle tecnologie proprie dell'Agricoltura di Precisione, dal telerilevamento multispettrale alla georeferenziazione GNSS, fino all'elaborazione geostatistica e ai modelli di simulazione colturale, genera un flusso continuo e di notevole entità di dati georeferenziati, i quali, nella loro forma grezza, non sono direttamente traducibili in decisioni agronomiche operative. Affinché tali informazioni acquisiscano un effettivo valore gestionale, è necessario che vengano sistematicamente raccolte, elaborate e archiviate all'interno di strutture logiche organizzate, interrogabili in qualsiasi momento del ciclo produttivo. A tale scopo, la letteratura di settore individua nei FMIS (Farm Management Information Systems) lo strumento

integrativo fondamentale, in grado di connettere le diverse componenti del framework tecnologico dell'AP in un'unica piattaforma decisionale (Casa Raffaele, 2016).

La struttura funzionale di un FMIS si articola in corrispondenza di tre livelli gerarchici che caratterizzano il processo decisionale aziendale:

- Al livello operativo, riguarda l'esecuzione e il controllo dei singoli processi elementari di campo, il FMIS, integrato con le tecnologie di AP, consente l'automazione di specifiche mansioni e l'ottimizzazione nell'impiego dei fattori produttivi. L'interfacciamento diretto con le macchine operatrici dotate di sistemi VRA rappresenta, in quest'ambito, l'applicazione di maggiore rilevanza, in quanto permette la trasmissione automatica delle mappe di prescrizione dall'ambiente gestionale al terminale di bordo, riducendo il margine di errore operativo e garantendo la tracciabilità puntuale di ogni intervento eseguito.
- Al livello direttivo-tattico, concernente la pianificazione delle operazioni colturali, la gestione degli approvvigionamenti e il controllo contabile, il contributo del FMIS assume la massima importanza. In sinergia con i DSS, già descritti nel paragrafo precedente, la piattaforma informativa aziendale consente una programmazione ottimale delle operazioni in funzione delle fasi fenologiche e delle condizioni pedoclimatiche rilevate, nonché la gestione integrata del magazzino dei fattori produttivi e la registrazione sistematica dei dati contabili di processo. Un ulteriore contributo di rilievo è offerto dalla possibilità di condurre analisi della variabilità temporale dei fenomeni produttivi su basi di dati pluriennali, consentendo l'identificazione di tendenze ricorrenti e anomalie che orientano le scelte gestionali verso interventi maggiormente mirati ed efficaci.
- Al livello strategico, infine, il FMIS fornisce il supporto informativo necessario per le decisioni di medio-lungo periodo, comprendenti la progettazione dell'attività produttiva e la pianificazione degli investimenti in tecnologie e infrastrutture aziendali. Dati opportunamente aggregati e strutturati consentono all'imprenditore agricolo una conoscenza analitica dei costi associati a ciascuna attività, nonché una valutazione oggettiva delle criticità e delle potenzialità del proprio sistema produttivo, favorendo scelte di investimento consapevoli e coerenti con gli obiettivi aziendali di lungo termine.

Un ulteriore aspetto di rilevante interesse pratico riguarda il contributo che i FMIS apportano alla tracciabilità delle produzioni. La registrazione sistematica di tutti gli input impiegati e delle operazioni eseguite, in formato digitale consente una consultazione e un'archiviazione costante ed istantanea; costituendo un prerequisito tecnico indispensabile sia per l'adesione a regimi di

qualità certificata e a misure di sostegno pubblico legate all'adozione di pratiche agro-ambientali, sia per rispondere alle crescenti esigenze di trasparenza e documentazione richieste dai mercati di sbocco e dagli strumenti di marketing territoriale.

A supporto dei vantaggi burocratici che apportano questi sistemi, è la necessità delle aziende agricole ad allinearsi alla normativa recentemente aggiornata dalla pubblicazione del 23 aprile 2026 della Gazzetta Ufficiale Serie Generale, il quale riporta il: n. 94, Decreto del Ministero dell'Agricoltura, della Sovranità Alimentare e delle Foreste del 30 dicembre 2025 relativo all'attuazione del regolamento di esecuzione (Ue) 2025/2203 della Commissione del 31 ottobre 2025 sulla conversione nel formato elettronico del registro dei prodotti fitosanitari.

Con questo decreto, a livello nazionale, tutte le aziende agricole dovranno avere obbligatoriamente entro il 31 dicembre del 2026, il proprio registro dei trattamenti fitosanitari in formato elettronico ed è qui che i sistemi FMSI vengono incontro a questa esigenza, andando ad archiviare e catalogare i dati per poi essere forniti alle varie amministrazioni.

Capitolo 2

I DRONI

Le strategie fondate sui pilastri dell'Agricoltura di Precisione, illustrate nel capitolo precedente, richiedono strumenti operativi capaci di tradurre l'informazione acquisita in un intervento agronomico concreto e georeferenziato. In tale contesto, l'impiego di un drone professionale per la distribuzione a Rateo Variabile, sulla base delle Mappe di Prescrizione elaborate a partire dai dati di telerilevamento, rappresenta l'anello conclusivo della filiera tecnologica dell'AP: quello che trasforma l'analisi spaziale della variabilità in un'azione fisica sul campo.

L'impiego professionale degli UAV in ambito agricolo è tuttavia subordinato a un sistema normativo stratificato e in rapida evoluzione, nel quale interagiscono disposizioni di diritto aeronautico europeo e nazionale, standard tecnici propri dell'Agricoltura 4.0 e, quando l'impiego riguarda la distribuzione di prodotti fitosanitari, un ulteriore e più restrittivo corpus normativo di carattere sanitario, fitosanitario e ambientale. La corretta comprensione di tale quadro multilivello risulta imprescindibile per qualsiasi operatore che intenda condurre operazioni di concimazione a rateo variabile mediante UAV in modo conforme, sicuro e consapevole dei propri obblighi.

2.1 Il Quadro Normativo per l'Impiego degli UAV in Agricoltura

Il fondamento normativo generale è costituito dal Regolamento di Esecuzione (UE) 2019/947 della Commissione, del 24 maggio 2019, emanato dall'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea (EASA, European Union Aviation Safety Agency), il quale ha armonizzato la disciplina dei sistemi UAS (Unmanned Aircraft System) in tutti gli Stati membri dell'Unione Europea (UE, 2019). Norme tecniche e procedure per l'esercizio di aeromobili a pilotaggio remoto, sono state recepite a livello nazionale dal Regolamento ENAC UAS-IT, entrato in vigore il 4 gennaio 2021 (ENAC, 2021). In funzione delle caratteristiche dello scenario operativo, le attività specializzate condotte tramite drone in agricoltura possono ricadere sia nella categoria operativa:

- Aperta (Open)
- Specifica (Specific),

- Certificata, normativa che descrive una categoria per l'aviazione tradizionale denominata come categoria certificata.

La Categoria Aperta (Open Category) → È destinata alle operazioni a basso rischio e non richiede autorizzazioni preventive specifiche, fatto salvo il rispetto di determinate condizioni operative. Il drone impiegato deve avere una massa operativa al decollo, comprensiva dell'eventuale payload trasportato, non superiore a 25 kg, deve operare a un'altitudine massima di 120 metri dal suolo, esclusivamente entro la linea di visibilità diretta del pilota remoto (VLOS, Visual Line of Sight), e non deve mai sorvolare assembramenti di persone; va inoltre evitato, per quanto possibile, il sorvolo di persone non coinvolte nell'operazione. All'interno della Categoria Aperta si distinguono tre sottocategorie, individuate in base alla classe di marcatura del mezzo (C0-C4):

- A1 → droni di classe C0 o C1, di peso non superiore a 900 grammi (o mezzi equivalenti immessi sul mercato prima del 31 dicembre 2023); operazioni consentite anche in prossimità di persone non coinvolte.
- A2 → droni di classe C2, da impiegare a una distanza minima di 30 metri da persone non coinvolte; il pilotaggio in questa sottocategoria richiede il conseguimento di un attestato dedicato, subordinato al superamento di un esame teorico aggiuntivo e a una formazione pratica presso un ente di addestramento riconosciuto da ENAC, oltre al possesso preventivo dell'attestato A1/A3.
- A3 — droni di classe C3 o C4, di peso non superiore a 25 kg (o mezzi equivalenti immessi sul mercato prima del 31 dicembre 2023), da impiegare lontano da persone non coinvolte e a una distanza minima di 150 metri da aree residenziali, commerciali, industriali o ricreative. È questa la sottocategoria di gran lunga più ricorrente nello scenario agricolo: praticamente tutte le missioni di monitoraggio dei campi con camere RGB o sensori multispettrali vi ricadono.

L'accesso alle sottocategorie A1 e A3 richiede il solo superamento di un esame teorico online (il c.d. "patentino"), mentre la sottocategoria A2 richiede l'esame teorico aggiuntivo sopra descritto (UE, 2019).

Prima di ogni missione, inoltre, il pilota è tenuto a verificare, tramite il portale d-flight, l'eventuale presenza di zone geografiche UAS soggette a restrizione: divieti istituiti per ragioni di safety es: aeroporti, elisuperfici... (ENAC, 2021); oppure per finalità di tutela ambientale o di security es: parchi naturali, edifici governativi, istituti penitenziari... (ENAC, 2021).

La Categoria Specifica (Specific Category) → È opportuno sottolineare come le operazioni che comportano il rilascio di materiale dall'alto, quali la distribuzione di fertilizzanti, di prodotti

fitosanitari o di insetti utili, al di là della linea visiva del pilota (BVLOS, Beyond Visual Line of Sight), siano per definizione escluse dalla Categoria Aperta, indipendentemente dal peso del mezzo impiegato, così come lo sono le missioni condotte con droni di massa operativa superiore ai 25 kg: entrambe le condizioni comportano l'inquadramento automatico dell'operazione in Categoria Specifica, in quanto il profilo di rischio dell'operazione risulta superiore a quello ammesso in categoria aperta. Per tale motivo in questa categoria sono necessari requisiti di gestione della sicurezza (Safety Management System), oltre a un livello di qualificazione del pilota superiore (UE, 2019).

La Categoria Certificata (Certified Category) → è riservata alle operazioni di rischio più elevato, equiparabili a quelle dell'aviazione tradizionale, quali il trasporto di persone, di merci pericolose o le operazioni condotte in aree urbane densamente popolate, e non risulta pertinente al contesto della presente trattazione.

2.1.1 Il ruolo dell'ENAC e la transizione normativa in Italia

A livello nazionale, l'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC) funge da autorità competente per la vigilanza e l'attuazione dei regolamenti europei, avendo pubblicato il Regolamento UAS-IT per disciplinare gli aspetti di competenza nazionale (ENAC, 2021). L'Italia ha attraversato, tra il 2024 e il 2025, una fase di significativa transizione normativa, caratterizzata da scadenze che hanno imposto un rapido adeguamento al framework europeo:

- Scenari Standard Nazionali (IT-STC) → fino al 30 giugno 2024 gli operatori hanno potuto presentare dichiarazioni operative in accordo agli Scenari Standard Nazionali definiti da ENAC. Le operazioni basate su tali dichiarazioni sono state consentite fino al 31 dicembre 2025, termine oltre il quale il percorso dichiarativo IT-STC non è più valido (UE, 2022).
- Scenari Standard Europei (STS) → a partire dal 1° gennaio 2024 gli operatori possono presentare dichiarazioni di conformità agli Scenari Standard Europei (STS-01 e STS-02), che richiedono tuttavia l'impiego di droni dotati di marcatura di classe C5 o C6 secondo i criteri EASA (UE, 2020).

2.1.2 I percorsi autorizzativi in Categoria Specifica

Per operare legalmente in Categoria Specifica, l'operatore può accedere a tre distinti percorsi autorizzativi, tra loro alternativi.

- La Dichiarazione STS (Standard Scenario) rappresenta la procedura più semplice, applicabile quando l'operazione rientra nei limiti predefiniti di uno Scenario Standard, in

quanto non è necessario presentare all'ENAC una valutazione dei rischi. L'operatore presenta una dichiarazione di conformità all'ENAC (di durata 2 anni) tramite il portale d-flight, con il versamento di una tariffa fissa pari a 114,00 € (codice R66-1); tale percorso, come illustrato al paragrafo precedente, è tuttavia condizionato alla disponibilità di piattaforme certificate in classe C5/C6, requisito che ancora oggi limita l'accesso a questa procedura per numerosi operatori agricoli (UE, 2020).

- L'Autorizzazione Operativa PDRA (Pre-Defined Risk Assessment) si applica quando l'operazione non è coperta da uno Scenario Standard, ma EASA ha già pubblicato una valutazione del rischio predefinita per lo scenario di riferimento. L'operatore deve presentare istanza formale a ENAC con almeno 60 giorni di anticipo rispetto all'operazione, includendo:
 - Manuale delle Operazioni (OM). I requisiti di questo manuale si trovano nell'appendice 5 del regolamento 947/2019;
 - checklist EASA relativa al PDRA prescelto;
 - pagamento di un acconto tariffario di 355,00 € (ENAC, 2025);

Il ricorso ai PDRA consente all'operatore l'esonero dalla predisposizione di un documento di valutazione del rischio secondo la metodologia SORA. In ambito agricolo, i PDRA di riferimento sono Il PDRA-S01 e il PDRA-S02 (EASA, 2020, 2023).

Tabella 2-1: Confronto fra gli scenari PDRA-S01 e PDRA-S02

PARAMETRO	PDRA-S01	PDRA-S02
Modalità di conduzione	VLOS mantenuta per l'intera operazione	BVLOS con osservatori dello spazio aereo; decollo e recupero obbligatoriamente in VLOS
Contesto antropico	Area a terra controllata in ambiente popolato	Area a terra controllata in ambiente scarsamente popolato
Distanza massima aeromobile-pilota	Limite della visibilità diretta	1 km in assenza di osservatori; 2 km con osservatori
Visibilità minima in volo	Sufficiente a condurre l'intero volo in VLOS	5 km
Quota massima	120 m dal punto più vicino della superficie	120 m dal punto più vicino della superficie
Dimensione caratteristica	≤ 3 m	≤ 3 m
Tipologia di aeromobile	Limitata ai multirotore	Estesa anche ad ala fissa
Limitazione di velocità	max 5m/s	max 50 m/s.

Trasporto di merci pericolose	Vietato	Vietato
MTOM massimo	Estesa dalla ED Decision 2023/012/R, con rimozione del limite di 25 kg	25 kg

- L'Autorizzazione Operativa SORA (Specific Operations Risk Assessment) è infine necessaria per le operazioni non riconducibili né a uno Scenario Standard né a un PDRA. In tal caso l'operatore è tenuto a sviluppare autonomamente una valutazione del rischio specifica secondo la metodologia SORA, un processo di considerevole complessità amministrativa e tecnica (EASA, 2019).

Qualora lo scenario operativo dell'azienda presenti caratteristiche costanti nel tempo, può risultare conveniente richiedere il Light Unmanned Certificate (LUC), un certificato di approvazione dell'organizzazione aziendale che, ove concesso dall'Autorità Nazionale per l'Aviazione, riconosce all'operatore specifici privilegi: tra questi, la possibilità di condurre le operazioni indicate nel certificato senza dover presentare, di volta in volta, la dichiarazione operativa preventiva (se in accordo a uno Scenario Standard) o la domanda di autorizzazione operativa a ENAC. In presenza di un LUC è infatti lo stesso operatore ad autorizzare, in autonomia e sotto la propria responsabilità, le operazioni UAS indicate nel certificato.

la validità di un LUC è illimitata, purché l'organizzazione resti conforme ai requisiti del certificato, inoltre il LUC può essere revocato o oggetto di rinuncia volontaria.

Viene introdotto tramite il Regolamento di esecuzione (UE) 2019/947, dove nell'Allegato, Parte C risiedono i requisiti sostanziali che l'operatore deve dimostrare (UE, 2019).

Il quadro sin qui delineato ha trovato, nel febbraio 2026, un riscontro applicativo di particolare interesse, che conviene esaminare in quanto costituisce il primo caso documentato in Italia di autorizzazione al volo per un aeromobile agricolo eccedente i limiti dimensionali dello scenario semplificato PDRA-S01; non si tratta quindi dell'UAV DJI T50 impiegato in questa sperimentazione. L'ENAC ha rilasciato alla società Aermatica3D la prima autorizzazione operativa italiana per il DJI Agras T100 (descrizione tecnica al cap. 2.2), aeromobile che, misurato con bracci dispiegati ed eliche in rotazione, raggiunge circa 3,2 metri e si collocava pertanto, secondo la disciplina allora vigente, al di fuori del perimetro dello scenario. L'eccedenza ha precluso il ricorso alla procedura semplificata e ha imposto l'istruzione di una pratica dedicata, fondata su una dimostrazione di sicurezza puntuale relativa alla gestione di un mezzo di tale massa

ed energia cinetica; la società ha successivamente reso noto che l'autorizzazione è stata conseguita mediante valutazione del rischio condotta secondo la metodologia SORA, in forma generica e non vincolata al singolo appezzamento (Caccia, 2026).

Il precedente ha assunto, al momento del rilascio, un rilievo applicativo considerevole, in quanto ha evidenziato come l'accesso alle piattaforme di maggiore capacità restasse subordinato a un onere istruttorio di notevole peso amministrativo ed economico, estraneo a qualunque listino commerciale e da computarsi fra i costi di conformità. Tale configurazione descrive tuttavia una fase ormai conclusa: nel corso dell'estate 2026 l'Autorità nazionale è intervenuta proprio sul nodo dimensionale che quel caso aveva portato in evidenza, con un provvedimento che ne ha superato i presupposti e al quale occorre pertanto fare riferimento per l'inquadramento attuale delle operazioni agricole condotte con piattaforme heavy-lift.

In data 13 agosto 2026 l'ENAC ha infatti emesso, dandone pubblicità il giorno successivo, un mezzo alternativo di rispondenza (Alternative Means of Compliance, AltMoC) all'articolo 11 del Regolamento di esecuzione (UE) 2019/947, contraddistinto dalla sigla IT-UAS-2026-002 e destinato specificamente alle operazioni agricole, orticole e forestali (ENAC, 2026). Sul piano della natura giuridica, lo strumento non istituisce una nuova categoria operativa né introduce una deroga al regolamento europeo: esso individua una via alternativa per dimostrare la conformità al medesimo requisito, la cui ammissibilità è subordinata alla dimostrazione, gravante sull'Autorità nazionale, di un livello di rischio residuo equivalente a quello conseguibile mediante il mezzo di rispondenza ordinario.

All'AltMoC si accompagna una valutazione del rischio predefinita (Pre-Defined Risk Assessment), elaborata a partire dal PDRA-S01, intitolata Regole per condurre una valutazione del rischio operativo. Tale documento è strutturato quale lista di rispondenza: ciascuna voce associa all'argomento e alla condizione da soddisfare, il livello di garanzia richiesto ("autodichiarazione"), la corrispondente dimostrazione d'integrità (riferimenti all'OM) e garanzia (dichiarazione di conformità). L'Ente ne ha reso disponibili due versioni, in bianco e precompilata, accompagnate da un Manuale delle Operazioni (OM) predefinito e dalle istruzioni per l'utilizzo dei documenti precompilati (ENAC, 2026).

Il beneficio di maggior rilievo attiene all'ampliamento della soglia dimensionale ammessa. Mentre il PDRA-S01 circoscrive la propria applicabilità agli aeromobili con dimensione caratteristica non superiore a 3 m, parametro che nelle configurazioni multirottore coincide con la massima distanza fra le estremità dei rotori (tabella 2-1), la nuova valutazione predefinita eleva tale limite a 5 m. La portata pratica dell'intervento si apprezza appieno alla luce del caso appena richiamato: i circa 3,2 m del DJI Agras T100, che nel febbraio 2026 avevano imposto il ricorso

alla metodologia SORA, ricadono oggi entro un quadro di rischio predefinito. L'innalzamento della soglia consente all'operatore di sottrarsi all'onere di elaborare autonomamente la valutazione del rischio e, con essa, ai costi di consulenza specialistica e ai tempi di istruttoria che tale percorso comporta.

L'AltMoC presenta tuttavia anche due restrizioni riguardante l'operatività rispetto al PDRA-S01: la quota massima scende da 120 m a 20 m dal punto più vicino della superficie terrestre, ossia rispetto alla sommità dell'ostacolo naturale o artificiale sorvolato, e il contesto antropico ammesso si restringe dall'area a terra controllata in ambiente popolato a quella situata in ambiente scarsamente popolato.

2.1.2.1 PDRA S01: Il FTS (Flight Termination System) e il superamento dell'obbligo di paracadute

Per i droni che operano in Categoria Specifica, e in particolare per quelli destinati al rilascio di materiale, la normativa europea richiede la presenza a bordo di un dispositivo specifico: il FTS (Flight Termination System). La fonte dell'obbligo è la Parte 16 dell'Allegato al Regolamento delegato (UE) 2019/945, la quale, al punto (5), stabilisce che l'aeromobile debba fornire al pilota remoto un mezzo per interrompere il volo con tre caratteristiche precise (UE, 2019):

- a. deve essere affidabile, prevedibile e del tutto indipendente dal sistema di controllo automatico del drone, anche nelle modalità di attivazione;
- b. deve costringere il mezzo alla discesa, impedendogli qualunque spostamento orizzontale motorizzato;
- c. deve infine comprendere un dispositivo che riduca l'effetto dell'impatto al suolo, quest'ultimo requisito, nella pratica, è sempre stato assolto dal paracadute balistico.

L'installazione raggiunge le operazioni agricole in due scenari autorizzativi.

1. Nello scenario semplificato PDRA-S01, perché questo richiama i requisiti tecnici della Parte 16 pur senza esigere l'etichetta di classe C5.
2. Nel percorso autorizzativo fondato su valutazione SORA, necessario per le piattaforme che eccedono i limiti dello scenario, perché il terminatore di volo costituisce il mezzo con cui l'EASA consente di dimostrare il contenimento avanzato, ossia la garanzia che il drone, in caso di avaria, non esca dall'area operativa autorizzata (MOC Light-UAS.2511-01).

Per quanto riguarda il paracadute balistico, è intervenuta il 2 febbraio 2026, una modifica rilevante (ENAC, 2026a). L'ENAC ha stabilito che i droni privi di marcatura C5 operanti in PDRA-S01 non sono più tenuti a rispettare il solo punto 5(c): cade quindi l'obbligo del paracadute, mentre il terminatore di volo (le lettere a. e b. della norma) resta pienamente

obbligatorio. La ragione del provvedimento è di natura sostanziale: all'interno di un'Area a Terra Controllata, dove per definizione non sono presenti persone estranee all'operazione, il paracadute non riduce ulteriormente un rischio già azzerato, e imporlo a macchine che volano a pochi metri dalla coltura costituisce un onere sproporzionato. L'alleggerimento ha però un prezzo: i margini di sicurezza a terra vengono ampliati con la regola 1:1, per cui il buffer di rischio non può mai essere inferiore alla quota di volo, e l'operatore che si avvale dell'esenzione deve dichiararlo formalmente nel proprio Manuale delle Operazioni.

Il senso complessivo della riforma è chiaro: si passa da una logica di attenuazione delle conseguenze dell'impatto a una logica di prevenzione della fuoriuscita dal volume operativo. Un'ultima precisazione è opportuna: la norma non impone l'acquisto di alcun prodotto, ma un requisito di prestazione. Poiché tuttavia nessuna piattaforma agricola commerciale integra di base attualmente una funzione di terminazione con i caratteri di indipendenza richiesti, nella pratica l'operatore è tenuto a installare un dispositivo aggiuntivo dichiarato conforme al metodo di conformità europeo (EASA, 2022), dal valore all'incirca per i modelli DJI T50 e T100 di 2.000€.

2.1.3 Certificazione del pilota e adempimenti dell'operatore

In funzione della categoria la normativa richiede requisiti differenti:

- Le operazioni condotte in Categoria Specifica presuppongono un livello di qualificazione professionale sensibilmente superiore rispetto a quello richiesto per la Categoria Aperta. Il fondamento normativo di tale requisito risiede nell'articolo 8 del Regolamento di esecuzione (UE) 2019/947, il quale stabilisce che i piloti remoti operanti in tale categoria debbano soddisfare i requisiti di competenza definiti nell'autorizzazione operativa rilasciata dall'autorità competente, ovvero nello scenario standard dichiarato o nei termini di approvazione del LUC (UE, 2019).

Nell'ordinamento nazionale, le modalità attuative sono state definite dall'ENAC con le Linee Guida LG-2023/005-UAS, che hanno sostituito la precedente Nota Informativa NI-2021-013 (ENAC, 2023). Il percorso abilitante si articola in funzione dell'operazione:

- Quando l'intervento ricade interamente entro uno scenario standard, la qualificazione si compone di 4 elementi:
 1. il Certificato di Conoscenza Teorica di Pilota Remoto per gli scenari europei;

2. l'accreditamento conseguito mediante addestramento pratico condotto sullo specifico scenario impiegato, non essendo ammessa equipollenza fra scenari differenti;
 3. la frequenza del modulo in materia di Crew Resource Management, requisito di introduzione nazionale;
 4. dimostrazione della capacità di gestire le comunicazioni aeronautiche;
- Quando l'operazione ecceda tali limiti e richieda il rilascio di un'autorizzazione operativa, il quadro dei requisiti si amplia:
 1. base teorica costituita, indifferentemente, dal certificato OPEN A2 "Certificato di Competenza di Pilota Remoto" o da quello di conoscenza teorica per scenari standard.
 2. modulo di Crew Resource Management;
 3. dimostrazione della capacità di gestire le comunicazioni aeronautiche;
 4. addestramento teorico e pratico integrativo, il cui contenuto discende dalle risultanze della valutazione del rischio;
 5. moduli addestrativi ulteriori, ove ricorrano condizioni operative particolari.
 - Per l'operatore che intenda impiegare direttamente un drone, ad esempio per il monitoraggio dei campi tramite camere RGB o sensori multispettrali, in categoria aperta, oltre all'acquistare il mezzo, deve conseguire l'attestato di superamento dell'esame teorico online "Prova di completamento della formazione online" che abilita al pilotaggio di droni fino a 25 kg nelle sottocategorie A1 e A3 della; l'esame può essere preparato tramite una scuola di volo riconosciuta da ENAC oppure in autonomia, come privatista.

Oltre i requisiti specifici per tipo di categoria è necessario far fronte anche a quelli generici ma comunque obbligatori, come:

1. la stipula di un'assicurazione specificamente dedicata all'attività di volo
2. prima di prendere il volo occorre registrarsi sul portale d-flight in qualità di operatore UAS e inserire il drone acquistato nella propria "flotta", distinguendo la figura dell'operatore da quella del pilota. A seguito della registrazione, d-flight genera un codice QR identificativo dell'operatore, da stampare e applicare al

mezzo alla stregua di una targa, così da consentirne sempre la riconducibilità al proprietario in caso di smarrimento o sinistro.

Il portale d-flight è stato sviluppato dall'omonima società del Gruppo ENAV in collaborazione con l'ENAC quale punto di accesso unico agli adempimenti amministrativi connessi all'impiego degli UAS sul territorio nazionale.

Sul piano funzionale, la piattaforma fornisce un insieme di servizi di varie tipologie:

- La registrazione e identificazione, che assolve agli obblighi di immatricolazione dell'operatore e di marcatura dei mezzi;
- La geo-consapevolezza, che consente la consultazione interattiva delle mappe aeronautiche recanti la rappresentazione georeferenziata delle aree soggette a divieto o a limitazione, nonché delle riserve temporanee di spazio aereo;
- La pianificazione, che supporta la programmazione della missione in funzione dei vincoli geografici statici e dinamici, delle occupazioni di spazio aereo già dichiarate da altri operatori e delle previsioni meteorologiche, verificando la conformità del profilo di volo alle norme applicabili nella zona interessata;
- Il monitoraggio in tempo reale dei mezzi cooperativi in volo, con notifica automatica all'operatore in caso di non conformità;
- L'auto-separazione, funzione di ausilio al mantenimento della distanza di sicurezza rispetto ad altri aeromobili, a ostacoli fissi e mobili e alle aree interdette (geo-fence);
- L'archiviazione e riproduzione differita (recording and playback) delle attività di volo, che costituisce per l'operatore e per le autorità di vigilanza un archivio permanente delle operazioni condotte;

Tutti gli attestati teorici precedentemente menzionati presentano un periodo di validità quinquennale. Per contro, le attestazioni relative al superamento delle valutazioni di competenza pratica non sono soggette a scadenza temporale e mantengono la propria efficacia a tempo indeterminato.

gli attestati rilasciati successivamente al 31 dicembre 2020 da una qualsiasi autorità nazionale soggetta alla regolamentazione EASA sono automaticamente riconosciuti da tutti gli altri paesi della comunità europea (ENAC, 2023).

Infine, durante le procedure burocratiche per iniziare a operare tramite gli UAV è importante distinguere, sul piano delle responsabilità, la figura dell'operatore UAS da quella del pilota remoto, ancorché nella pratica le due figure coincidano non di rado nello stesso soggetto:

- L'operatore è il soggetto responsabile delle operazioni condotte e degli eventuali danni che ne conseguono, inclusi quelli arrecati a terzi, nonché verso il committente, ad esempio l'azienda agricola che ne ha richiesto il servizio, dei dati aziendali eventualmente raccolti nel corso delle attività di monitoraggio e diagnostica preventiva;
- Il pilota remoto è personalmente responsabile della condotta sicura del volo.

2.1.4 L'irrorazione degli agrofarmaci tramite UAS

Se il quadro sin qui descritto disciplina, in termini generali, l'esercizio aeronautico degli UAS, un ulteriore e più restrittivo livello normativo si sovrappone nel momento in cui il drone venga impiegato per la distribuzione di prodotti fitosanitari. Si tratta di un ambito nel quale, a differenza di quanto si vedrà per la concimazione, permangono tuttora rilevanti criticità e incertezze regolatorie, tali da rendere, allo stato attuale, l'irrorazione aerea con drone un'attività fortemente limitata sul territorio nazionale.

L'articolo 9 della Direttiva 2009/128/CE sull'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari, recepito in Italia dall'articolo 13 del D.lgs. 150/2012 e ribadito dal Piano di Azione Nazionale per l'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari (PAN), vieta come regola generale l'irrorazione di prodotti fitosanitari tramite mezzi aerei, indipendentemente dalla natura convenzionale o biologica del prodotto impiegato (Decreto Legislativo n. 150., 2012). La concessione di deroghe a tale divieto è riservata alle Regioni e alle Province Autonome, previo parere favorevole dei Ministeri competenti, ed è ammessa solo in situazioni specifiche, laddove l'impiego di tecniche terrestri alternative non sia tecnicamente attuabile, oppure qualora la distribuzione aerea consenta di conseguire un profilo di rischio nettamente inferiore per la popolazione e la salvaguardia degli ecosistemi. Le operazioni in questo ambito devono rispettare condizioni di massima sicurezza rispetto al rischio di deriva (drift) delle sostanze impiegate e ai conseguenti rischi per la salute pubblica e per l'ambiente.

Va infine precisato come il divieto riguardi specificamente l'irrorazione aerea di agrofarmaci (MIPAAF et al., 2014).

L'ultimo aggiornamento per quanto riguarda la distribuzione degli agrofarmaci, è stato regolamentato tramite l'articolo 6 della Legge 2 dicembre 2025, n. 182, con il quale viene inserito l'articolo 13-bis all'interno del D.lgs. n.150 del 2012 (Legge n. 182, 2025). Quest'ultimo ammette

l'irrorazione aerea condotta mediante UAS, come definiti dal Regolamento di Esecuzione (UE) 2019/947, "in deroga alle norme vigenti e in via sperimentale", per un periodo di tre anni decorrente dall'entrata in vigore della disposizione e limitatamente ai terreni qualificati come agricoli dai vigenti strumenti urbanistici. L'elemento di maggiore significato risiede bensì nell'ampliamento della platea dei soggetti legittimati: una facoltà in precedenza circoscritta ai centri di saggio e agli enti di ricerca viene estesa alla generalità degli operatori agricoli che ne soddisfino i requisiti.

I soggetti interessati all'irrorazione di carattere sperimentale devono procedere depositando una SCIA (Segnalazione Certificata di Inizio Attività) al Servizio Fitosanitario Regionale competente, eventualmente inoltrata tramite enti associativi. La segnalazione deve definire l'arco temporale delle attività ed essere affiancata da una relazione agronomica asseverata che attesti la piena rispondenza alle prescrizioni normative. Spetta successivamente alle autorità fitosanitarie territoriali svolgere le necessarie attività di controllo e monitoraggio per garantire che l'esecuzione dei trattamenti rispetti rigorosamente quanto dichiarato.

L'effettiva operatività della norma resta tuttavia subordinata all'emanazione di un decreto interministeriale attuativo, di competenza del Ministero dell'Agricoltura, della Sovranità Alimentare e delle Foreste (MASAF, capofila), da adottarsi d'intesa con il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e il Ministero della Salute, con ENAC quale autorità tecnica per la regolazione dello spazio aereo. Il decreto, era atteso entro 90 giorni dall'entrata in vigore della legge, termine individuato nel 18 marzo 2026, dovrà definire le tipologie di terreni e colture ammesse alla sperimentazione, gli organismi nocivi bersaglio, i prodotti fitosanitari utilizzabili, le modalità operative, da comunicare preventivamente al Servizio fitosanitario regionale competente, nonché i requisiti di formazione degli operatori, chiamati a possedere competenze sia aeronautiche, secondo la disciplina ENAC, sia fitosanitarie (Legge n. 182, 2025).

Alla data di redazione della presente tesi il decreto attuativo non risulta ancora pubblicato, per cui fino alla sua pubblicazione, la distribuzione aerea di prodotti fitosanitari tramite drone rimane pertanto di fatto preclusa alla generalità degli operatori agricoli.

2.1.4.1 Le sperimentazioni regionali: il caso della Lombardia

Nelle more della definizione di un quadro normativo nazionale organico, alcune Regioni hanno condotto, anche tramite l'ausilio delle università, in regime di deroga, sperimentazioni finalizzate a dimostrare l'efficacia e i vantaggi derivanti dall'impiego dei droni in campo agricolo. A partire dal 2022, il territorio italiano ha visto l'avvio di 23 progetti sperimentali a carattere regionale (distribuiti tra Piemonte, Lombardia, Veneto, Emilia-Romagna e Toscana) dedicati

all’irrorazione aerea tramite UAS. Le prove di campo si sono focalizzate prevalentemente su colture ad alto valore aggiunto (vite e olivo), orticole, risaie e contesti orografici complessi, quali i vigneti terrazzati (aretè, 2026).

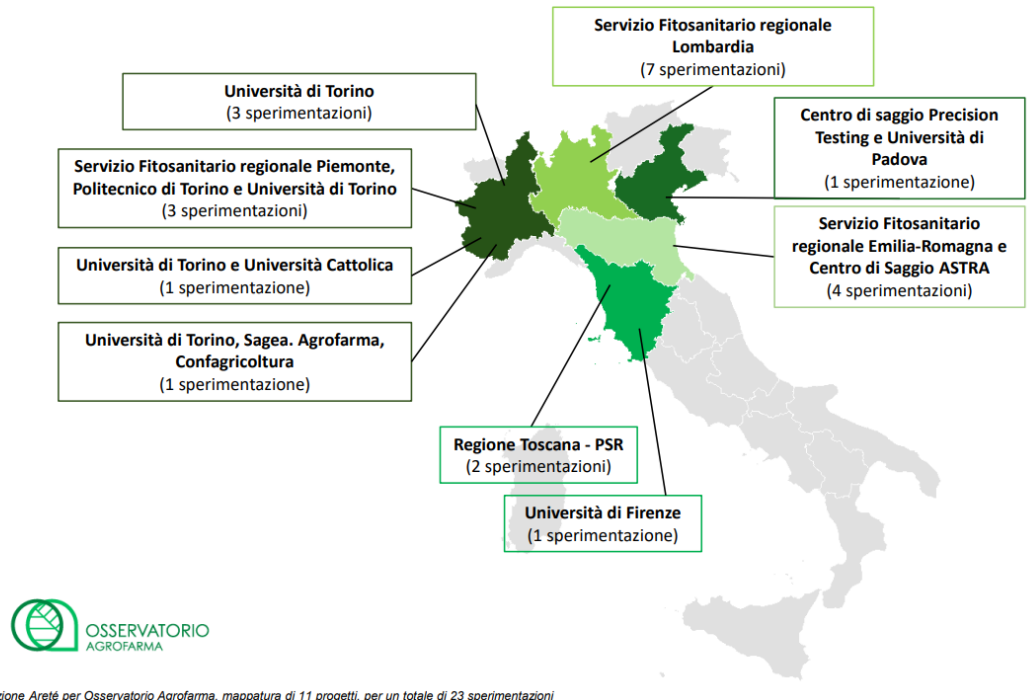


Figura 2-1: mappa delle sperimentazioni in Italia (aretè, 2026)

Culture studiate	Regione	Efficacia agronomica	Comportamento ambientale	MRL
Vite	Piemonte	ottimale	generalmente positivo	ottimale
	Lombardia	inferiore al convenzionale	ottimale	ottimale
	Emilia-Romagna	ottimale	ottimale	ottimale
	Toscana	n.d.	generalmente positivo	n.d.
Mais	Piemonte	ottimale	ottimale	ottimale
Olivo	Lombardia	ottimale	ottimale	ottimale
	Toscana	n.d.	inferiore al convenzionale	n.d.
Riso	Lombardia	ottimale	ottimale	ottimale
	Toscana	n.d.	ottimale	n.d.
Cipolla	Emilia-Romagna	n.d.	generalmente positivo	ottimale
Pomodoro	Emilia-Romagna	n.d.	generalmente positivo	ottimale
Basilico	Veneto	ottimale	ottimale	generalmente positivo



Nel complesso, le sperimentazioni hanno fornito riscontri positivi sulla validità della tecnologia, evidenziandone l’efficacia agronomica, il buon comportamento ambientale e livelli di residui generalmente inferiori ai limiti.

Elaborazione Aretè per Osservatorio Agrofarma, sui risultati disponibili delle ultime sperimentazioni

Figura 2-2: Alcuni principali esiti dei progetti di sperimentazione in Italia (aretè, 2026)

Nel biennio 2022-2023, in particolare, il Servizio Fitosanitario della Regione Lombardia ha condotto attività sperimentali tramite sistemi aerei a pilotaggio remoto per valutarne l'efficacia nella difesa delle colture di olivo, vite e riso. I progetti, autorizzati dal Ministero della Salute si proponevano di valutare l'impiego dei droni in contesti caratterizzati da scarsa accessibilità per persone e mezzi, di verificarne la precisione distributiva e l'efficacia dell'intervento, di confrontarne i costi ad ettaro con quelli dei trattamenti convenzionali e di quantificare l'ammontare dei residui dei prodotti distribuiti. I risultati, pubblicati nelle relazioni finali relative alle due annualità di sperimentazione sono descritti dal Servizio Fitosanitario regionale come incoraggianti, in particolare per quanto riguarda la tutela dell'incolumità degli operatori e la qualità della distribuzione dei prodotti, con una deriva giudicata trascurabile (Regione Lombardia, 2022, 2023).

2.1.5 Distribuzione dei fertilizzanti vs degli agrofarmaci

Alla luce di quanto sin qui esposto, appare opportuno rendere esplicita una distinzione di sostanziale rilevanza per l'inquadramento metodologico della presente tesi. Sul piano strettamente aeronautico, la normativa EASA/ENAC non opera alcuna differenziazione tra la distribuzione di fertilizzanti e quella di prodotti fitosanitari: entrambe le attività comportano il rilascio di materiale dall'alto e ricadono pertanto, allo stesso modo, in Categoria Specifica, con i medesimi percorsi autorizzativi descritti al capitolo 2.1.2.

La concimazione, come quella a rateo variabile tramite UAS, oggetto specifico della presente ricerca, non è invece soggetta ad ulteriore livello di restrizione, di natura sanitaria e ambientale: il quadro autorizzativo cui essa deve conformarsi è, in altri termini, quello aeronautico generale descritto al capitolo 2.1.

Tale circostanza contribuisce a spiegare perché, allo stato attuale della normativa, la distribuzione di fertilizzanti rappresenti una delle applicazioni UAV più immediatamente praticabili nel comparto agricolo italiano, e giustifica, sul piano metodologico, la scelta di concentrare la presente sperimentazione sulla concimazione ureica piuttosto che sulla distribuzione di prodotti fitosanitari. Oltre la distribuzione di biostimolanti, fertilizzanti fogliari e microelementi, è possibile il lancio aereo di ausiliari per la lotta biologica e la semina di colture di copertura.

2.1.6 Le conseguenze della non conformità: casi recenti di volo abusivo

Il quadro regolamentare illustrato precedentemente non costituisce un mero adempimento formale, bensì un sistema di garanzie la cui violazione genera conseguenze concrete, tanto sul piano della sicurezza del volo quanto su quello della sostenibilità economica del comparto. La

cronaca più recente offre, a tale proposito, riscontri significativi circa la persistenza di prassi non conformi nell'impiego di droni per operazioni agricole in Italia.

Il caso di Cuneo-Levaldigi (aprile 2026). Il 16 aprile, presso l'aeroporto di Cuneo-Levaldigi (CN), le autorità hanno intercettato un quadricottero DJI Agras di circa 32 kg, condotto da un imprenditore agricolo cinquantacinquenne intento a distribuire erbicidi su un proprio appezzamento situato in prossimità del sedime aeroportuale. Il pilota risultava sprovvisto di attestato di volo, di autorizzazione operativa e della polizza assicurativa obbligatoria. La presenza del mezzo, rilevato a un'altitudine di 30-40 metri a ridosso della recinzione aeroportuale, ha reso necessaria l'interruzione delle operazioni di volo dello scalo per oltre sessanta minuti. Il drone è stato quindi sottoposto a sequestro e il responsabile deferito alla Procura della Repubblica di Cuneo per violazione del Codice della Navigazione, con contestuale avvio, da parte di ENAC, del procedimento sanzionatorio amministrativo per la mancanza dei titoli abilitativi richiesti (Scarato, 2026).

Il fenomeno non si limita al singolo episodio. Secondo l'Unione Nazionale Contoterzisti Agromeccanici e Industriali (UNCAI), il numero di piloti che effettuano trattamenti senza il possesso della certificazione in Categoria Specifica, senza assicurazione e senza formazione adeguata risulterebbe in crescita. Per il presidente dell'associazione, casi come quello di Levaldigi espongono l'intero comparto al rischio di rallentamenti nell'iter istituzionale in corso per la definizione dei decreti e delle sperimentazioni normative di settore (Scarato, 2026)

2.2 Specifiche tecniche degli UAV

Dopo aver descritto, nei paragrafi precedenti, il quadro normativo entro cui si colloca l'impiego professionale degli UAV in agricoltura, risulta opportuno esaminare la dimensione più propriamente tecnologica del fenomeno, ovvero le caratteristiche costruttive e prestazionali delle piattaforme attualmente disponibili sul mercato per la distribuzione a rateo variabile. Tale analisi risulta preliminare rispetto alla descrizione della sperimentazione condotta (cap. 3), in quanto consente di collocare il mezzo impiegato, il DJI Agras T50, all'interno di un panorama tecnologico più ampio, di cui condivide l'impostazione costruttiva generale.

Sul piano configurazionale, la quasi totalità delle piattaforme professionali destinate alla distribuzione a rateo variabile adotta la configurazione multirottore, a differenza di quella ad ala fissa. Tale scelta costruttiva deriva dalla necessità di garantire un carico utile elevato unitamente alla capacità di sorvolo stazionario (hovering) e a una manovrabilità a bassa quota indispensabile per l'accuratezza dell'applicazione, requisiti ai quali la configurazione ad ala fissa, più efficiente

sotto il profilo aerodinamico ma prevalentemente impiegata per le missioni di telerilevamento (cap. 1.5.1.5), risulta strutturalmente meno idonea.

Il mercato mondiale delle piattaforme UAV per la distribuzione agricola presenta un grado di concentrazione elevato, essendo dominato da due produttori di origine cinese, DJI, XAG (Belton et al., 2026). Le due aziende competono a livello industriale, spingendosi ogni anno a migliorare le caratteristiche dei prodotti progettati, arrivando a commercializzare le ultime novità, per quanto riguarda i droni specifici per la distribuzione di input agronomici: il T100 di DJI e il P150 MAX di XAG.

Tabella 2-2: Confronto tecnico fra il T50 e le piattaforme UAV di fascia alta DJI Agras T100 e XAG P150 Max (DJI agriculture, 2025; XAG, 2025;).

PARAMETRO	DJI AGRAS T50	DJI AGRAS T100	XAG P150 MAX
Configurazione rotori	8 eliche (4 rotori coassiali)	8 coppie di eliche (4 rotori coassiali)	4 coppie di eliche (4 motori)
Interasse diagonale	2.200 mm	2.330 mm	2.335 mm
Materiale eliche	Composito nylon-fibra di carbonio	Composito in fibra di carbonio	Composito in fibra di carbonio
Peso a vuoto	39,9 kg (52 kg con batteria)	75 kg	56 kg
Peso massimo al decollo	92 kg (irrorazione); 103 kg (spandimento)	175 kg (irrorazione, 2 ugelli); 175 kg (spandimento)	136 kg (irrorazione); 140 kg (spandimento)
Velocità massima	10 m/s	20 m/s	20 m/s
Raggio/distanza massima di volo	2 km	2 km	2 km
Precisione di hovering, RTK attivo	±10 cm (orizz.) / ±10 cm (vert.)	±10 cm (orizz.) / ±10 cm (vert.)	±10 cm (orizz.) / ±10 cm (vert.)
Precisione di hovering, RTK non attivo	±0,6 m (orizz.) / ±0,3 m (vert.)	±0,6 m (orizz.) / ±0,3 m (vert.)	±0,6 m (orizz.) / ±0,3 m (vert.)
Denominazione sistema	T50 Spreading System	Spreading System 4.0	XAG RevoCast 5
Capacità tramoggia	75 L	150 L	115 L
Carico utile massimo	50 kg	100 kg	80 kg

PARAMETRO	DJI AGRAS T50	DJI AGRAS T100	XAG P150 MAX
Organo dosatore	Bocchetta di scarico a gravità	Coclea	Coclea
Organo distributore	Disco centrifugo	Disco centrifugo	Disco centrifugo
Portata massima di scarico	108 kg/min	400 kg/min	300 kg/min
Granulometria compatibile	0,5-5 mm	0,5-10 mm	1-10 mm
Larghezza effettiva di spandimento	5-8 m	3-10 m	5-9 m
Denominazione sistema di irrorazione	T50 Spray System	LS100	XAG RevoSpray 5
Capacità serbatoio	40 L	100 L	80 L
Ugelli	2 di serie / 4 opzionali	2 di serie / 4 opzionali	2 di serie / 4 opzionali
Dimensione goccia	50-500 µm	50-500 µm	60-500 µm
Portata massima	16 L/min (2 ugelli); 24 L/min (4 ugelli)	30 L/min (2 ugelli); 40 L/min (4 ugelli)	32 L/min (2 ugelli); 46 L/min (4 ugelli)
Tipo di pompa	girante, trascinamento magnetico (n. 2)	girante, trascinamento magnetico (n. 2)	girante flessibile (n. 2)
Larghezza effettiva di irrorazione	4-11 m	5-13 m	5-10 m
Sensoristica	Radar ad array di fase anteriore e posteriore (1-50 m) + due coppie di sensori a visione binoculare (0,5-29 m) + camera FPV;	LiDAR + radar a onde millimetriche + sistema quadri-visione + camera FPV	Radar 4D imaging (24 GHz) + camera FPV
Velocità max. con anticollisione attiva	≤10 m/s	≤13,8 m/s	≤13,8 m/s
Distanza di sicurezza post-frenata	2,5 m	2,5 m	2,5 m
Modulo GNSS/RTK	Ricevitore multi-costellazione a doppia	D-RTK 3 AG: GPS L1/L2/L5, BeiDou,	XRTK7 Mobile Station

PARAMETRO	DJI AGRAS T50	DJI AGRAS T100	XAG P150 MAX
Batteria	frequenza (GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo, QZSS) con correzione RTK	Galileo, GLONASS, QZSS, L-BAND	
	1 unità DB1560: 30.000 mAh; 52,22 V; 12,1 kg	1 unità DB2160: 41.000 mAh; 52 V; 14,7 ±0,3 kg	2 unità B141050: 20.000 mAh; 52,5 V; 14,2 kg
Ricarica rapida	9-12 min	8-9 min	7-12 min

Un ulteriore elemento distintivo del comparto è rappresentato dalla rapidità del ciclo di rinnovo dell'offerta commerciale, proponendo modelli sempre più efficienti e sicuri allo stesso tempo. Le due piattaforme di fascia alta descritte precedentemente, sono state immesse sul mercato a distanza di circa quindici mesi dai rispettivi modelli precedenti: il DJI Agras T100 è stato oggetto di lancio globale nel luglio 2025, a fronte della commercializzazione internazionale del T50 nell'aprile 2024, mentre lo XAG P150 Max è stato presentato nel novembre 2025, a circa un due anni di distanza dal P100. Si osserva inoltre una progressiva riduzione dello sfasamento temporale fra il lancio sui mercati asiatici e la disponibilità effettiva in ambito europeo, passato dai circa diciotto mesi della generazione T40 ai quattro mesi della generazione T100. Tale accelerazione, se da un lato testimonia la maturazione industriale del segmento, dall'altro determina una crescente asimmetria rispetto ai tempi di adeguamento del quadro regolatorio nazionale ed europeo, con conseguenti incertezze in ordine alla conformità dei mezzi di più recente introduzione.

DJI, casa madre del modello T50 utilizzato nella presente sperimentazione, dichiara a metà 2026 tramite il report annuale, che al 31/12/2025, questa possieda una base installata superiore a 600.000 unità, distribuite in oltre 100 paesi e utilizzate su più di 300 specie coltivate, con applicazioni comprendenti la difesa fitosanitaria, lo spandimento, la semina e il monitoraggio culturale. Inoltre presenta un ecosistema di supporto costituito da più di 3.500 centri di assistenza e riparazione, oltre 7.000 istruttori certificati e più di 600.000 piloti certificati (DJI agriculture, 2026).

Accanto ai due operatori dominanti, il settore annovera anche produttori di rilievo regionale, quali il giapponese Yamaha Motor e lo statunitense Hyllo, sebbene con quote di mercato inferiori rispetto ai colossi precedentemente citati.

Capitolo 3

MATERIALI E METODI

3.1 Descrizione aziendale

L'azienda agricola Fiorentini Vito e Giacomo ha sede in Falconara Marittima, è a conduzione familiare e sono proprietari di circa 40 ettari situati nei comuni della provincia di Ancona.

L'azienda è ad indirizzo cerealicolo-oleaginose, infatti la maggior parte dei terreni sono destinati a frumento duro, avena e girasole alto oleico. Nell'azienda troviamo trattori cingolati e gommati usati prevalentemente per la gestione del suolo, semina e concimazione, mentre per la difesa delle colture fanno uso di terzisti con barre da 21 metri.

3.2 Descrizione del sito sperimentale

Il campo analizzato in questa tesi di laurea si trova nel comune di Ancona (AN) precisamente in via Strada del Barcaglione 215/B, ha un'estensione pari a 8,8550 ettari con una pendenza pari a 86 m, il quale rappresenta buona parte dei seminativi marchigiani



Figura 3-1: Immagine satellitare della posizione del sito sperimentale

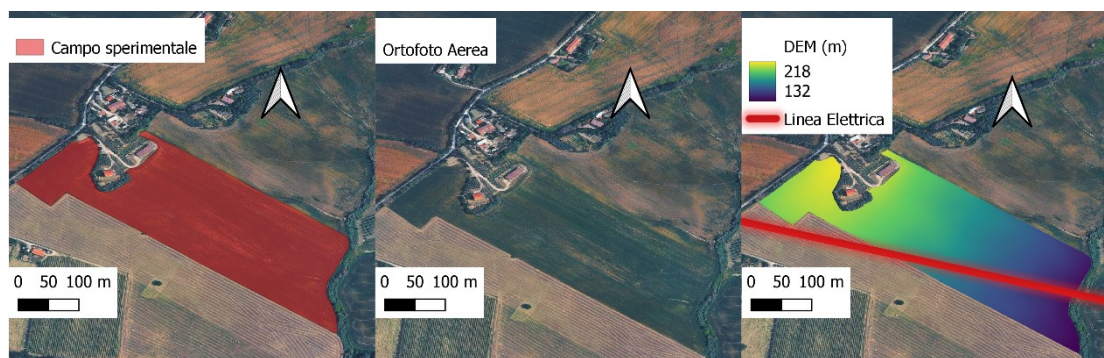


Figura 3-2: Delineazione del sito sperimentale, analisi della sua pendenza-giacitura e relativa posizione della linea elettrica.

3.3 Gestione agronomica

Negli ultimi tre anni il campo è stato avvicendato:

- Annata 2025-2026: Avena
- Annata 2024-2025: Frumento duro
- Annata 2023-2024: Girasole

Nelle tabelle successive si elencano le principali lavorazioni, con indicazione dello stadio fenologico in cui sono state effettuate, per la coltivazione dell'avena, frumento duro e girasole.

Tabella 3-1: Gestione agronomica dell'avena

GESTIONE AGRONOMICA AVENA	
lavorazioni	stadio fenologico
Semina combinata con erpice rotante	Suolo nudo
Fertilizzazione azotata	Accestimento
Trattamenti chimico contro graminacee, dicotiledoni e parassiti fungini	Levata
Raccolta con mietitrebbia	Maturazione fisiologica
Aratura 25cm	Residui colturali
Erpicatura	Suolo nudo

Tabella 3-2: Gestione agronomica frumento duro

GESTIONE AGRONOMICA FRUMENTO DURO	
lavorazioni	stadio fenologico
Semina combinata con erpice rotante	Suolo nudo
Prima fertilizzazione azotata	Accestimento
Trattamenti chimico contro graminacee, dicotiledoni e parassiti fungini	Levata
Seconda fertilizzazione azotata	Botticella-spigatura
Raccolta con mietitrebbia	Maturazione fisiologica
Aratura 25cm	Residui colturali
Erpicatura	Suolo nudo

Tabella 3-3: Gestione agronomica girasole

GESTIONE AGRONOMICA GIRASOLE	
lavorazioni	stadio fenologico
Erpicatura leggera	Suolo nudo
Semina girasole	Suolo nudo
Trattamento chimico contro graminacee e dicotiledoni	3/4 foglie
Fertilizzazione azotata	5/6 foglie
Raccolta con mietitrebbia	Maturazione fisiologica
Erpicatura a dischi e/o ripuntatura	Residui colturali

3.4 Caratteristiche della concimazione

3.4.1 Con trattore

Per svolgere la concimazione del frumento duro nell'annata 2024-2025, l'azienda ha scelto di avvalersi di un terzista il quale era dotato di un John Deere 6R 175 attaccato con una concimatrice Kuhn MDS .2 con larghezza di operazione di 24 m e una larghezza delle ruote di 80 cm (anteriori e posteriori).



Figura 3-3: John Deere 6R 175



Figura 3-4: Kuhn MDS .2

3.4.2 Con drone

Per svolgere la concimazione dell'avena, l'azienda ha deciso di collaborare con la presente sperimentazione, effettuando la distribuzione di concime ureico, YaraVera EURA 46, con l'UAV della DJI T50.

3.4.2.1 Caratteristiche del T50

Il mezzo impiegato nella presente sperimentazione, si colloca nella fascia professionale delle piattaforme multirotore per la distribuzione di input agronomici descritta al capitolo 2.2, di cui condivide l'impostazione costruttiva generale. L'architettura è di tipo quadrirotore a rotori coassiali, con otto eliche in composito nylon-fibra di carbonio disposte a coppie sovrapposte sui quattro bracci ripiegabili, per una potenza di 4.000 W per rotore e un interasse diagonale di 2.200 mm. La massa a vuoto è pari a 39,9 kg, che salgono a 52 kg con la batteria installata, a fronte di una massa massima al decollo in configurazione di spandimento di 103 kg al livello del mare (DJI agriculture, 2025).

L'organo di lavoro impiegato per la concimazione è il *T50 Spreading System*, un modulo intercambiabile con il serbatoio per l'irrorazione liquida. Esso è costituito da una tramoggia della capacità di 75 litri, corrispondente a un carico utile massimo di 50 kg, ed è compatibile con materiali granulari asciutti di diametro compreso fra 0,5 e 5 mm. Il dosaggio del prodotto avviene per gravità attraverso una bocchetta di scarico a rilascio rapido, disponibile in due sezioni di passaggio intercambiabili: quella maggiore è destinata alle applicazioni ad elevato rateo, mentre quella minore consente di migliorare l'accuratezza dosimetrica alle basse portate. L'apertura del dosatore varia in maniera intelligente, in base alla tipologia di prodotto da distribuire e alla portata che si imposta prima che inizi l'operazione. La bocchetta di scarico si apre e si chiude inoltre in

modo automatico in corrispondenza dell'ingresso e dell'uscita dalle linee di lavoro, limitando le sovrapposizioni in capezzagna che, nella distribuzione con mezzo terrestre, costituiscono una delle principali fonti di eccesso localizzato di azoto.

La distribuzione trasversale è invece affidata a un disco centrifugo a canali elicoidali, la cui velocità di rotazione è regolabile dall'operatore e determina, congiuntamente alla granulometria del prodotto e alla quota di volo, l'ampiezza della fascia di lavoro. Il sistema raggiunge una portata massima di scarico di 108 kg/min e una larghezza di spandimento nominale di 8 m, benché il costruttore raccomandi di calibrare i parametri in modo da ottenere una fascia compresa fra 5 e 8 m. Deflettori posti in prossimità del disco impediscono la risalita dei granuli verso i piani rotorici, prevenendone il danneggiamento.

Sotto il profilo del controllo del rateo, il modulo integra una centralina dedicata che opera in retroazione con i sensori di peso installati a bordo del velivolo, consentendo il monitoraggio in tempo reale della massa residua in tramoggia. Tale architettura assolve a una duplice funzione: da un lato migliora l'accuratezza del rateo effettivamente erogato rispetto a quello impostato, dall'altro genera l'allarme di tramoggia vuota, evitando la prosecuzione del volo in assenza di distribuzione (DJI agriculture, 2025).

Il posizionamento è affidato a un ricevitore GNSS multi costellazione (GPS, GLONASS...) operante in doppia frequenza, integrato da correzione RTK. L'accuratezza di stazionamento passa da ± 60 cm sul piano orizzontale e ± 30 cm su quello verticale in assenza di correzione differenziale a ± 10 cm su entrambi i piani con RTK attivo. Tale differenza assume rilevanza diretta ai fini della qualità della concimazione: la ripetibilità delle traiettorie parallele condiziona infatti l'entità della sovrapposizione fra passate contigue e, di conseguenza, il coefficiente di variazione della distribuzione trasversale risultante.

Il velivolo è equipaggiato con due radar ad array di fase, anteriore e posteriore, che assicurano il rilevamento ostacoli multidirezionale su 360° entro un raggio compreso fra 1 e 50 m, con distanza di sicurezza post-frenata di 2,5 m, e due coppie di sensori a visione binoculare operanti fra 0,5 e 29 m. La funzione di inseguimento del terreno consente il mantenimento della quota impostata rispetto alla superficie coltivata su pendenze fino a 50° , entro un intervallo di stabilizzazione compreso fra 1,5 e 30 m (DJI agriculture, 2025). Tale dotazione riveste importanza particolare nel sito sperimentale oggetto della presente indagine, caratterizzato sia da una giacitura non pianeggiante (figura 3-2) sia dalla presenza di una linea elettrica aerea: il mantenimento di una quota costante rispetto alla coltura costituisce infatti, come si vedrà, uno dei fattori determinanti dell'ampiezza della fascia utile e dell'uniformità di deposizione.

L'alimentazione è garantita da una batteria intelligente DB1560, di capacità pari a 30.000 mAh e tensione nominale di 52,22 V, con una massa di circa 12,1 kg; il tempo di ricarica completa mediante alimentatore dedicato (C10000) o gruppo elettrogeno multifunzione è compreso fra 9 e 12 minuti, il tutto reso possibile anche grazie anche al dissipatore d'aria, fondamentale in quanto la batteria è sottoposta a sollecitazioni termiche, derivanti sia dalla scarica ad alto regime durante il volo a pieno carico, sia dalla successiva ricarica rapida. Poiché la temperatura della cella condiziona la corrente di carica ammissibile, l'alternanza fra volo e ricarica risulterebbe rallentata in assenza di un dissipatore dedicato (figura 3-3). Il dissipatore ad aria svolge tale funzione mediante un flusso d'aria forzato sulla superficie della batteria, che la riporta alla temperatura ottimale per la ricarica; la sua struttura è realizzata mediante stampaggio a iniezione in un unico corpo, soluzione che ne accresce la robustezza, elimina la necessità di assemblaggio preliminare e riduce il rischio di danneggiamento della batteria per effetto delle sollecitazioni meccaniche durante il trasporto. L'alimentazione è fornita dal gruppo elettrogeno mediante un canale di uscita dedicato a 12 V e 6 A, corrispondenti a una potenza assorbita di circa 72 W, trascurabile rispetto ai 9.000 W impegnati dalla ricarica.

Il dispositivo va pertanto inteso come elemento funzionale alla continuità operativa: la sua assenza non impedisce la ricarica, ma ne dilata i tempi nelle condizioni termiche più sfavorevoli, incidendo direttamente sulla capacità di lavoro effettiva della piattaforma.

L'alternanza fra ciclo di ricarica e ciclo di ricarico della tramoggia rappresenta, come si discuterà al capitolo 5, il principale fattore limitante della capacità di lavoro effettiva della piattaforma (DJI agriculture, 2025).

Il T50 supporta infine l'esecuzione di missioni a rateo variabile mediante importazione di Mappe di Prescrizione in formato vettoriale, generabili a partire dai rilievi multispettrali acquisiti in questo lavoro tramite il DJI Mavic 3M descritto al paragrafo 3.5 ed elaborate attraverso gli indici di vegetazione trattati al capitolo 1.5.1.2. Il principio di funzionamento di tali sistemi, fondato sulla modulazione in tempo reale della portata dell'organo dosatore in funzione della posizione georeferenziata del velivolo all'interno delle zone di prescrizione, è stato formalizzato e validato sperimentalmente per gli spandiconcime granulari montati su UAV (Guan et al., 2025).



Figura 3-3: DJI T50 con batterie e caricatore

3.4.2.2 Piano di distribuzione

Di seguito si riportano le operazioni svolte, da un singolo operatore, al fine di perseguire correttamente la distribuzione del prodotto EURA 46 di YaraVera:

1. Taratura → è stata la prima operazione svolta, in quanto il sistema per operare correttamente deve avere in database le caratteristiche fisiche del materiale (dimensione, densità, omogeneità, peso...) così da andare a determinare il flusso di distribuzione, che corrisponde nel caso dell'EURA 46 di YaraVera a 107.3 Kg/min.
2. Disegno tramite il radiocomando dell'area interessata dall'attività.
3. Impostazione del piano di volo → l'attività è stata eseguita su un appezzamento di 9,2 ha. La superficie interessata dalla concimazione risulta differente rispetto alla reale estensione dell'appezzamento (9,2 ha), come si può vedere nella figura 3-4, la lingua esterna dell'area non è stata concimata come anche la porzione limitrofa alla base della struttura della linea elettrica. Questo ha portato ad un ridimensionamento della superficie pari a 8,8550 ha, a cui verranno distribuiti 1771 kg di prodotto, in modo tale da rispettare un rateo pari a 200 kg/ha.

La scelta di applicare questa dose ad ettaro è stata condizionata da uno studio dove viene mostrato che sull'urea il CV (coefficiente di variazione) migliora sensibilmente al crescere della dose, passando dal 38,07% a 45 kg/ha al 14,04% a 135 kg/ha (Xunwei et al., 2024). La dose applicata di 200 kg/ha si colloca al di sopra del massimo da loro testato, il che gioca a favore dell'uniformità della prova sperimentale.

Le traiettorie dell'UAV sono state impostate parallele alla linea di massima pendenza (assetto a ritocchino), questo ha beneficio di una distribuzione più uniforme, in quanto

con le passate a rittochino la componente di pendenza rimane sull'asse di avanzamento: i granuli espulsi in avanti cadono su una superficie che sale (traiettoria accorciata), quelli espulsi all'indietro su una superficie che scende (traiettoria allungata). Ma nello spandimento centrifugo la distribuzione longitudinale è per sua natura auto-compensante, perché ogni punto del terreno riceve il contributo di una successione continua di posizioni del distributore.

Le traiettorie sono state distanziate l'una dall'altra da 4.78 m (figura 3-4). Dalla figura 3-4 si nota come le traiettorie di colore bianco, in prossimità dei cambi di marcia del drone, non sono state concimate; portando ad una miglior efficienza in quanto si eliminano eccessivi sovrappassaggi sulle stesse aree.

L'altezza sopra coltura è stata mantenuta costante a 4m, grazie alla funzione inseguimento del terreno descritta precedentemente.

La velocità di distribuzione è pari a 5 m/s.

Infine la velocità del disco è stata regolata a 1200 giri/min. La velocità di rotazione del disco centrifugo è stata impostata sulla base dei risultati sperimentali riportati da Chen et al. (2026), i quali hanno condotto l'ottimizzazione dei parametri operativi di un UAV multirottore DJI T40 dotato di spandiconcime centrifugo per la distribuzione di fertilizzante granulare. Nel disegno sperimentale ortogonale adottato dagli autori, la velocità del disco è risultata il fattore preponderante nel determinare l'uniformità di distribuzione trasversale (Chen et al., 2026).



Figura 3-4: piano di volo generale

4. Caricamento della tramoggia → riempimento del contenitore tramite sacchi da 25 Kg di EURA 46.

5. Sostituzione e caricamento delle batterie in modo da effettuare una distribuzione continua.



Figura 3-5: piano di volo dettagliato

3.5 Monitoraggio della coltura

Quattro rilievi con il drone sono stati svolti il 06/03/2026, 14/03/2026, 25/03/2026, 06/05/2026 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 3-6: 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 dei rilievi sono stati svolti delle elaborazioni fotogrammetrica eseguite con Metashape Agisoft Software. L'elaborazione svolta è costituita dai seguenti step:

- Allineamento delle foto;
- Generazione nuvola di punti;
- Creazione del modello in 3D;
- Creazione del DEM (Digital Elevation Model);
- Creazione dell'ortomosaico;

3.6 Dati di resa – mietitrebbia a pesata continua

I dati di resa analizzati sono relativi al 2026, quando è stata coltivata l'avena, raccolta tramite la mietitrebbiatura avvenuta il 06/07/2026.

La mietitrebbia usata è un Jhon Deere T560 semi-livellate con 5 scuotipaglia e un battitore da 730 mm. La mietitrebbia monta sensori per la pesata continua delle colture raccolte, inserisce autonomamente i dati nella piattaforma Operations Center, nella quale è possibile scaricare i dati e creare la mappa relativa ai campi di interesse.



Figura 3-7: Mietitrebbia Jhon Deere T560

Capitolo 4 RISULTATI

4.1 Concimazione con il drone

L'operazione si è articolata in due sessioni consecutive, condotte il 21 e il 22 febbraio 2026: la prima è iniziata alle 11:02 ed è stata sospesa alle ore 17:58, con una porzione dell'appezzamento ancora da trattare, per cui l'intervento è stato ripreso il mattino successivo alle ore 09:51 fino al completamento della superficie pianificata, concludendosi alle 13:43; in entrambe le giornate vengono considerati gli orari dei voli produttivi iniziali e finali (vedi punto 2). Poiché le due sessioni sono state condotte sul medesimo appezzamento, con la medesima piattaforma, il medesimo formulato e il medesimo operatore, e costituiscono la prosecuzione di un unico intervento agronomico interrotto dal solo termine della giornata lavorativa, i risultati sono presentati in forma aggregata: gli indicatori riportati nel seguito e riepilogati in Tabella 4-1 sono pertanto riferiti al cantiere di distribuzione nel suo complesso.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalla sperimentazione.

1. La ricarica delle tre batterie DB1560 impiegate nel corso della distribuzione è stata eseguita mediante l'alimentatore in dotazione standard C10000, collegato alla rete elettrica monofase con una potenza disponibile di 6 kW, e ha richiesto mediamente 18 minuti per unità. Il valore osservato eccede di circa il 70% l'intervallo di 9-12 minuti dichiarato dal costruttore e richiamato al capitolo 3.4.2.1.

Lo scostamento non è ascrivibile a un difetto di prestazione del sistema, bensì alla potenza elettrica resa disponibile nel punto di alimentazione. Assumendo per la batteria DB1560 una capacità di 30.000 mAh a una tensione nominale di 52,22 V, corrispondente a un contenuto energetico di circa 1,57 kWh (DJI agriculture, 2025), il ripristino integrale della carica a 6 kW richiederebbe in condizioni ideali 15 minuti e 40 secondi; i 18 minuti rilevati corrispondono pertanto a un rendimento complessivo del processo prossimo all'87%, valore ascrivibile a delle perdite di conversione e con la fase finale di carica a tensione costante. La disponibilità di potenza elettrica presso il punto di stazionamento si configura dunque come una variabile progettuale del cantiere, al pari del dimensionamento del parco batterie. Si precisa infine che il valore di 18 minuti si riferisce

al ripristino integrale della carica: una batteria rientrata da una missione poco impegnativa risulta solo parzialmente scarica e torna disponibile in tempi inferiori.

2. Le analisi che seguono sono state condotte a partire dal registro dei voli esportato dal sistema di gestione del velivolo, il quale restituisce, per ciascuna missione, gli orari di decollo e di atterraggio, la durata effettiva del volo, la superficie interessata dalla distribuzione e la massa di fertilizzante erogata.

Il registro comprende complessivamente cinquantaquattro record, dei quali undici non riconducibili ad attività di distribuzione: otto presentano superficie e massa erogata nulle, corrispondendo a decolli interrotti e a verifiche funzionali condotte in prossimità del punto di stazionamento, mentre tre missioni presentano una superficie marginale, inferiore a 350 m². Trattandosi di voli interrotti anticipatamente, la porzione di appezzamento da essi interessata, pari complessivamente a 573 m², è stata successivamente ripercorsa dalle missioni seguenti e non costituisce estensione aggiuntiva. L'analisi si fonda pertanto sulle quarantatré missioni produttive, la cui distribuzione spaziale è rappresentata in figura 4-1.

- Sulle quarantatré missioni la superficie complessivamente trattata ammonta a 8,8550 ha e la massa di fertilizzante erogata a 1.667,85 kg. La superficie corrisponde agli 8,8550 ha destinati alla concimazione a seguito del ridimensionamento dell'area di lavoro descritto al capitolo 3.4.2.2. Rispetto ai 9,2 ha di estensione complessiva dell'appezzamento il grado di copertura risulta pari al 96,3%.
- Il rateo medio effettivo dell'intervento risulta pari a 188,4 kg/ha, inferiore del 5,8% ai 200 kg/ha impostati in fase di pianificazione e corrispondente a un difetto di 103,2 kg rispetto ai 1.771,0 kg teoricamente necessari per la superficie trattata. Il valore medio non descrive tuttavia in modo esaustivo il comportamento del sistema: calcolato sulla singola missione, il rateo presenta una media di 197,7 kg/ha, una deviazione standard di 44,7 kg/ha e un coefficiente di variazione del 22,6%, con valori estremi compresi fra 102 e 269 kg/ha. Tale dispersione non ha carattere casuale, ma segue l'avanzamento del cantiere. Le prime ventinove missioni, eseguite sulle passate adiacenti al punto di stazionamento, presentano un rateo medio di 218,3 kg/ha, superiore del 9% al valore pianificato; le quattordici missioni conclusive, condotte sulla porzione più distante dell'appezzamento, si attestano invece su 155,1 kg/ha, inferiore del 22%. È significativo osservare come la dispersione interna a ciascuna delle due fasi

risultati, rispetto ai 188.4 kg/ha pressoché identica, con coefficienti di variazione rispettivamente del 16,7% e del 17,0%: il sistema ha dunque operato con regolarità sostanzialmente costante, ma attorno a due livelli di erogazione distinti.

- Quanto allo sfruttamento della capacità di trasporto, il carico medio per missione si è attestato su 38,79 kg, pari al 77,6% del carico utile massimo di 50 kg consentito dal T50 Spreading System (DJI agriculture, 2025), con un valore massimo puntuale di 46,75 kg. Trentasei missioni su quarantatré hanno superato i 40 kg: il riempimento della tramoggia si è dunque mantenuto omogeneo lungo l'intero cantiere, ma sistematicamente inferiore al potenziale della piattaforma. La superficie media interessata da ciascuna missione risulta pari a 2.059,3 m² e la durata media del volo a 4 minuti e 40 secondi.
- Il registro dei voli ha inoltre consentito l'analisi delle tempistiche del cantiere. L'intervallo compreso fra il primo decollo e l'ultimo atterraggio ammonta, sommando le due sessioni, a 11 ore e 12 minuti; al netto della pausa dell'operatore, di durata pari a 1 ora e 10 minuti, e dell'unica ulteriore sospensione eccedente la mezz'ora, pari a 31 minuti, la durata netta del cantiere risulta di 9 ore e 31 minuti, a fronte di un tempo di volo complessivo di 3 ore e 20 minuti. Il tempo effettivamente trascorso in aria rappresenta pertanto il 35,1% della durata dell'operazione, mentre il tempo tecnico non produttivo, ottenuto per differenza, ammonta a 6 ore e 11 minuti.

Ai fini dell'analisi si assume come ciclo di lavoro l'unità elementare che si ripete a ogni missione, comprensiva del decollo, del volo di distribuzione, dell'atterraggio e delle successive operazioni a terra necessarie a riportare il velivolo in condizione di volo, ossia il rifornimento della tramoggia e la sostituzione della batteria. La sua durata media, ottenuta rapportando la durata netta del cantiere al numero delle missioni eseguite, risulta di 13 minuti e 17 secondi, dei quali 4 minuti e 40 secondi impegnati dal volo e 8 minuti e 37 secondi dalle operazioni a terra. Il tempo di ciclo così definito costituisce il reciproco della cadenza di lavoro e rappresenta pertanto la grandezza cui è direttamente proporzionale la capacità di lavoro effettiva.

L'esame degli intervalli intercorsi fra un atterraggio e il decollo successivo mostra come il tempo tecnico non si distribuisca in modo uniforme fra le missioni, ma si articoli in due classi nettamente distinte. Le quarantatré missioni, ripartite in due sessioni, danno luogo a quarantuno intervalli, dei quali due sono

stati esclusi dal computo in quanto non riconducibili al ciclo di lavoro: la pausa dell'operatore, di 1 ora e 10 minuti, e l'unica ulteriore sospensione eccedente la mezz'ora, pari a 31 minuti. Dei trentanove intervalli residui, diciotto non superano i cinque minuti e presentano una durata media di 2 minuti e 59 secondi, compatibile con il solo rifornimento della tramoggia; diciannove si collocano invece fra gli 8 e i 25 minuti, con una durata media di 14 minuti e 41 secondi, dell'ordine del tempo necessario alla ricarica completa di una batteria. I restanti due, rispettivamente di 6 minuti e 16 secondi e di 7 minuti e 50 secondi, occupano una posizione intermedia.

La ripartizione fra le due classi non è omogenea lungo il cantiere, bensì si modifica al progredire dell'operazione: nella prima parte dell'intervento si contano diciotto riattacchi rapidi, mentre nella fase conclusiva questi si riducono a due. La spiegazione risiede nella geometria dell'operazione. Il punto di decollo è rimasto fisso in prossimità del capanno aziendale, mentre il fronte di lavoro si è progressivamente allontanato.

Nelle prime fasi, con le passate adiacenti al punto di stazionamento, il tragitto di trasferimento risultava trascurabile e la missione impegnava soltanto in parte la carica disponibile: una medesima batteria riusciva a sostenere anche più di un ciclo di lavoro.

Nella fase conclusiva, con il fronte di lavoro spostato verso l'estremità dell'appezzamento e lungo la linea di massima pendenza, il trasferimento di andata e ritorno ha assorbito una quota crescente dell'energia disponibile senza contribuire alla distribuzione. La durata media del volo è conseguentemente salita da 4 minuti e 24 secondi a 5 minuti e 11 secondi e ciascuna missione ha impegnato una batteria per intero, rendendo necessaria la ricarica completa fra un volo e il successivo: è in questa condizione che il parco di tre unità, con un tempo di ripristino di 18 minuti ciascuna, ha iniziato a condizionare negativamente l'efficienza delle operazioni di cantiere, facendo aspettare l'operatore la fine della ricarica della batteria per proseguire con la distribuzione. Il tempo di permanenza a terra e il consumo di batterie per unità di superficie, come dimostratosi, dipendono anche dalla distanza fra il punto di decollo e il fronte di lavoro e dal dislivello da superare, e crescono pertanto al progredire dell'operazione.

- La capacità di lavoro riferita al solo tempo di volo, è pari a 2,65 ha/h; la capacità di lavoro effettiva di cantiere, riferita alla superficie trattata e alla durata netta dell'operazione, scende invece a 0,93 ha/h.



Figura 4-1: mappa dei voli per la concimazione

Tabella 4-1: indicatori del piano di distribuzione

INDICATORE	VALORE	UNITÀ
dati rilevati dal registro dei voli		
Record presenti nel registro	54	n.
Missioni considerate nell'analisi	43	n.
Superficie complessivamente trattata	8,8550	ha
Massa di fertilizzante distribuita	1.667,85	kg
Tempo di volo complessivo	3 h 20 min	—
Tempo tecnico non produttivo	6 h 11 min	—
Durata netta del cantiere	9 h 31 min	—
indicatori medi per missione		

INDICATORE	VALORE	UNITÀ
Tempo medio di volo	4 min 40 s	—
Superficie media per missione	2.059,3	m²
Carico medio per missione	38,79	kg
Grado di riempimento medio della tramoggia	77,6	%
Carico massimo registrato	46,75	kg
Missioni con carico non inferiore a 40 kg	36 su 43	n.
indicatori di prestazione		
Rateo medio effettivo	188,4	kg/ha
Scostamento dal rateo pianificato (200 kg/ha)	-5,8	%
Rateo medio per missione	197,7	kg/ha
Deviazione standard del rateo fra le missioni	44,7	kg/ha
Coefficiente di variazione del rateo fra le missioni	22,6	%
Rateo minimo e massimo per missione	102 – 269	kg/ha
Capacità di lavoro sul solo tempo di volo	2,65	ha/h
Capacità di lavoro effettiva di cantiere	0,93	ha/h
Incidenza del tempo di volo sul cantiere	35,1	%
articolazione del ciclo di lavoro		
Durata media del ciclo di lavoro	13 min 17 s	—
di cui tempo di volo	4 min 40 s	—
di cui operazioni a terra	8 min 37 s	—
Tempo medio di ricarica completa di una batteria	18 min	—
Riattacchi entro 5 minuti dall'atterraggio	18	n.
Durata media dei riattacchi rapidi	2 min 59 s	—
Intervalli compresi fra 8 e 25 minuti	19	n.
Durata media degli intervalli lunghi	14 min 41 sec	—
confronto con il piano di distribuzione (cap. 3.4.2.2)		

INDICATORE	VALORE	UNITÀ
Superficie destinata alla concimazione	8,8550	ha
Grado di completamento dell'intervento	100	%
Massa teorica al rateo pianificato	1.771,0	kg
Scostamento della massa distribuita	-103,2	kg

4.2 Monitoraggio della coltura

Le rilevazioni con il DJI Mavic 3M, hanno consentito di eseguire il calcolo dell'indice NDVI. Come si evince dalle immagini del 25/03 e 06/05/2026 (figura 4-2), è presente una chiara disformità di vigore vegetativo nella zona limitrofa al palo della linea elettrica, causato da una concimazione del drone poco uniforme.

Operando in assenza del modulo LiDAR anticollisione, la piattaforma UAV T50 ha registrato un drastico calo nell'accuratezza del rilevamento degli ostacoli, come le sottili linee elettriche presenti nell'appezzamento. Tale limitazione tecnologica, incrementando il rischio di impatto, ha reso necessaria l'esecuzione di sorvoli di sicurezza con conseguente interruzione temporanea del sistema di erogazione.

In riferimento ai rilievi effettuati in data 25/03 (Figura 4-2), l'analisi ha evidenziato un'anomalia spaziale di tipo lineare nella zona centrale dell'appezzamento, caratterizzata da un ridotto vigore vegetativo, che verrà confermata con i dati di resa del prossimo sottocapitolo.

La stessa situazione si riscontra anche per alcune zone limitrofe alle capezzagne.

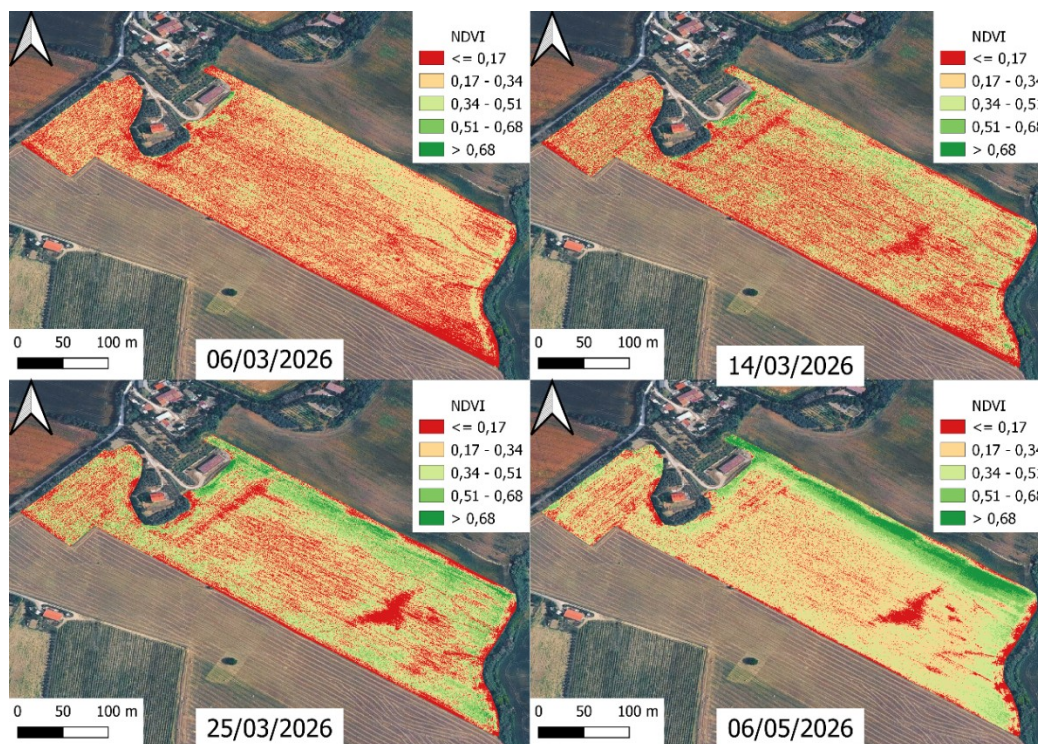


Figura 4-2: mappe NDVI

4.3 Dati di resa

La resa dell'appezzamento è stata pari a 65 ql/ha, ottenuta come precedentemente descritto nel capitolo 3.6 tramite la mietitrebbia Jhon Deere T560, che inoltre ha consentito la registrazione dei dati puntuali di resa (figura 4-3).

Il dataset così acquisito, è stato sottoposto a elaborazione geostatistica al fine di ricondurre l'informazione discreta, rilevata lungo le traiettorie di raccolta, a una rappresentazione continua della produttività dell'appezzamento. Sui dati puntuali è stato dapprima calcolato il variogramma sperimentale, al quale è stato successivamente adattato un modello matematico teorico (figura 4-5). Tale modello, descrivendo analiticamente la struttura di autocorrelazione spaziale del fenomeno, ha consentito la definizione dei pesi attribuiti alle osservazioni nella procedura di stima. L'interpolazione è stata quindi condotta mediante kriging ordinario, impiegando il plugin Smart-Map in ambiente QGIS, ottenendo la mappa continua di resa riportata in figura 4-4.

Come si può notare, nella mappa di interpolazione delle rese, sono presenti aree in cui la resa è compresa fra 4,2 t/ha e 7,9 t/ha, a fronte di una resa media dell'appezzamento pari a 6,5 t/ha.

Tale evidenza quantifica in termini espliciti la variabilità spaziale del sito sperimentale e dimostra come il dato medio aziendale, pur costituendo il riferimento tradizionale per la

programmazione delle operazioni colturali, mascheri differenze produttive di entità tutt'altro che trascurabile, secondo quanto già argomentato al capitolo 1.3.

Assumono particolare rilievo, ai fini della sperimentazione, la corrispondenza spaziale fra le depressioni produttive registrate e le difformità di vigore vegetativo rilevate dall' indice NDVI del 25/03 e del 06/05/2026 (figura 4-2). Come si può notare attraverso la figura 4-3 sono presenti 3 corrispondenze localizzate:

- in prossimità del sostegno della linea elettrica
- nella zona centrale dell'appezzamento caratterizzata da un'anomalia spaziale di tipo lineare
- nei confini di alcune capezzagne

La coerenza fra le due fonti informative, acquisite con sensori differenti e in momenti distinti del ciclo colturale, esclude che i fenomeni costituiscano degli artefatti di elaborazione e ne riconduce l'origine a delle possibili limitazioni dell'UAV, nell'applicazione uniforme del prodotto. Anche se l'anomia centrale di tipo lineare è difficile che sia stata causata dalla concimazione non omogenea del drone, visto che i parametri operativi sono stati settati appositamente per far sì che parte della superficie di un passaggio venga sovrapposta con i passaggi successivi, eliminando quindi potenzialmente la possibilità che ci sia stata disformità di applicazione nella zona centrale dell'appezzamento.



Figura 4-3: mappa di resa puntuale John Deere

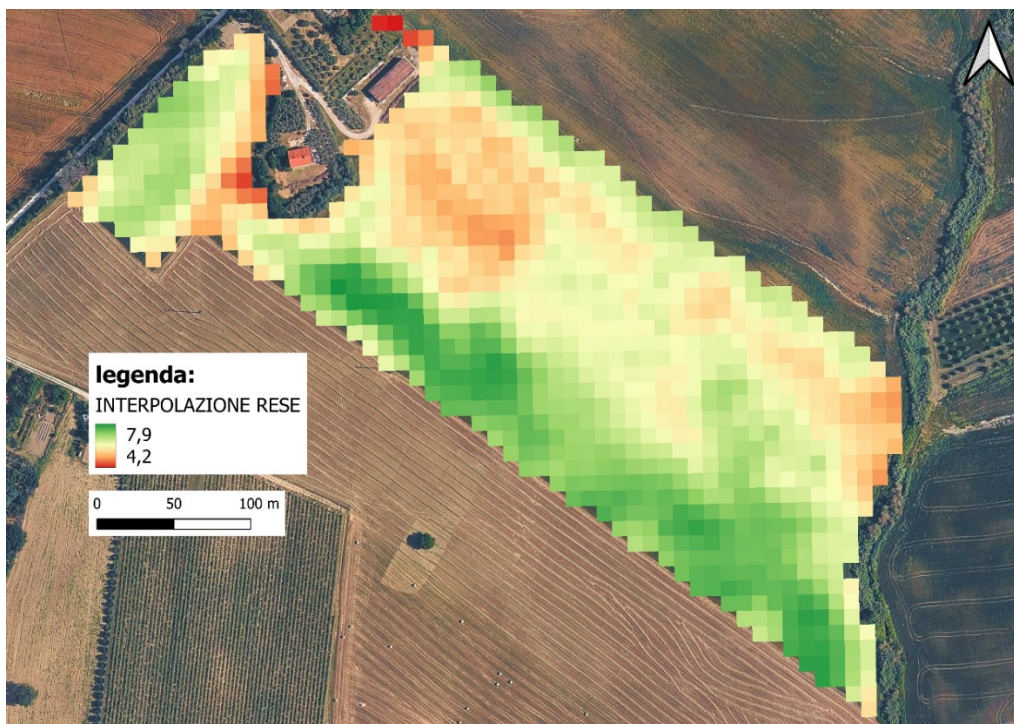


Figura 4-4: mappa interpolazione delle rese

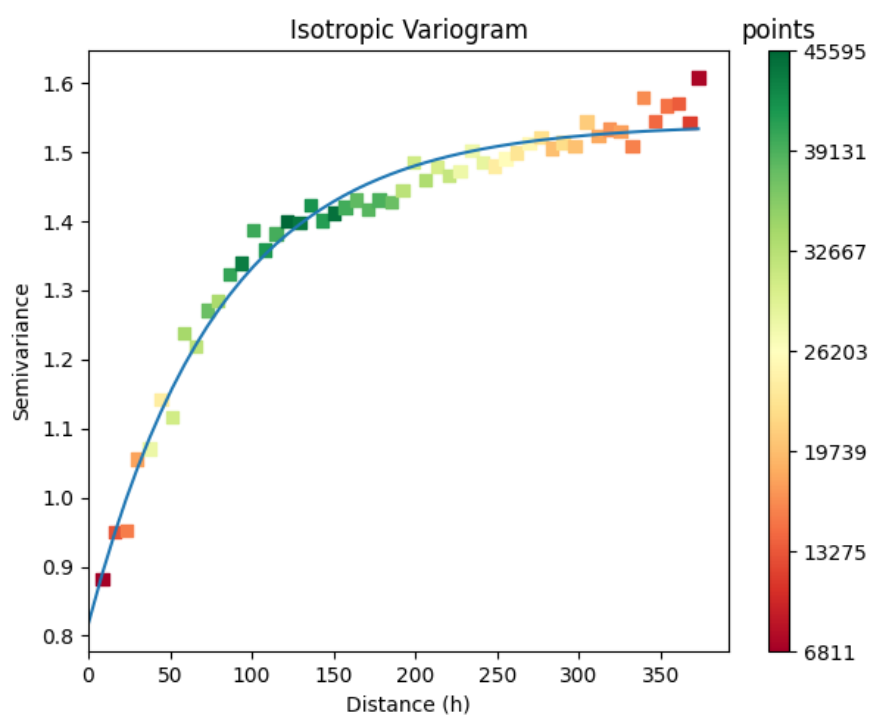


Figura 4-5: Variogramma sperimentale e modello spaziale matematico di fitting

Un ulteriore elemento di valutazione dei risultati produttivi ottenibili utilizzando esclusivamente l'UAV, è costituito dall'assenza del passaggio della trattrice in copertura per effettuare la concimazione ed il trattamento fitosanitario.

Al fine di quantificare in termini monetari tale beneficio agronomico (aumento della resa derivante dall'assenza di calpestio), si è proceduto alla determinazione dell'incidenza delle carreggiate sulla superficie complessiva dell'appezzamento sperimentale, esteso 8,8550 ha, e alla successiva estrapolazione dei risultati a uno scenario aziendale di 100 ha, assunto quale riferimento per la stima del tempo di rientro dell'investimento acquistando un T100 full accessoriato (tabella 4-2; tabella 4-3; tabella 4-4).

Si precisa che la stima così condotta non configura un'analisi di investimento completa. Il calcolo riportato nelle tabelle rapporta il costo di acquisizione della piattaforma al solo beneficio derivante dall'assenza di calpestio, senza computare i costi di esercizio del cantiere aereo: manodopera dell'operatore, energia per la ricarica, manutenzione ordinaria, sostituzione delle batterie a fine vita, copertura assicurativa, formazione del personale e adempimenti di conformità normativa, questi ultimi di entità non trascurabile secondo quanto discusso al capitolo 5.2. Non è parimenti computato il valore residuo della macchina al termine del periodo considerato, né il costo evitato del servizio di contoterzismo attualmente sostenuto dall'azienda per le medesime operazioni, voce che agirebbe invece in senso favorevole. I valori riportati vanno pertanto interpretati quali risparmi lordi potenziali a copertura dell'investimento, e non quali tempi di rientro in senso proprio; la loro determinazione richiederebbe la redazione di un conto colturale completo, che esula dagli obiettivi del presente lavoro.

Le incidenze di calpestio riportate in tabella derivano dal rilievo geometrico delle traiettorie di lavoro, ricostruite in ambiente GIS e successivamente sottoposte a un'operazione di *buffer* di ampiezza pari alla larghezza dell'impronta degli pneumatici: per la concimazione si è assunto a riferimento l'intervento eseguito nel 2025 con la trattrice John Deere 6R 175, le cui passate sono state ricostruite generando linee ortogonali all'allineamento dei dati puntuali registrati dal sistema di bordo John Deere e assumendo una larghezza di impronta pari a 0,80 m per lato; per il trattamento fitosanitario le traiettorie sono state desunte dal rilievo aereo eseguito con il DJI Mavic 3M successivamente all'intervento, assumendo una larghezza di lavoro di 21 m e una larghezza di impronta di 0,32 m per lato (figura 4-6).

Tabella 4-2: valore economico del calpestio e ammortamento del drone

1. PARAMETRI DI INPUT				
Parametro	Valore	u.m.		
Superficie dell'appezzamento sperimentale	8,8550	ha		
Superficie aziendale per la simulazione	100,0000	ha		
Resa media della coltura	65,00	q ha-1		
Prezzo di conferimento dell'avena	25,00	€ q-1		
Costo di acquisto T100	25.482,00 €	€		
Incidenza del calpestio — concimazione	9,1%	%		
Incidenza del calpestio — trattamento	3,8%	%		
Incidenza del calpestio — totale	12,9%	%		
Valore unitario della produzione	1.625,00 €	€ ha-1		
2. APPEZZAMENTO SPERIMENTALE (8,8550 ha)				
Voce	Concimazione	Trattamento	Totale	u.m.
Superficie soggetta a calpestio	0,8058	0,3347	1,1405	ha
Produzione non conseguita	52,38	21,76	74,13	q
Valore della produzione non conseguita	1.309,43 €	543,92 €	1853,35 €	€
Risparmio per unità di superficie	—	—	209,30 €	€ ha-1
3. SIMULAZIONE SULLA SUPERFICIE AZIENDALE (100 ha)				
Voce	Concimazione	Trattamento	Totale	u.m.
Superficie soggetta a calpestio	9,1000	3,7800	12,8800	ha
Produzione non conseguita	591,50	245,70	837,20	q
Risparmio conseguibile mediante UAV	14.787,50 €	6.142,50 €	20.930,00 €	€
Risparmio per unità di superficie	—	—	209,30 €	€ ha-1
4. AMMORTAMENTO DELLA PIATTAFORMA T100				
Voce	Valore	u.m.		
Costo di acquisto T100 (totale imponibile)	25.482,00 €	€		
Risparmio annuo conseguibile	20.930,00 €	€ anno-1		
Tempo di rientro dell'investimento	1,22	anni		
Tempo di rientro dell'investimento	14,6	mesi		
Superficie di pareggio al primo anno	121,7487	ha		
Margine residuo al termine del primo anno	-4.552,00	€		
Tempo di rientro con la sola concimazione	1,72	anni		

Tempo di rientro con il solo trattamento	4,15	anni	
5. AMMORTAMENTO DELLA PIATTAFORMA T50			
Voce	Valore	u.m.	
Costo di acquisto T50 (totale imponibile)	17.414,00 €	€	
Risparmio annuo conseguibile	20.930,00 €	€ anno-1	
Tempo di rientro dell'investimento	0,83	anni	
Tempo di rientro dell'investimento	10,0	mesi	
Superficie di pareggio al primo anno	83,2012	ha	
Saldo al termine del primo anno	3.516,00 €	€	
Tempo di rientro con la sola concimazione	1,18	anni	
Tempo di rientro con il solo trattamento	2,84	anni	

Tabella 4-3: Stima del costo per effettuare distribuzioni granulari professionali tramite il DJI Agras T100

COSTI DJI T100			
VOCE	Q.TÀ	PREZZO UNITARIO	TOTALE
dji agras t100 (telaio + radiocomando)	1	11.769 €	11.769 €
dji 150 l spreading system	1	2.402 €	2.402 €
batteria db2160	3	3.242 €	9.726 €
generatore inverter dji d14000ie (14 kw)	1	5.190 €	5.190 €
fts	1	2.000€	2.000€
totale (iva inclusa)	22%		31.087 €
totale imponibile			25.482 €

Tabella 4-4: Stima del costo per effettuare distribuzioni granulari professionali tramite il DJI Agras T50

COSTI DJI T50			
VOCE	Q.TÀ	PREZZO UNITARIO	TOTALE
kit dji agras t50	1 drone 1 batteria 1 radiocomando 1 air-cooled heat sink 1 generatore D12000iEP	13.009 €	13.009 €
dji agras t50 spreading system	1	976 €	976 €
batteria db1560	2	2.680 €	5.360 €
fts	1	1.900€	1.900€
totale (iva inclusa)	22%		21.245€
totale imponibile			17.414€



Figura 4-6: Mappatura stimata delle traiettorie effettuate durante la concimazione e il trattamento.

Capitolo 5 DISCUSSIONI

5.1 Attività future consigliate

L'analisi dei risultati esposti al capitolo 4 ha confermato la fattibilità tecnica della concimazione ureica mediante UAV, evidenziando al contempo margini di ottimizzazione del cantiere di distribuzione. Tali evidenze non inficiano la validità complessiva della prova condotta, ma individuano gli ambiti verso i quali risulta opportuno indirizzare le successive campagne sperimentali. Alla luce di tali considerazioni, si riportano di seguito le attività future ritenute prioritarie:

1. La distribuzione sarebbe stata ancora più efficace se si fosse raggiunto un carico medio per volo di almeno 47 kg.

Preliminarmente all'analisi delle ricadute operative, si è ritenuto opportuno verificare che il fattore limitante non fosse di natura volumetrica. Assumendo per l'urea granulare una densità apparente compresa fra 720 e 820 kg/m³, un carico di 47 kg occuperebbe un volume compreso fra 57 e 65 litri, corrispondente a una frazione oscillante fra il 76 e l'87% dei 75 litri di capacità della tramoggia (DJI agriculture, 2025a). Il vincolo effettivo è dunque costituito dal carico utile ammesso e non dall'ingombro del prodotto.

L'innalzamento del carico ordinario a 47 kg, valore di poco superiore al massimo effettivamente conseguito nel corso della prova e corrispondente al 94,0% della capacità di trasporto della piattaforma, avrebbe consentito di articolare l'intervento in trentacinque cicli a pieno carico, per complessivi 1.645,00 kg, seguiti da un trentaseiesimo ciclo di completamento. Quest'ultimo, caricato con i residui 22,85 kg, pari al 48,6% del carico ordinario e dunque a poco meno della metà della tramoggia, sarebbe risultato necessario per coprire l'ultima porzione di appezzamento e soddisfare il fabbisogno complessivo di 1.667,85 kg. Il cantiere si sarebbe pertanto risolto in 36 cicli di lavoro in luogo dei 43 effettivamente eseguiti, con una contrazione di sette cicli corrispondente al 16,3% del totale.

Le ricadute sulla capacità di lavoro si apprezzano considerando la diversa incidenza delle due componenti del tempo di cantiere.

Il tempo di volo complessivo sarebbe rimasto invariato in 3 ore e 20 minuti, poiché a parità di superficie trattata, di velocità di avanzamento e di spaziatura fra le passate la percorrenza non si modifica: i voli sarebbero risultati semplicemente meno numerosi e di

maggiore durata, Poiché a rateo costante la superficie coperta da ciascun volo risulta proporzionale alla massa erogata, i trentacinque voli a pieno carico avrebbero interessato circa 2.495 m² ciascuno, in luogo dei 2.059,3 m² rilevati, con una durata unitaria di circa 5 min 39 s a fronte dei 4 min 40 s osservati, mentre il volo di completamento avrebbe coperto i residui 1.213 m² in circa 2 min 45 s.

Il tempo tecnico non produttivo, per contro, è direttamente proporzionale al numero di cicli: assumendo invariato il valore medio rilevato di 8 min 37 s per ciclo, esso si sarebbe contratto da 6 ore e 11 minuti a circa 5 ore e 10 minuti, con un risparmio prossimo all'ora. La durata netta dell'operazione sarebbe conseguentemente scesa da 9 ore e 31 minuti a circa 8 ore e 31 minuti, l'incidenza del tempo di volo sul cantiere sarebbe salita dal 35,1% al 39,2% e la capacità di lavoro effettiva sarebbe passata da 0,93 a 1,04 ha/h, con un incremento prossimo al 12% (tabella 5-1).

È necessario porre attenzione al carico aggiunto ad ogni volo che inevitabilmente richiederà, come già dimostrato al cap 4.1, una sostituzione della batteria ad ogni operazione; di conseguenza se si volesse operare con carichi maggiori, è fondamentale adeguare la stazione di ricarica con una tipologia più potente rispetto a quella impiegata in questa sperimentazione, per esempio tramite il generatore D12000iEP.

Tabella 5-1: Confronto fra il cantiere rilevato e lo scenario a carico ordinario di 47 kg

INDICATORE	RILEVATO	SCENARIO 47 kg	UNITÀ
Cicli di lavoro complessivi	43	36	n.
di cui a pieno carico	—	35	n.
di cui di completamento	—	1	n.
Carico per ciclo a regime	38,79	47,00	kg
Carico del ciclo di completamento	—	22,85	kg
Grado di riempimento della tramoggia a regime	77,6	94,0	%
Massa complessivamente distribuita	1.667,85	1.667,85	kg
Durata del volo a regime	4 min 40 s	5 min 39 s	—
Superficie per ciclo a regime	2.059,3	2.495,3	m ²
Tempo di volo complessivo	3 h 20 min	3 h 20 min	—
Tempo tecnico non produttivo	6 h 11 min	5 h 10 min	—

INDICATORE	RILEVATO	SCENARIO 47 kg	UNITÀ
Durata netta del cantiere	9 h 31 min	8 h 31 min	—
Incidenza del tempo di volo sul cantiere	35,1	39,2	%
Capacità di lavoro effettiva di cantiere	0,93	1,04	ha/h

Si consideri infine che la piattaforma impiegata risulta, sul piano commerciale, già superata sotto il profilo prestazionale dal DJI Agras T100 descritto al capitolo 2.2. Il modello di più recente introduzione interviene direttamente sui fattori limitanti emersi dalla presente prova: il carico utile passa da 50 a 100 kg e la capacità della tramoggia da 75 a 150 litri, riducendo in via teorica a meno della metà il numero dei rifornimenti necessari per erogare la medesima massa di prodotto, mentre la batteria DB2160, di capacità pari a 41.000 mAh contro i 30.000 mAh della DB1560, e il tempo di ricarica dichiarato di 8-9 minuti, agiscono sulla componente energetica del tempo a terra precedentemente discussa (DJI agriculture, 2025). Resta inteso che l'effettivo beneficio dovrà formare oggetto di verifica sperimentale, poiché l'autonomia disponibile a pieno carico condiziona la superficie trattabile nella singola missione.

Un ulteriore elemento di interesse, soprattutto nell'appezzamento in oggetto dove sono presenti cavi elettrici e i relativi basamenti strutturali, è il sistema di percezione degli ostacoli.

Il T100, adotta un'architettura sensoristica più articolata, denominata dal costruttore Safety System 3.0, che affianca ai radar un sensore LiDAR (assente sul T50) dotato di un campo visivo di 272° sul piano verticale e di una portata di misura fino a 60 m, nonché un sistema quadri-visione a copertura pressoché sferica (360° in orizzontale e 180° in verticale) e una camera FPV (DJI agriculture, 2025). Tale configurazione consente al mezzo di operare in modalità di anticollisione fino a 13,8 m/s, a fronte dei 10 m/s del modello precedente, mantenendo in entrambi i casi una distanza di sicurezza post-frenata di 2,5 m. L'introduzione del LiDAR risulta particolarmente significativa ai fini del presente lavoro: rispetto al solo rilevamento radar, la tecnologia laser offre una risoluzione angolare superiore nella discriminazione di ostacoli sottili e a sviluppo lineare, quali i conduttori delle linee elettriche aeree e i relativi sostegni. Poiché la disformità di vigore vegetativo osservata in corrispondenza del palo della linea elettrica (capitolo 4.2) è riconducibile a una deposizione non uniforme del fertilizzante in tale zona, è ragionevole ritenere che una piattaforma dotata di un sistema di percezione più

evoluto degli ostacoli avrebbe consentito di mantenere con maggiore fedeltà la traiettoria e la quota pianificate anche a ridosso dell'ingombro, riducendo le deviazioni/scostamenti automatici responsabili dell'eccesso o del difetto localizzato di azoto e migliorando, di conseguenza, l'uniformità di distribuzione nelle aree marginali interessate dalla presenza di ostacoli.

2. La larghezza effettivamente interessata dalla deposizione, indicata come fascia utile, non è stata determinata sperimentalmente in via preliminare.

La sua determinazione richiede prove di raccolta su file di vaschette disposte ortogonalmente alla direzione di avanzamento, seguite dalla simulazione della sovrapposizione fra passate contigue e dal calcolo del coefficiente di variazione risultante, secondo la metodica adottata da Ribeiro et al. (2026), i quali assumono quale soglia di accettabilità per i fertilizzanti granulari un coefficiente di variazione non superiore al 20% (Ribeiro et al., 2026).

Il confronto con la letteratura consente nondimeno di collocare i parametri adottati. Operando con un DJI T50 su urea, Ribeiro et al. (2026) individuano quale finestra operativa più favorevole come: quote comprese fra 4 e 6 m e velocità comprese fra 16 e 18 km/h, cui associano una fascia utile dell'ordine di 5–7 m; i parametri della presente prova, pari rispettivamente a 4 m e 18 km/h, ricadono entrambi entro tale intervallo. Il solo scostamento riguarda la velocità di rotazione del disco, fissata a 1.200 giri/min contro gli 800 giri/min adottati dagli autori citati. Poiché l'ampiezza della fascia cresce al crescere della velocità periferica di eiezione dei granuli, seppure meno che proporzionalmente per effetto della resistenza aerodinamica, è ragionevole attendersi nelle condizioni della presente prova una fascia utile superiore all'intervallo di riferimento; la spaziatura di 4,78 m avrebbe pertanto determinato una sovrapposizione fra passate contigue verosimilmente compresa fra il 30 e il 45%.

Tale condizione va valutata sotto due profili contrapposti. Sul piano dell'uniformità essa risulta favorevole, poiché una spaziatura inferiore alla fascia utile comporta che ciascun punto del terreno riceva il contributo di un numero maggiore di passate, con conseguente attenuazione delle irregolarità del profilo trasversale della singola passata.

Sul piano della capacità di lavoro la medesima condizione risulta invece penalizzante: assumendo una fascia utile pari a 7 m, una spaziatura correttamente dimensionata avrebbe comportato percorrenze di circa 12,1 km in luogo dei 17,72 km effettivi, con una riduzione del 32% di tempi, consumi e cicli batteria.

3. L'applicazione di prodotto solido granulare si è resa complicata sotto svariati punti di vista, sarebbe interessante studiare l'applicazione di concime liquido per verificare le differenze in termini di efficienza del drone e di risposta della coltura.
4. La distribuzione mediante UAV è stata condotta il 21 e il 22 febbraio 2026, quando i cereali autunno-vernini della provincia di Ancona si collocavano fra l'inizio dell'accestimento, negli appezzamenti a semina più tardiva, e l'inizio della levata, in quelli seminati ai primi di novembre (BBCH 21-30) (AMAP, 2026). In tale stadio fenologico l'ingresso in campo con mezzo terrestre sarebbe risultato ancora ammissibile senza danno meccanico alla coltura, solo se le condizioni del suolo l'avessero consentito in base alle precipitazioni. La prova non ha pertanto consentito di verificare quello che costituisce uno dei vantaggi più qualificanti della piattaforma aerea, ossia la possibilità di intervenire nelle fasi di levata e di botticella, alle quali corrisponde il periodo di massimo assorbimento azotato della coltura e durante le quali il transito delle trattrici determina lo schiacciamento e la rottura dei culmi lungo le carreggiate, con formazione di fasce di mancata produzione.

5.2 Vantaggi e svantaggi della concimazione granulare tramite UAS

L'impiego dei droni nelle concimazioni possono offrire numerosi vantaggi quali:

1. Distribuzione mirata e precisione elevata: i droni consentono di applicare prodotti in modo localizzato, solo dove necessario, riducendo sprechi e sovradosaggi, grazie all'impostazione di un piano di volo in base alle proprie esigenze.
1. Riduzione dell'impatto ambientale e dei costi degli input: grazie a volumi di distribuzione ridotti, alla possibilità di usare mappe di prescrizione e ad una maggiore accuratezza,
2. Accesso a zone difficili: sono particolarmente efficaci in aree impervie, terreni collinari o terrazzati.
3. Velocità e flessibilità operativa: i droni possono intervenire rapidamente, anche subito dopo eventi critici (stress idrico, attacchi parassitari, condizioni del suolo che non consentono l'operatività dei trattori), ottimizzando i tempi di trattamento;
4. Integrazione con dati digitali: possono essere integrati con mappe di vigore, dati satellitari o sensori di campo, rendendo i trattamenti parte di un sistema decisionale avanzato.
5. Annullamento del calpestio del suolo: ne consegue un aumento diretto delle rese. Questo aspetto acquista ulteriore importanza su appezzamenti poco regolari dove i passaggi della macchina sono difficilmente standardizzabili e con maggior probabilità di eseguire manovre aggiuntive andando di conseguenza ad aumentare ulteriormente il

calpestio rispetto a degli appezzamenti regolari e delimitati da delle capezzagne ben definite.

6. Sostenibilità economica e ammortamento: L'investimento di capitale iniziale risulta contenuto ed è caratterizzato da un rapido tempo di recupero. Tale efficienza finanziaria è imputabile a un incremento complessivo della redditività aziendale, trainata a sua volta da un aumento significativo delle rese colturali.

Nonostante i numerosi benefici, l'uso dei droni per la distribuzione aerea presenta svariati svantaggi:

1. Vincoli normativi e oneri procedurali: l'articolato quadro normativo vigente, caratterizzato da stringenti vincoli burocratici e operativi, tra i quali figurano obblighi assicurativi specifici, certificazioni di pilotaggio di livello avanzato, procedure di registrazione e autorizzazioni operative a validità temporale limitata, rende il mantenimento della piena e ininterrotta conformità legale particolarmente gravoso per gli operatori che impiegano UAS di classe superiore, quali il DJI Agras T50. Sebbene l'aderenza totale a tali prescrizioni sia tecnicamente realizzabile, essa impone un incremento dei costi operativi e amministrativi (i cosiddetti costi di conformità) di entità tale da rischiare di estromettere il servizio aereo dal mercato, rendendolo economicamente non competitivo rispetto ai tradizionali cantieri di distribuzione terrestre.

Inoltre le prolungate tempistiche di istruttoria da parte degli enti preposti risultano frequentemente incompatibili con la tempestività richiesta dagli interventi in campo, limitando l'efficienza operativa intrinseca per la quale i sistemi UAV sono stati sviluppati.

2. Gestione del cantiere: rispetto ai mezzi tradizionali, i droni hanno serbatoi di dimensioni ridotte, rendendo necessari più voli per superfici estese e aumentando i tempi operativi di riempimento, ed infine il trasporto di tutte le componenti utili all'operazione potrebbe risultare difficoltoso. A tale proposito alcuni contoterzisti specializzati operano già con delle strutture progettate in modo tale da:
 - ridurre i tempi di ricarica tramite generatori e almeno 3 batterie intercambiabili;
 - consentire un trasporto più sicuro dell'attrezzatura tramite furgoni dotati di tecniche per mantenere stabile il drone e tutti gli accessori utili all'operazione;
 - diminuzione dei tempi di ricarica della tramoggia del drone, come ad esempio la presenza di pompe e botti pre-miscelatrici nel caso in cui si volesse distribuire

liquidi, oppure nel caso di prodotti granulari, sollevando un big bag tramite un trattore o muletto e collegandolo poi alla tramoggia con un tubo dosatore.

3. Autonomia di volo: le batterie hanno una durata limitata, soprattutto con la movimentazione del carico massimo utilizzabile, e richiedono una pianificazione accurata delle missioni e pause frequenti per la ricarica o la sostituzione;
4. Sensibilità alle condizioni meteo: condizioni avverse come vento, pioggia elevata possono compromettere la precisione del trattamento o rendere impossibile il volo in sicurezza;
5. Necessità di competenze tecniche: l'uso efficace dei droni richiede competenze specifiche sia nel pilotaggio sia nella gestione agronomica delle operazioni.

Capitolo 6 CONCLUSIONI

A giudizio di chi scrive, la distribuzione aerea degli input rappresenta una delle traiettorie tecnologiche più promettenti per contrastare la progressiva perdita di fertilità dei suoli agrari: l'assenza di transito delle macchine in copertura interviene direttamente sul costipamento e sull'alterazione della porosità, mentre la modulazione dell'apporto azotato in funzione dell'effettiva esigenza colturale, resa possibile dall'importazione di Mappe di Prescrizione sulla piattaforma impiegata e già formalizzata in letteratura per gli spandiconcime granulari montati su UAV (Guan et al., 2025), agisce sulle perdite per lisciviazione, collocandosi entrambe nella fase di prevenzione, ossia nell'evitare il degrado, della gerarchia di intervento richiamata in introduzione. È auspicabile che la comunità scientifica e l'imprenditoria agricola locale ne colgano sin d'ora le potenzialità, consolidando competenze, protocolli operativi e basi di dati sperimentali, affinché nel momento in cui queste piattaforme raggiungeranno una piena maturità tecnologica il comparto si trovi già nelle condizioni di trarne integralmente beneficio, anziché dover avviare in quella sede il proprio percorso di apprendimento.

A tale sforzo dovrà corrispondere un analogo allineamento delle istituzioni, chiamate a definire un impianto regolatorio più snello nelle procedure e nei tempi di istruttoria, che non rinunci tuttavia a tutelare in egual misura tutte le parti interessate tra cui, la sicurezza dei terzi, la salute degli operatori e la salvaguardia dell'ambiente.

Un ruolo non meno decisivo compete al mondo universitario e agli enti di ricerca, ai quali spetta il compito di tradurre le potenzialità della piattaforma in indicazioni tecniche verificate: la determinazione della fascia utile e dell'uniformità di deposizione al variare della quota di volo, della velocità di avanzamento e del regime di rotazione del disco centrifugo, la definizione dei ratei minimi compatibili con un coefficiente di variazione accettabile e la validazione agronomica delle strategie di frazionamento a rateo variabile costituiscono i presupposti perché la concimazione mediante UAV possa passare dalla dimostrazione di fattibilità, cui il presente lavoro ha inteso contribuire, a una tecnica agronomica pienamente codificata.

BIBLIOGRAFIA

- AMAP. (2026). *Notiziario agrometereologico* (No. 6).
- aretè. (2026). *Report integrale* (VI wave). Osservatorio Agrofarma.
<https://osservatorioagrofarma.new.federchimica.it/report>
- ASI. (2026). *Galileo*. <https://www.asi.it/tlc-e-navigazione/galileo/>
- Basso, B., Dumont, B., Cammarano, D., Pezzuolo, A., Marinello, F., & Sartori, L. (2016). Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. *Science of The Total Environment*, 545–546, 227–235.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.104>
- Basso, B., & Ritchie, J. (2015). *Simulating crop growth and biogeochemical fluxes in response to land management using the SALUS model*.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Simulating-crop-growth-and-biogeochemical-fluxes-in-Basso-Ritchie/021d51d633a2843690d18911501cef8d7538cfef>
- Basso, B., Ritchie, J. T., Cammarano, D., & Sartori, L. (2011). A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field. *European Journal of Agronomy*, 35(4), 215–222.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.06.004>
- Basso, B., Sartori, L., & Bertocco, M. (2005). *Agricoltura di precisione: Concetti teorici e applicazioni pratiche*. VERONA.
<https://www.research.unipd.it/handle/11577/1427800?mode=simple>
- BeiDou Navigation Satellite System. (2026). *Beidou*.
http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/202008/t20200803_21013.html

- Belton, B., Baldiga, L., Justice, S., Minten, B., Narayanan, S., & Reardon, T. (2026). The rapid global rise of agricultural drones: Evidence, drivers, impacts and an agenda for future research. *Global Food Security*, 48, 100897. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2025.100897>
- Berger, K., Machwitz, M., Kycko, M., Kefauver, S. C., Van Wittenberghe, S., Gerhards, M., Verrelst, J., Atzberger, C., Van Der Tol, C., Damm, A., Rascher, U., Herrmann, I., Paz, V. S., Fahrner, S., Pieruschka, R., Prikaziuk, E., Buchaillot, Ma. L., Halabuk, A., Celesti, M., ... Schlerf, M. (2022). Multi-sensor spectral synergies for crop stress detection and monitoring in the optical domain: A review. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113198. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113198>
- Caccia, N. (2026, aprile 30). *Primo FTS DJI Agras T100 certificato MOC-2511 | AERMATICA3D*. <https://www.aermatica.com/fts-certificato-dji-agras-t100/>
- Cahyadi, W. A., Chung, Y. H., Ghassemlooy, Z., & Hassan, N. B. (2020). Optical Camera Communications: Principles, Modulations, Potential and Challenges. *Electronics*, 9(9), 1339. <https://doi.org/10.3390/electronics9091339>
- Calcante et al. (2016). *Agricoltura di precisione – metodi e tecnologie per migliorare l’efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali*.
- Casa Raffaele. (2016). *Agricoltura di Precisione. Metodi e tecnologie per migliorare l’efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali* (1 edizione). edagricole.
- Caterina G. Manning. (2023). *GPS*. <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/gps/>
- Chabrillat, S., Ben-Dor, E., Cierniewski, J., Gomez, C., Schmid, T., & Wesemael, B. (2019). Imaging Spectroscopy for Soil Mapping and Monitoring. *Surveys in Geophysics*, 40, 361–399. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09524-0>
- Chen, X., Zhang, R., Ding, C., Zhang, W., Hu, P., Chao, Y., & Chen, L. (2026). Spreading Uniformity and Parameter Optimization of Multi-Rotor UAVs for Granular Fertilizer Application. *Agronomy*, 16(6), 662. <https://doi.org/10.3390/agronomy16060662>

- Cillis et al. (2015). *La gestione precisa parte dallo studio della variabilità*. 27.
- Comba, L., Biglia, A., Ricauda Aimonino, D., & Gay, P. (2018). Unsupervised detection of vineyards by 3D point-cloud UAV photogrammetry for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 84–95.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.005>
- COMPLEMENTO REGIONALE PER LO SVILUPPO RURALE DEL PIANO STRATEGICO NAZIONALE DELLA PAC, Delinerazione n.54 278 (2023).
- Decreto Legislativo n. 150. (2012). *Attuazione della direttiva 2009/128/CE che istituisce un quadro per l'azione comunitaria ai fini dell'utilizzo sostenibile dei pesticidi*. (DECRETO LEGISLATIVO n. 150.).
- Den Biggelaar, C., Lal, R., Wiebe, K., Eswaran, H., Breneman, V., & Reich, P. (2003). The Global Impact Of Soil Erosion On Productivity*. In *Advances in Agronomy* (Vol. 81, pp. 49–95). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)81002-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)81002-7)
- DJI agriculture. (2025a, gennaio). *Manuale di volo per aeromobile senza equipaggio dell'AGRAS T50*.
- DJI agriculture. (2025b, novembre). *DJI AGRAS T100 User Manual*.
- DJI agriculture. (2026). *Agricultural Drone Industry Insight Report*.
- EASA. (2019). *Introduzione di un quadro normativo per il funzionamento dei sistemi di aeromobili a pilotaggio remoto nelle categorie «aperta» e «specific»* (Nota esplicativa alla decisione 2019/021/R).
- EASA. (2020). *Aggiornamento regolare del Nota esplicativa alla decisione 2020/022/R Modalità di conformità accettabili e materiale di orientamento per il regolamento (UE) 2019/947* (Nota esplicativa alla decisione 2020/022/R).

- EASA. (2022, maggio 5). *Final Means of Compliance with Light-UAS.2511 MOC Light-UAS.2511-01—Issue 01* | EASA. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/product-certification-consultations/final-means-compliance-light-uas2511-moc-light>
- EASA. (2023). *Aggiornamento periodico dell'AMC e del GM ai sensi dei regolamenti (UE) 2019/945 e 2019/947 (droni nelle categorie «aperta» e «specificata»)*. (Nota esplicativa alla decisione ED 2023/012/R).
- Emery X. (2001). *Géostatistique linéaire*. école des Mines de Paris.
- ENAC. (2021a). *UAS-IT: CRITERI D'IMPLEMENTAZIONE E PROCEDURE PER ZONE GEOGRAFICHE* (ATM-09A; Edizione 1).
- ENAC. (2021b). *REGOLAMENTO UAS-IT* (Disposizione DG 01/2021; 1 del 04/01/2021).
- ENAC. (2021c). *RESTRIZIONI TEMPORANEE DELLO SPAZIO AEREO* (ATM-05B; Versione B).
- ENAC. (2023). *LINEE GUIDA ATTESTATI DI PILOTA PER OPERAZIONI DI UAS E PROCEDURE PER LE ENTITA' RICONOSCIUTE in attuazione del Reg. (UE) 2019/947* (2023/005-UAS; 1ª ed.).
- ENAC. (2025). *REGOLAMENTO PER LE TARIFFE* (DM n.46; Edizione n° 3, Revisione n° 0, del 27 settembre 2024).
- ENAC. (2026a). *AltMoC No. IT-UAS-2026-001* (Versione Rev.0).
- ENAC. (2026b). *AltMoC No. IT-UAS-2026-002* (Versione Rev.0).
- Finco, A., Bentivoglio, D., Belletti, M., Chiaraluce, G., Fiorentini, M., Ledda, L., & Orsini, R. (2023). Does Precision Technologies Adoption Contribute to the Economic and Agri-Environmental Sustainability of Mediterranean Wheat Production? An Italian Case Study. *Agronomy*, 13(7), 1818. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071818>

- Fiorentini, M., Zenobi, S., & Orsini, R. (2021). Remote and Proximal Sensing Applications for Durum Wheat Nutritional Status Detection in Mediterranean Area. *Agriculture*, 11(1), 39. <https://doi.org/10.3390/agriculture11010039>
- Gimenez, J., Herrera, D., Tosetti, S., & Carelli, R. (2015). Optimization methodology to fruit grove mapping in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 116, 88–100. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.06.013>
- governo italiano. (2021). *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza*. Presidenza del Consiglio dei Ministri. <https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf>
- Guan, S., Shimazaki, Y., Takahashi, K., Kato, H., Fukami, K., & Watanabe, S. (2025). Agricultural Drone-Based Variable-Rate N Application for Regulating Wheat Protein Content. *Drones*, 9(4), 310. <https://doi.org/10.3390/drones9040310>
- Iderawumi Ph.D, A., Zhang, W., Li, S., Moshayedi, A. J., Farooque, A., & Hu, J. (2023). Advancement of Remote Sensing for Soil Measurements and Applications: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 15. <https://doi.org/10.3390/su152115444>
- IPBES. (2018). *The IPBES assessment report on land degradation and restoration*. (L. Montanarella, R. Scholes, & A. Brainich, A c. Di). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3237392>
- ISTAT. (2026). *Innovazione e pratiche sostenibili in agricoltura* (p. 6). https://www.istat.it/wp-content/uploads/2026/02/Focus_Innovazione-e-pratiche-sostenibili-in-agricoltura_Anno-2024.pdf
- Jerez, G. O., & Alves, D. B. M. (2019). GENERATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF GPS AND GLONASS VIRTUAL DATA FOR POSITIONING UNDER DIFFERENT IONOSPHERIC CONDITIONS. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 25(2), e2019007. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702019000200007>

- Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Myers, D. B., Drummond, S. T., & Hong, S. Y. (2005). Delimitazione delle zone di produttività su terreni argillosi compatti utilizzando la conduttività elettrica apparente del suolo. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3), 285–308. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.012>
- Klodt, M., Herzog, K., Toepfer, R., & Cremers, D. (2015). Field phenotyping of grapevine growth using dense stereo reconstruction. *BMC Bioinformatics*, 16, 143. <https://doi.org/10.1186/s12859-015-0560-x>
- Lal, R. (2009). Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. *Food Security*, 1(1), 45–57. <https://doi.org/10.1007/s12571-009-0009-z>
- Legge n. 182. (2025). *Disposizioni per la semplificazione e la digitalizzazione dei procedimenti in materia di attività economiche e di servizi a favore dei cittadini e delle imprese*. (LEGGE 182).
- Li, S., Simonian, A., & Chin, B. A. (2010). Sensors for Agriculture and the Food Industry. *The Electrochemical Society Interface*, 19(4), 41–46. <https://doi.org/10.1149/2.F05104if>
- linee guida per lo sviluppo dell'agricoltura di precisione in Italia, Legislazione No. D.M. n. 33671, 78 (2017).
- Lu, B., Dao, P., Liu, J., He, Y., & Shang, J. (2020). Recent Advances of Hyperspectral Imaging Technology and Applications in Agriculture. *Remote Sensing*, 12, 2659. <https://doi.org/10.3390/rs12162659>
- Mason, J. A., Muller, P. O., Burt, J. E., & De Blij, H. J. (2016). *Physical geography: The global environment* (Fifth edition). Oxford University Press.
- Matese, A., Di Gennaro, S., & Berton, A. (2016). Assessment of a canopy height model (CHM) in a vineyard using UAV-based multispectral imaging. *International Journal of Remote Sensing*, 38, 1–11. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1226002>

- Matese, A., & Di Gennaro, S. F. (2018). Practical Applications of a Multisensor UAV Platform Based on Multispectral, Thermal and RGB High Resolution Images in Precision Viticulture. *Agriculture*, 8(7), 116. <https://doi.org/10.3390/agriculture8070116>
- Matese, A., Toscano, P., Di Gennaro, S., Genesio, L., Vaccari, F., Primicerio, J., Claudio, B., Zaldei, A., Bianconi, R., & Gioli, B. (2015). Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. *Remote Sensing*, 7, 2971–2990. <https://doi.org/10.3390/rs70302971>
- Meier, U. (2018). *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants: BBCH Monograph*. <https://doi.org/10.5073/20180906-074619>
- MIPAAF, MATTM, & Ministero della Salute. (2014). *Adozione del Piano di azione nazionale per l'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari, ai sensi dell'articolo 6 del decreto legislativo 14 agosto 2012, n. 150 recante: «Attuazione della direttiva 2009/128/CE che istituisce un quadro per l'azione comunitaria ai fini dell'utilizzo sostenibile dei pesticidi»*.
- Moshou, D., Bravo, C., Oberti, R., West, J., Bodria, L., McCartney, A., & Ramon, H. (2005). Spectral Imaging II: Plant disease detection based on data fusion of hyper-spectral and multi-spectral fluorescence imaging using Kohonen maps. *Real-Time Imaging*, 11, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.rti.2005.03.003>
- Muhie, S. H. (2022). Nuovi approcci e pratiche per l'agricoltura sostenibile. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100446. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100446>
- Orsini, R., Fiorentini, M., Zenobi, S., Santilocchi, R., Deligios, P. A., & Ledda, L. (2023). Automatic zone management definition in Mediterranean environment for Triticum durum. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, 6(4), e20422. <https://doi.org/10.1002/agg2.20422>
- Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspetti dell'agricoltura di precisione. In *Advances in Agronomy* (Vol. 67, pp. 1–85). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60513-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60513-1)

- Politecnico di Milano Dipartimento di Ingegneria Gestionale & Osservatorio Smart Agrifood.
(2025). *Smart agrifood: È tempo di una nuova consapevolezza!* (p. 48).
- programma di sviluppo rurale della regione Marche 2014-2020, Legislazione No. 660, 1186
(2015).
- Radočaj, D., Šiljeg, A., Marinović, R., & Jurišić, M. (2023). State of Major Vegetation Indices in Precision Agriculture Studies Indexed in Web of Science: A Review. *Agriculture*, 13(3), 707. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030707>
- Regione Lombardia. (2022). *Relazione finale attività di indagine conoscitiva per valutare l'efficacia dell'utilizzo del drone per la protezione delle colture di olivo, riso e vite* (N 0016819. DGISAN-MDS-P).
- Regione Lombardia. (2023). *Relazione finale attività di indagine conoscitiva per valutare l'efficacia dell'utilizzo del drone per la protezione delle colture di olivo, riso e vite Secondo anno di sperimentazione (2023)* (N 0016819. DGISAN-MDS-P).
- Report-Agricoltura-di-precisione_Osservatorio-ICSC.* (2024). ICSC.
https://osservatorio.supercomputing-icsc.it/wp-content/uploads/2024/07/Report-Agricoltura-di-precisione_Osservatorio-ICSC-1.pdf
- Ribeiro, L. F. O., da Vitória, E. L., Zanelato, J. V., Ribeiro, J. V. O., Silva Barbosa, M. E. da, Ferreira, F. de A., Costa, P. A., & Silva, F. B. C. (2026). Cross-Sectional Distribution Profile of Mineral Fertilizers Applied by Remotely Piloted Aircraft Under Different Operating Parameters. *Drones*, 10(4), 303. <https://doi.org/10.3390/drones10040303>
- Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In *NASA Special Publication* (Vol. 351, p. 309). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1974NASSP.351..309R>
- Sahoo, R., Ray, S., & R, M. (2015). Hyperspectral remote sensing of agriculture. *Current science*, 108, 848–859.

- Scarato, D. (2026a, maggio 3). Drone agricolo DJI Agras vola vicino all'aeroporto di Cuneo Levaldigi, denunciato agricoltore. *Quadricottero News*.
<https://www.quadricottero.com/2026/05/drone-agricolo-aeroporto-cuneo-sequestro-dji-agras.html>
- Scarato, D. (2026b, luglio 14). Boom di droni agricoli condotti illegalmente, l'allarme di UNCAI. *Quadricottero News*. <https://www.quadricottero.com/2026/07/droni-agricoli-diserbo-regole-specific-ritardo-decreto-uncai.html>
- Sharma, R., Kamble, S. S., & Gunasekaran, A. (2018). Big GIS analytics framework for agriculture supply chains: A literature review identifying the current trends and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 103–120.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.001>
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136.
<https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Società internazionale di agricoltura di precisione. (2024, gennaio 1). *Definizione di agricoltura di precisione*. ISPA. <https://ispag.org/resources/definition>
- Status of the world's soil resources: Main report*. (2015). FAO : ITPS.
- Svensgaard, J., Roitsch, T., & Christensen, S. (2014). Development of a Mobile Multispectral Imaging Platform for Precise Field Phenotyping. *Agronomy*, 4, 322–336.
<https://doi.org/10.3390/agronomy4030322>
- Ten Harkel, J., Bartholomeus, H., & Kooistra, L. (2019). Biomass and Crop Height Estimation of Different Crops Using UAV-Based Lidar. *Remote Sensing*, 12(1), 17.
<https://doi.org/10.3390/rs12010017>
- The State of Food and Agriculture*. (2025). FAO. <https://doi.org/10.4060/cd7067en>
- The State of Food and Agriculture 2020*. (2020). FAO. <https://doi.org/10.4060/cb1447en>

- UE. (2019a). *REGOLAMENTO DELEGATO (UE) 2019/ 945 DELLA COMMISSIONE - del 12 marzo 2019—Relativo ai sistemi aeromobili senza equipaggio e agli operatori di paesi terzi di sistemi aeromobili senza equipaggio (945)*. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.
- UE. (2019b). *REGOLAMENTO DI ESECUZIONE (UE) 2019/ 947 DELLA COMMISSIONE - del 24 maggio 2019—Relativo a norme e procedure per l'esercizio di aeromobili senza equipaggio (947)*. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.
- UE. (2020a). *REGOLAMENTO DELEGATO (UE) 2020/1058 DELLA COMMISSIONE del 27 aprile 2020 che modifica il regolamento delegato (UE) 2019/945 per quanto riguarda l'introduzione di due nuove classi di sistemi aeromobili senza equipaggio (1058)*.
- UE. (2020b). *REGOLAMENTO DI ESECUZIONE (UE) 2020/639 DELLA COMMISSIONE del 12 maggio 2020 che modifica il regolamento di esecuzione (UE) 2019/947 per quanto riguarda gli scenari standard per le operazioni effettuate entro o oltre la distanza di visibilità (639)*. http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2020/639/oj
- UE. (2022). *REGOLAMENTO DI ESECUZIONE (UE) 2022/425 DELLA COMMISSIONE del 14 marzo 2022 che modifica il regolamento di esecuzione (UE) 2019/947 per quanto riguarda la proroga dei periodi transitori per l'uso di determinati sistemi di aeromobili senza equipaggio nella categoria «aperta» e della data di applicazione per gli scenari standard per le operazioni eseguite entro e oltre la distanza di visibilità (REGOLAMENTO 425)*. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.
- UNITED NATIONS DEPARTMENT FOR ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. (2025). *WORLD POPULATION PROSPECTS 2024: Summary of results*. UNITED NATIONS.
- Vlek, Paul L.G., Khamzina, Asia, & Tamene, Lulseged D. (2017). *Land degradation and the Sustainable Development Goals: Threats and potential remedies* (p. 67). Centro internazionale per l'agricoltura tropicale (CIAT). <https://cgspace.cgiar.org/items/9990be1d-eca3-4496-bc60-f916fb6ae3f7>

- Wubs, E. R. J., Van Der Putten, W. H., Bosch, M., & Bezemer, T. M. (2016). Soil inoculation steers restoration of terrestrial ecosystems. *Nature Plants*, 2(8), 16107. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.107>
- XAG. (2025, agosto 1). *XAG P150 Max User Manual*.
- Xunwei, W., Zhiyan, Z., Boqian, C., Jinfeng, Z., Xiaolong, F., & Hewitt, A. (2024). Distribution uniformity improvement methods of a large discharge rate disc spreader for UAV fertilizer application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 220, 108928. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108928>
- Yan, K., Gao, S., Yan, G., Ma, X., Chen, X., Zhu, P., Li, J., Gao, S., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Myneni, R. B., & Wang, Q. (2025). A global systematic review of the remote sensing vegetation indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 139, 104560. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104560>
- Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Agricoltura di precisione: Una panoramica mondiale. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3), 113–132. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0)
- Zwinkels, J. (2015). Light, Electromagnetic Spectrum. In R. Luo (A c. Di), *Encyclopedia of Color Science and Technology* (pp. 1–8). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_204-1