UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA VITA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN

SOSTENIBILITÀ INTEGRATA DEI SISTEMI AGRICOLI

Telerilevamento ad alta risoluzione per il monitoraggio del frumento: integrazione tra indici vegetativi PlanetScope e mappa di resa in un appezzamento della Pampa argentina

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
GIOVANNI GHIONI
Matricola 191496

Relatore:
PROF.SSA ROBERTA MARTELLI

Correlatori:
DOTT. LORENZO FRANCIOSI
ING. AGR. MARÍA PAULA MELILLI

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE VI

ELENCO DELLE FIGURE VIII

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI XI

PREMESSA XIII

ABSTRACT 1

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI 2

CAPITOLO 1 CONTESTO AGRICOLO DELL'ARGENTINA, QUADRO NAZIONALE E LOCALE 6

1.1 Importanza del settore agricolo nell'economia nazionale 6

1.2 Principali produzioni e commercio estero 7

1.3 Pratiche agricole tradizionali e recenti evoluzioni 8

1.4 La regione oggetto di studio 9

1.4.1 Caratteristiche pedoclimatiche 10

1.4.2 Uso del suolo e sistemi colturali 11

1.4.3 Principali produzioni agricole locali 12

1.4.4 Il partido di Junín 14

CAPITOLO 2 IL FRUMENTO TENERO IN ARGENTINA E NELL'AREA DI STUDIO 17

2.1 Caratteristiche della coltura 17

2.1.1 Diffusione, aspetti botanici e ciclo colturale 17

2.1.2 Determinanti della resa e principali fattori limitanti 20

2.2 Il frumento in Argentina 23

2.2.1 Evoluzione storica della coltura e importanza economica 23

2.2.2 Classificazione qualitativa e criteri agronomici di selezione varietale 24

2.2.3 Principali varietà coltivate 25

2.2.4 Produzione, mercato e destinazioni d'uso 28

2.2.5 Tecniche colturali e sistemi produttivi 31

2.3 Caso studio: il frumento nel partido di Junín 32

2.3.1 Importanza della coltura nell'area di studio 32

2.3.2 Tecniche di gestione produzioni e rese medie 34

CAPITOLO 3 PRINCIPI DI AGRICOLTURA DI PRECISIONE 36
3.1 Definizione, principi e obiettivi 36
3.2 Variabilità spaziale e temporale dei sistemi colturali 38
3.3 Evoluzione storica dell'AdP 39
3.4 Tecnologie e flusso operativo dell'AdP 41
3.4.1 Acquisizione dei dati 43
3.4.2 Elaborazione dei dati e applicazioni a rateo variabile 46
3.5 Barriere all'adozione dell'AdP 48
CAPITOLO 4 TELERILEVAMENTO E INDICI VEGETATIVI 50
4.1 Le radiazioni elettromagnetiche 51
4.2 Telerilevamento: generalità, sensori e piattaforme 53
4.2.1 Generalità del telerilevamento 53
4.2.2 Sensori per il telerilevamento 54
4.2.3 Risoluzione delle immagini telerilevate 56
4.2.4 Piattaforme per il telerilevamento 57
4.2.5 Evoluzione delle piattaforme satellitari 59
4.2.6 Piattaforme prossimali e sviluppi recenti 62
4.3 Indici vegetativi 63
4.3.1 Principi teorici degli indici vegetativi 63
4.3.2 Classificazione degli indici vegetativi 64
4.3.3 Principali indici vegetativi 65
4.4 Applicazioni 68
4.4.1 Monitoraggio delle colture 68
4.4.2 Stima della resa 70
4.4.3 Irrigazione 70
4.4.4 Gestione dei nutrienti 71
4.4.5 Monitoraggio delle fitopatie 72
4.4.6 Gestione delle infestanti 73
4.4.7 Caratterizzazione del suolo 74
4.5 Potenzialità e limiti 75
CAPITOLO 5 DIFFUSIONE DELL'ADP IN ARGENTINA 78
5.1 Innovazione tecnologica nel settore agricolo argentino 78
5.1.1 Evoluzione del sistema dell'innovazione agricola 79
5.1.2 Ruolo degli attori pubblici e privati nello sviluppo dell'innovazione 80
5.1.3 Ecosistema AgTech e utilizzatori finali 81
5.2 Evoluzione storica e diffusione dell'AdP in Argentina 83

5.2.1 Diffusione a livello nazionale e territoriale 84
5.2.2 Confronto con il contesto sudamericano 85
5.2.3 Evoluzione delle principali tecnologie di AdP 87
5.2.4 Barriere alla diffusione 92
5.3 Confronto con l'AdP in Italia 93

CAPITOLO 6 CASO STUDIO 96
6.1 Obiettivo della ricerca 96

CAPITOLO 7 MATERIALI E METODI 98
7.1 Area di studio 98
7.2 Gestione agronomica 101
7.3 Dati meteorologici 101
7.4 Acquisizione ed elaborazione delle immagini satellitari 102
7.5 Acquisizione e mappatura dei dati di resa 104
7.6 Integrazione ed estrazione dei dati georeferenziati 106
7.7 Analisi statistica e spaziale dei dati 107

CAPITOLO 8 RISULTATI 110
8.1 Statistica descrittiva 110
8.2 Andamento temporale degli indici vegetativi 112
8.3 Distribuzione spaziale della resa e degli indici vegetativi 114
8.4 Relazione tra indici vegetativi e resa 117
8.5 Individuazione e caratterizzazione delle classi di produttività 118
8.6 Stima della resa mediante gli indici vegetativi 124

CAPITOLO 9 DISCUSSIONE 128
9.1 Andamento meteorologico e sviluppo della coltura 128
9.2 Dinamica temporale degli indici vegetativi 129
9.3 Variabilità spaziale e relazione tra indici vegetativi e resa 130
9.4 Capacità degli indici vegetativi di discriminare le classi di produttività 131
9.5 Differenze tra gli indici e ruolo di NDRE ed EVI 132
9.6 Relazione quantitativa tra indici vegetativi e resa 132
9.7 Limiti dello studio e prospettive di approfondimento 133

CAPITOLO 10 CONCLUSIONI 135

BIBLIOGRAFIA 138

ELENCO DELLE TABELLE

Tab. 1.1 – Superficie seminata delle principali colture o tipologie di colture nel partido di Junín per annata agraria, in ettari (Melilli, 2026). 16
Tab. 2.1 – Principali varietà seminate in Argentina, suddivise per anno di iscrizione della varietà, GC di appartenenza, superficie seminata in ha e frazione percentuale della superficie coperta dal totale delle varietà. Elaborazione personale ottenuta a partire dal documento INASE, (2026). Le aziende che hanno richiesto l'iscrizione delle varietà e gli anni di iscrizione al registro sono tratti dal Catálogo Nacional de Cultivares, INASE (https://gestion.inase.gob.ar/registroCultivares/publico/catalogo). 26
Tab. 2.2 – Distribuzione delle cinque maggiori cultivar per tipologia di ciclo (corto, intermedio, lungo) nella provincia di Buenos Aires (INASE, 2026). 27
Tab. 2.3 – Destinazioni d'uso della granella di frumento prodotta nelle campagne produttive 2022/23, 2023/24 e 2024/25, in milioni di ton. 1Industria: granella per produzione di farina e semola. 2Altri usi: è compresa la produzione di foraggio. Elaborazione propria dei dati del Ministerio de Economía (2025a, 2026). 30
Tab. 2.4 – Confronto dei valori di produzione di frumento nel partido di Junín nell'annata agraria 2024/25 con quella precedente e con la media dei 10 anni precedenti. Elaborazione propria dei dati del Ministerio de Economía (Datos Abiertos Estadística PBA - Estimaciones Agrícolas, https://datos.estadistica.ec.gba.gov.ar/). 35
Tab. 4.1 – Risoluzione dei sensori di acquisizione. 57
Tab. 4.2 – Classificazione generale degli indici vegetativi in funzione delle principali proprietà della vegetazione valutate e delle relative applicazioni in AdP. 65
Tab. 5.1 – Principali indicatori strutturali e di digitalizzazione del settore agricolo nei principali Paesi sudamericani (Brasile, Argentina, Uruguay, Cile) (Puntel et al., 2023). n.d.: non disponibile. 87
Tab. 5.2 – Evoluzione delle principali tecnologie di AdP in Argentina tra il 2010 e il 2019 (Villarroel et al., 2020). 90
Tab. 7.1 – Precipitazioni mensili registrate durante l'annata agraria 2025/2026 nel partido di Junín e confronto con i valori medi storici. Fonte: stazione meteorologica Junín Aero (SMN). 102
Tab. 7.2 – Temperature medie mensili registrate durante l'annata agraria 2025/2026 nel partido di Junín e confronto con i valori medi storici del periodo 1991-2020. Fonte: stazione meteorologica Junín Aero (SMN). 102
Tab. 7.3 – Bande spettrali PlanetScope SuperDove (PSB.SD). 103
Tab. 7.4 – Date di acquisizione delle immagini PlanetScope SuperDove relative alle fasi fenologiche del frumento e percentuale di copertura nuvolosa delle scene selezionate. 103
Tab. 7.5 – Indici vegetativi calcolati dalle immagini PlanetScope SuperDove, formule di calcolo, bande spettrali utilizzate e principali applicazioni agronomiche. 104
Tab. 8.1 – Statistiche descrittive dei dati di resa ottenuti mediante interpolazione a risoluzione spaziale di 3 × 3 m e 6 × 6 m nell'appezzamento Junín 01. 111
Tab. 8.2 – Statistica descrittiva degli indici vegetativi dell'appezzamento Junín 01. 112
Tab. 8.3 – Valori degli Indici Vegetativi (media ± SD) estratti nelle date di indagine. 113
Tab. 8.4 – Coefficienti di correlazione di Spearman (ρ) tra la resa e gli indici vegetativi NDVI, NDRE, EVI e RVI nelle diverse date di acquisizione nell'appezzamento Junín 01. 117
Tab. 8.5 – Statistiche descrittive delle classi di produttività ottenute mediante clustering K-means della resa con k = 2. 118

Tab. 8.6 – Statistiche descrittive dell0e classi di produttività ottenute mediante clustering K-means della resa con k = 3. 119
Tab. 8.7 – Valori medi (± deviazione standard) degli indici NDVI, NDRE, EVI e RVI nelle classi a bassa (Low), media (Medium) e alta (High) produttività dell'appezzamento Junín 01 nelle diverse date di acquisizione. 123
Tab. 8.8 – Dimensione dell'effetto (ε^2) associata al test di Kruskal–Wallis per il confronto dei valori di NDVI, NDRE, EVI e RVI tra le zone a bassa, media e alta produttività dell'appezzamento Junín 01 nelle diverse date di acquisizione. 124
Tab. 8.9 – Parametri dei modelli di regressione lineare semplice tra resa e indici vegetativi NDRE ed EVI nelle date selezionate nell'appezzamento Junín 01. 125

ELENCO DELLE FIGURE

Fig. 1.1 – a) contributo al valore aggiunto agricolo totale per provincia (World Bank, 2023); b) distribuzione nazionale delle superfici coltivate in ettari (INDEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina, s.d.) 7
Fig. 1.2 – Distribuzione del contributo di ciascuna filiera agroalimentare al valore aggregato lordo (Consejo Agroindustrial Argentino, 2023). 8
Fig. 1.3 – Valori di export e import agroalimentare in Argentina nel periodo 2000-2023 in USD milioni (OECD, 2025). 8
Fig. 1.4 – Regione pampeana; a destra è riportata l'ubicazione delle stazioni meteorologiche (Aliaga et al., 2017). 10
Fig. 1.5 – Incidenza della soia per unità di superficie seminata, andando da sinistra a destra, nel 1970, 2000 e 2025 (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) & Instituto Multidisciplinario de Historia y Ciencias Humanas (IMHICIHU), s.d.). 12
Fig. 1.6 – Mappa nazionale di distribuzione delle colture nell'annata agraria 2024/2025: a sinistra, inverno 2024; a destra, estate 2025. In rosso: Provincia di Buenos Aires (De Abelleyra et al., 2025). 13
Fig. 1.7 – A sinistra: regioni produttive della provincia di Buenos Aires (in rosso: partido di Junín, situato nella regione Centro-Nord); a destra: evoluzione della superficie seminata di girasole, mais, soia e frumento nella regione Centro-Nord (Bona, 2021). 14
Fig. 2.1 – Contributo medio alla produzione di frumento nel mondo, periodo 2015-2024. (FAOSTAT, s.d.). 18
Fig. 2.2 – Rappresentazione del ciclo biologico del frumento mediante scala di Zadoks. La scala si basa su un codice a doppia cifra: la prima definisce gli stadi di crescita (0: germinazione; 1: crescita del germoglio; 2: germogliamento, 3: allungamento del fusto; 4: guaina in accrescimento; 5: emergenza dell'infiorescenza; 6: fioritura; 7: maturazione lattea; 8: maturazione cerosa; 9: maturazione fisiologica), la seconda può indicare il numero di foglie, germogli, nodi o altro, a seconda dello stadio considerato (Simón & Golik, 2022). 19
Fig. 2.3 – Sottoregioni produttrici di frumento (subregiones trigueras) e di altri cereali invernali in Argentina, la quale adozione è stata approvata il 12 gennaio 2021 dalla Comisión Nacional de Semillas (CONASE) (Abbate et al., 2021). CCI: Comité de Cereales de Invierno; INASE: Instituto Nacional de Semillas. 23
Fig. 2.4 – Distribuzione geografica della superficie coltivata a frumento in Argentina, divisa per dipartimenti, per l'annata agraria 2025/2026 (INASE, 2026). 27
Fig. 2.5 – Andamento delle superfici seminate e raccolte di frumento negli ultimi anni (periodo 2014- 2025). Le eccezioni all'andamento crescente delle superfici sono stati gli anni in cui sono state rilevate severe siccità a causa del fenomeno de "La Niña" (Ministerio de Economía, 2025a). 28
Fig. 2.6 – Andamento della produzione e della produttività del frumento nelle ultime 11 annate agrarie (periodo 2014/15, 2024/25) (Ministerio de Economía, 2025a). 29
Fig. 2.7 – Produzione di frumento per provincia nell'annata agraria 24/25 (Ministerio de Economía, 2025a). 29
Fig. 2.8 – Proiezioni delle destinazioni d'uso del frumento prodotto nell'annata agraria 2024/25 (Ministerio de Economía, 2025b). Industria: granella per la produzione di farine e semole; Altri usi: inclusa la granella per uso foraggero. 31
Fig. 2.9 – Precipitazioni mensili a Junín nel 2025 confrontate con i valori storici (Tellería & Melilli, 2026). 35
Fig. 2.10 – Andamento della superficie seminata e della produzione di granella di frumento nel partido di Junín nelle ultime 11 stagioni produttive (da 2014/15 a 2024/25). Elaborazione propria dei dati del Ministerio de

Economía (Datos Abiertos Estadística PBA - Estimaciones Agrícolas, https://datos.estadistica.ec.gba.gov.ar/)..... 35
Fig. 3.1 – Confronto tra gestione uniforme (a) e gestione sito-specifica (b) in un appezzamento con zone a diverso potenziale produttivo; in (b) la dose segue il fabbisogno di ciascuna zona. Illustrazione originale realizzata con il supporto dell'IA (Claude, Anthropic); elaborazione propria da Pisante (2013) e Segarra (2024).... 37
Fig. 3.2 – Tappe principali dell'evoluzione storica dell'AdP. Illustrazione originale realizzata con il supporto dell'IA (Claude, Anthropic); elaborazione propria da Avola et al. (2024) e Karunathilake et al. (2023). 40
Fig. 3.3 – Flusso operativo dell'AdP, dalla variabilità del campo all'intervento sito-specifico. Illustrazione realizzata con ChatGPT (OpenAI). 42
Fig. 3.4 – Approccio map-based (a) e approccio real-time (b). Illustrazione originale realizzata con il supporto dell'IA (Claude, Anthropic); elaborazione propria da Adamchuk et al. (2004) e Grisso et al. (2009). 45
Fig. 3.5 – Dall'integrazione dei dati in ambiente GIS all'applicazione a rateo variabile: management zones, mappa di prescrizione e VRT. Illustrazione originale realizzata con il supporto dell'IA (Claude, Anthropic); elaborazione propria da Pisante (2013) e Grisso et al. (2009). 48
Fig. 4.1 – Onda elettromagnetica. E: campo elettrico; B: campo magnetico (Cozzi et al., 2013). 51
Fig. 4.2 – Spettro elettromagnetico (Cozzi et al., 2013)..... 52
Fig. 4.3 – Firma spettrale della vegetazione e bande spettrali disponibili in alcuni sensori satellitari (Landsat-9, Sentinel-2 e PlanetScope) (Segarra, 2024). 54
Fig. 4.4 – Principali piattaforme per il telerilevamento impiegate nelle applicazioni di AdP (Adamchuk et al., 2007). 58
Fig. 4.5 – Risposte spettrali dei sensori installati sui satelliti PlanetScope: (a) Dove Classic 'PS2', quattro bande (RGB-NIR); (b) Dove-R 'PS2.SD', quattro bande (RGB-NIR) ma con migliore separazione tra le bande; (c) SuperDove 'PSB.SD', otto bande, Blue, Green II, Red, NIR, Coastal Blue, Green, Yellow, Red-Edge (Frazier & Hemingway, 2021). 61
Fig. 4.6 – Tipici spettri di riflessione, o firme spettrali, di suolo, acqua e vegetazione (Sishodia et al., 2020). ... 66
Fig. 4.7 – Confronto tra le firme spettrali di una pianta in buono stato vegetativo e di una pianta soggetta a condizioni di stress (Sishodia et al., 2020)..... 69
Fig. 5.1 – Diffusione delle tecnologie di AdP in Argentina nel 2002 e nel 2018 a livello nazionale, regionale e provinciale (Guaglianone, 2025). 84
Fig. 5.2 – Diffusione delle tecnologie di AdP nei principali partidos della provincia di Buenos Aires nel 2002 e nel 2018 (Guaglianone, 2025). 85
Fig. 5.3 – Livello di adozione delle principali tecnologie di AdP in Argentina, Brasile, Cile e Uruguay (Puntel et al., 2023). 86
Fig. 5.4 – Stime dell'evoluzione annuale di varie tecnologie di AdP, 2010-2019 (numero di unità, espresse come numero cumulato di unità installate): (a) sistemi di misurazione della quantità raccolta di prodotti agricoli; (b) sistemi per il monitoraggio della semina e per la semina a dose variabile (o VRA); (c) ricevitori GNSS e sistemi per il controllo delle sezioni sulle irroratrici; (d) attrezzature per il controllo selettivo delle erbe infestanti; (e) sistemi di guida autonoma; (f) sistemi di telemetria nelle macchine agricole (Villarroel et al., 2020). 91
Fig. 5.5 – Esempi di robot agricoli (Ayesta, 2025). 91
Fig. 5.6 – Livello conoscitivo delle varie tecnologie di Agricoltura 4.0 tra gli intervistati del sondaggio. Sono presi in considerazione quattro diversi livelli: (a) Unknown: nessuna conoscenza dell'esistenza degli strumenti; (b) Known: limitata familiarità, con una conoscenza solo approssimativa delle soluzioni tecnologiche; (c) Used in the past, not anymore: l'intervistato ha familiarità con la tecnologia, nonostante non la stesse più utilizzando al momento del sondaggio; (d) In use: l'intervistato ha familiarità con il sistema e lo utilizza (Pacciani et al., 2025). 94
Fig. 7.1 – Localizzazione dell'appezzamento oggetto di studio nel partido di Junín (Buenos Aires, Argentina) (latitudine 34.63796° S; longitudine 60.88682° W; WGS84). 98
Fig. 7.2 – Distribuzione delle unità cartografiche dei suoli nell'appezzamento Junín 01, sulla base della Mappa dei Suoli della Provincia di Buenos Aires (scala 1:50.000). 99
Fig. 7.3 – Elevazione (m s.l.m.) e curve di livello dell'appezzamento Junín 01. 100

Fig. 7.4 – Mietitrebbia John Deere S670 (a) e i sistemi integrati di acquisizione della resa (b, c) e dell'umidità (d) delle mietitrebbie della serie S (John Deere). Fonti: https://ar.inspiredpencil.com/pictures-2023/john-deere-s670-combine (a), deere.com/assets/pdfs/common/parts-and-service/manuals-training/Ready to Harvest Yield Accuracy.pdf (b, c), deere.com/assets/pdfs/region-1/parts-and-service/quick-reference-guides/YieldCalibration-English.pdf (d). 105
Fig. 8.1 – Localizzazione delle celle con dati mancanti nell'appezzamento Junín 01. Sono rappresentati i centroidi delle celle del reticolo 6 × 6 m, con evidenziate le unità caratterizzate da dati mancanti, successivamente escluse dalle analisi. 110
Fig. 8.2 – Andamento temporale dei valori medi degli indici NDVI, NDRE, EVI e RVI nell'appezzamento Junín 01. NDVI, NDRE ed EVI sono rappresentati sull'asse verticale sinistro, mentre RVI è riportato sull'asse verticale destro. Le barre rappresentano ± una deviazione standard (SD) e descrivono la variabilità spaziale dei valori all'interno dell'appezzamento. 113
Fig. 8.3 – Distribuzione spaziale della resa interpolata nell'appezzamento Junín 01. I valori di resa sono espressi in t ha^{-1}. 116
Fig. 8.4 – Distribuzione spaziale degli indici vegetativi NDVI (a), NDRE (b), EVI (c) e RVI (d) nell'appezzamento Junín 01 in corrispondenza dell'acquisizione del 1° ottobre 2025 (fase di massimo sviluppo vegetativo). 116
Fig. 8.5 – Distribuzione spaziale delle classi di produttività individuate mediante clustering K-means della resa nell'appezzamento Junín 01, considerando tre (a) e due (b) cluster. 120
Fig. 8.6 – Andamento della Sum of Squared Errors (SSE) in funzione del numero di cluster secondo l'Elbow Method utilizzato per la selezione del numero di classi di produttività. 121
Fig. 8.7 – Andamento temporale dei valori medi degli indici NDVI (a), NDRE (b), EVI (c) e RVI (d) nelle zone a bassa (Low), media (Medium) e alta (High) produttività individuate nell'appezzamento Junín 01. Le barre rappresentano ± deviazione standard. 122
Fig. 8.8 – Relazione tra la resa e gli indici vegetativi NDRE ed EVI nelle acquisizioni dell'11 settembre e del 1° ottobre nell'appezzamento Junín 01. Sono riportati gli scatterplot relativi a NDRE dell'11 settembre (A), NDRE del 1° ottobre (B), EVI dell'11 settembre (C) ed EVI del 1° ottobre (D). Le linee indicano i modelli di regressione lineare semplice utilizzati per la stima della resa. Per ciascun modello sono riportati l'equazione di regressione e il coefficiente di determinazione (R^2). La resa è espressa in t ha^{-1}. 127

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

Abbreviazione	Definizione
AdP	Agricoltura di Precisione
AACREA	Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola
AAPRESID	Asociación Argentina de Productores de Siembra Directa
BDS-3	BeiDou Navigation Satellite System
CCI	Comité de Cereales de Invierno
CONASE	Comisión Nacional de Semillas
CONICET	Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
CSC	Capacità di Scambio Cationico
CWSI	Crop Water Stress Index
DEM	Modello Digitale di Elevazione
DON	Deossinivalenolo
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EMI	Electromagnetic Induction
ESA	European Space Agency
ET	Evapotraspirazione
EVI	Enhanced Vegetation Index
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GBAS	Ground-Based Augmentation System
GIS	Geographic Information System (Sistema Informativo Geografico)
GLONASS	GLObal NAvigation Satellite System
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
HI	Harvest Index
IMHICIHU	Instituto Multidisciplinario de Historia y Ciencias Humanas
INASE	Instituto Nacional de Semillas
INDEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
IoT	Internet of Things
LAI	Leaf Area Index
LiDAR	Light Detection and Ranging
MAP	Fosfato monoammonico
MZs	Management Zones
N	Azoto
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDRE	Normalized Difference Red Edge
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infrared
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OGM	Organismo Geneticamente Modificato
PAR	Photosynthetically Active Radiation

PIL	Prodotto Interno Lordo
QG (GC)	Quality Group (Grupos de Calidad)
REDVI	Red Edge Difference Vegetation Index
RGB	Red, Green and Blue Light
RNC	Registro Nacional de Cultivares
RNDVI	Red-edge Normalized Difference Vegetation Index
RR	Roundup Ready
RTK	Real-Time Kinematic
RUE	Radiation Use Efficiency
RVI	Ratio Vegetation Index
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
SEE	Standard Error of Estimate
SISA	Sistema de Información Simplificado Agrícola
SIWSI	Shortwave Infrared Water Stress Index
SOC	Soil Organic Carbon
SOM	Soil Organic Matter
SWIR	Short Wave Infrared
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UGV	Unmanned Ground Vehicle
USDA	United States Department of Agriculture
USD	US Dollar
USGS	United States Geological Survey
VIs	Vegetation Indices
VRT	Variable Rate Technology
WAAS	Wide Area Augmentation System

PREMESSA

Il presente elaborato si inserisce nel quadro del programma di mobilità internazionale GPSEducation – *Green & Pink for Sustainable Education*, finanziato dal PNRR (Missione 4, Componente 1, Investimento 3.4, Sottomisura T4) e finalizzato al rafforzamento della collaborazione transnazionale tra università italiane e istituti di Africa, Sud America e Sud-est asiatico. Il progetto si articola attorno a quattro aree tematiche – transizione ecologica, strumenti socio-economici per la conservazione del territorio, medicina e innovazione sociale in ottica di genere e didattica sostenibile – ed è orientato agli obiettivi climatici, digitali e di parità di genere.

Nell'ambito di tale iniziativa, nel periodo 20 ottobre – 20 dicembre 2025 ho svolto un tirocinio presso la Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA), sede di Junín. Le attività di ricerca cui ho partecipato, pur non coincidendo con l'oggetto del presente lavoro, hanno riguardato il programma di miglioramento genetico del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), sede di Pergamino (Provincia di Buenos Aires) dal titolo *"Study of variability in maize inbred lines and their association with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under different edaphic and chemical fertility conditions"* incentrato sullo studio della variabilità in linee di mais e sulla sua relazione con i funghi micorrizici in diverse condizioni edafiche e di fertilità. Le attività hanno compreso la quantificazione della simbiosi micorrizica, la determinazione della biomassa e della resa in granella, e l'integrazione di variabili genetiche, morfologiche e agronomiche, con alternanza tra laboratorio, serra e campo.

Il soggiorno ha offerto inoltre l'opportunità di frequentare l'ambiente universitario e il campo sperimentale, partecipando a seminari, lezioni e incontri con operatori del settore, contribuendo così a una più approfondita conoscenza del contesto agricolo argentino.

In questa occasione ho conosciuto l'Ing. Agr. María Paula Melilli, specialista in remote sensing presso l'INTA, che ha gentilmente trasmesso le mappe di resa di frumento di due aziende agricole della zona di Junín. Tali mappe sono state messe a disposizione dall'Ing. Agr. Juan Ignacio Fariña, consulente degli appezzamenti e proprietario dei dati, consentendo la realizzazione del presente progetto di tesi, per il quale la Prof.ssa Roberta Martelli, il Dr. Lorenzo Franciosi e la stessa Ing. Agr. María Paula Melilli mi hanno supportato nella supervisione. A tutti loro va il mio ringraziamento.

A titolo di completezza, si precisa che sistemi di intelligenza artificiale sono stati impiegati, in funzione esclusivamente di supporto, per la redazione dei capitoli, nonché per la creazione e il perfezionamento di alcune delle figure allegate.

ABSTRACT

Il frumento rappresenta una delle principali colture cerealicole a livello mondiale e riveste un ruolo di particolare importanza nei sistemi agricoli estensivi della Pampa argentina. In tale contesto, la caratterizzazione della variabilità produttiva intra-appezzamento rappresenta un elemento fondamentale per l'applicazione di strategie di Agricoltura di Precisione, e l'integrazione tra immagini satellitari ad alta risoluzione e dati di resa georeferenziati può fornire informazioni utili sull'evoluzione spaziale e temporale della coltura.

Il presente studio ha analizzato l'andamento temporale di quattro indici vegetativi (NDVI, NDRE, EVI e RVI), derivati da immagini satellitari PlanetScope SuperDove ad alta risoluzione, e la loro relazione con la variabilità della resa di frumento tenero (*Triticum aestivum* L.) in un appezzamento di circa 100 ha nel partido di Junín (provincia di Buenos Aires, Argentina). Gli indici, calcolati in corrispondenza di cinque date di acquisizione rappresentative di differenti fasi fenologiche, sono stati confrontati con i dati di resa georeferenziati, aggregati su un reticolo di 26.900 celle di 6 × 6 m. La relazione tra indici e resa è stata valutata mediante il coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman (ρ). Tre classi di produttività (Low, Medium e High), individuate mediante clustering K-means della resa, sono state confrontate rispetto ai valori degli indici mediante test di Kruskal–Wallis e relativa dimensione dell'effetto (ε^2). Per NDRE ed EVI sono stati inoltre sviluppati modelli di regressione lineare semplice con la resa.

Le associazioni tra indici vegetativi e resa, trascurabili nella prima acquisizione (ρ compreso tra −0,029 e 0,059), sono progressivamente aumentate nel corso del ciclo, raggiungendo i valori più elevati nelle acquisizioni di ottobre; i coefficienti massimi sono stati osservati per NDRE (ρ = 0,667 il 1° ottobre) ed EVI (ρ = 0,652 il 14 ottobre). Analogamente, la dimensione dell'effetto nel confronto tra le classi di produttività è aumentata nel corso del ciclo, raggiungendo in ottobre i valori più elevati per NDRE (ε^2 = 0,383) ed EVI (ε^2 = 0,362). I modelli di regressione relativi al 1° ottobre hanno fornito i coefficienti di determinazione più elevati, con R^2 = 0,373 per NDRE e R^2 = 0,363 per EVI.

In assenza di una validazione indipendente e considerando la natura di caso singolo (un solo appezzamento e una sola annata agraria), i risultati delle regressioni devono essere interpretati in termini di capacità descrittiva e non consentono, allo stato attuale, di attribuire ai modelli una capacità predittiva generalizzabile. Nel complesso, lo studio evidenzia le potenzialità delle immagini PlanetScope, e in particolare delle informazioni associate alla banda Red Edge, per il monitoraggio ad alta risoluzione della variabilità produttiva del frumento, mostrando come la capacità degli indici di descrivere le differenze di produttività aumenti con l'avanzare del ciclo colturale. I risultati costituiscono una base per studi multitemporali e multisito che integrino informazioni satellitari, pedologiche, topografiche e meteorologiche nei sistemi cerealicoli estensivi della Pampa argentina.

Parole chiave: Precision farming; Frumento tenero; PlanetScope; Telerilevamento; Indici vegetativi.

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Insieme al mais e al riso, il frumento (*Triticum* spp.) è oggi considerato uno dei tre principali cereali coltivati (Shewry, 2009), con circa 765 milioni di tonnellate prodotte ogni anno (Hyles et al., 2020). Più in generale, è la coltura attualmente più diffusa: è coltivato su circa 219 milioni di ettari in tutto il mondo ed è l'alimento base dell'umanità, fornendo agli esseri umani il 18% dell'apporto calorico giornaliero e il 20% delle proteine. Sono diverse le specie che appartengono al genere *Triticum*, delle quali *T. aestivum* L. (frumento tenero) è la più diffusa, ricoprendo il 94% dell'area totale coltivata a frumento, ed è principalmente utilizzata nella trasformazione industriale per la produzione di prodotti da forno (Royo et al., 2017). Tuttavia, la domanda di derrate alimentari nel mercato internazionale è in crescita e la produzione di frumento tenero deve aumentare per poterne soddisfare la richiesta; in questo contesto, sebbene in parte, l'Argentina è in grado di fornire tale produzione, poiché ha il potenziale di produrre cinque volte la quantità di granella richiesta dalla propria popolazione (Curin et al., 2021).

Grazie a questo surplus esportabile, l'Argentina si afferma come il principale produttore ed esportatore di frumento del Sud America e come uno degli attori più importanti nel commercio internazionale di questo cereale (Molfese et al., 2021). La regione corrispondente alla pianura della Pampa, una vasta pianura fertile con un'estensione di 613.532 km² (Aliaga et al., 2017), e la Provincia di Buenos Aires in particolare costituiscono il cuore produttivo argentino: qui si concentra una quota significativa della superficie coltivata e della produzione di frumento. Infatti, la Provincia di Buenos Aires ne è per estensione coltivata la principale area produttrice del paese; nell'annata agraria 2024/25 la superficie destinata a frumento in questa area è stata riportata pari a 2.620.117 ha su un totale nazionale di 6.550.169 ha, cioè circa il 40% dell'area nazionale seminata a frumento (Ministerio de Economía, 2025a). Circa il 90% della quantità media di frumento prodotta a livello nazionale nelle cinque annate agrarie dal 2019/20 al 2023/24 è provenuto dalle provincie di Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba ed Entre Ríos, cui il contributo della provincia di Buenos Aires è stato quello maggioritario (circa 41% del totale nazionale) (Maldonado et al., 2025). Inoltre, qui sono situati 84 impianti molitori,

cioè il 47% del totale dei molini del Paese, e grazie alla loro attività nel 2023 sono state processate 3.100.000 tonnellate di frumento. Di tutti i molini presenti nella provincia, il 51% dispone dell'autorizzazione per esportare, motivo per il quale il territorio bonaerense rappresenta anche una parte significativa delle esportazioni di farine (Pinedo et al., 2024). All'interno della provincia, l'areale oggetto di studio nel presente elaborato è un appezzamento situato nel *partido* di Junín; tale municipalità si trova nella subregione Centro-Nord e presenta generalmente suoli *Mollisol* profondi, pendenze contenute e precipitazioni medie, che rendono l'area particolarmente vocata alla coltivazione estensiva del frumento.

Poiché l'areale tradizionale del Paese per la coltivazione del frumento è una vasta area compresa tra le latitudini 25° e 40°S e le longitudini 58° e 66°W, le zone sono caratterizzate da diverse condizioni agroecologiche e da una significativa variabilità interannuale (Molfese et al., 2021). All'interno di un singolo appezzamento si osservano differenze significative di tessitura, sostanza organica, drenaggio, contenuto idrico e livelli di nutrienti che si traducono in eterogeneità di sviluppo colturale e di resa. Infatti, la produttività del frumento è determinata da molteplici fattori, quali le proprietà del suolo (come tessitura, capacità si scambio cationico o CSC, pH, sostanza organica), le condizioni climatiche stagionali (disponibilità idrica, temperature) e le scelte gestionali (densità di semina, fertilizzazione, trattamenti fitosanitari). Tali fattori sono caratterizzati da componenti statiche (es. topografia, tessitura) e dinamiche (es. contenuto idrico, nitrati) entrambe rilevanti per spiegare la variabilità della resa. Di conseguenza, la variabilità spazio-temporale risultante all'interno dei sistemi agricoli impone la necessità di adottare strumenti in grado di descriverla e quantificarla con risoluzione adeguata, al fine di supportare decisioni agronomiche sito-specifiche.

In questo contesto, l'Agricoltura di Precisione (AdP) fornisce il quadro metodologico e tecnologico per misurare, analizzare e gestire la variabilità all'interno del campo. Attraverso l'integrazione di sensori (remoti e prossimali), sistemi satellitari di navigazione globale (GNSS), sistemi informativi geografici (GIS) e sistemi di supporto alle decisioni, l'AdP consente di definire management zones e mappe di prescrizione per applicazioni a rateo variabile, con l'obiettivo di ottimizzare gli input e migliorare la sostenibilità produttiva ed ambientale. In contesti come l'Argentina l'impiego di AdP presenta opportunità rilevanti, ma devono essere considerate anche le barriere legate a costi, formazione e gestione dei dati.

Un contributo significativo nell'applicazione delle strategie di AdP è dato dal telerilevamento (o remote sensing), che consente di acquisire informazioni spettrali e spaziali sulla vegetazione senza contatto diretto. Dai dati raccolti sulle caratteristiche della coltura

vengono calcolate le firme spettrali, poi tradotte in indici vegetativi (o vegetation indices, VIs) utili per il monitoraggio di, per esempio, vigore, superficie fogliare (o Leaf Area Index, LAI), biomassa e stress idrico. Le piattaforme satellitari moderne offrono diverse risoluzioni spaziali, spettrali e temporali; tra quelle più moderne, le costellazioni di nanosatelliti come PlanetScope, prodotta dall'azienda Planet (Planet Labs, Inc., San Francisco, CA, USA), forniscono immagini con risoluzione spaziale di circa 3 metri ed elevata frequenza di ripresa, caratteristiche particolarmente adatte per applicazioni di AdP su appezzamenti aziendali. Queste immagini permettono di seguire dinamiche fenologiche e di generare serie temporali di VIs con dettaglio spaziale sufficiente per l'analisi della variabilità all'interno dell'appezzamento. I VIs, in generale, combinano i valori di riflettanza in più bande dello spettro elettromagnetico per stimare vigore, LAI, contenuto di clorofilla e, indirettamente, stato nutrizionale e idrico delle piante. In seguito, la generazione di mappe temporali di VIs consente di identificare aree con sviluppo anomalo e di correlare tali pattern con la resa finale. Sono 25 gli indici più comunemente studiati, dei quali il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) è il più diffuso; tuttavia, talvolta presenta criticità, quali la sensibilità al suolo e la saturazione in caso di coperture vegetali dense, che ne limitano l'efficacia per il monitoraggio. Per questo motivo, nel tempo sono stati sviluppati indici corretti, ottenuti sfruttando valori di riflettanza in particolari bande a seconda delle condizioni ambientali e/o delle fasi fenologiche della coltura.

Nel contesto argentino, caratterizzato da vaste superfici coltivate, semina diretta (o no-till) diffusa e una crescente adozione di tecnologie per la gestione efficiente degli input, l'uso combinato di immagini PlanetScope e dati di resa geolocalizzati rappresenta un'opportunità per validare l'efficacia dei VIs nel predire la produttività su scala aziendale e per identificare le fasi fenologiche più informative per il monitoraggio. A tal proposito, con il presente lavoro ci si è posti l'obiettivo di confrontare i dati di resa di frumento geolocalizzati, raccolti da un appezzamento localizzato nella regione della Pampa, con quattro differenti VIs. Gli indici sono stati calcolati da più rilevazioni satellitari eseguite nell'arco del ciclo colturale, per studiarne la dinamica durante le principali fasi dello sviluppo fenologico e stabilirne l'entità della correlazione con la produttività. La prospettiva finale è consistita nell'individuare i VIs più performanti, utili a descrivere la variabilità spazio-temporale rilevata all'interno del campo e, quindi, predire la quantità di granella attesa entro livelli di affidabilità accettabili. In Argentina, in particolare nella regione pampeana, dato il significativo ruolo del Paese nel quadro internazionale dell'approvvigionamento di derrate, stabilire in anticipo i quantitativi della

produzione agraria rappresenta un elemento di importanza strategica e le soluzioni tecnologiche dell'AdP permetterebbero di raggiungere efficacemente questo scopo.

Capitolo 1
CONTESTO AGRICOLO DELL'ARGENTINA, QUADRO NAZIONALE E LOCALE

1.1 **Importanza del settore agricolo nell'economia nazionale**

L'America Latina rappresenta una delle principali aree agricole del pianeta, svolgendo un ruolo strategico sia in termini produttivi sia commerciali. La regione figura tra i maggiori esportatori mondiali di prodotti agricoli e contribuisce in maniera determinante alla sicurezza alimentare globale. In questo contesto, Brasile, Argentina e Paraguay si sono affermati come i principali attori regionali, grazie a un costante incremento delle superfici coltivate, delle rese produttive e dei volumi esportati. Le previsioni indicano che tale tendenza sia destinata a proseguire nei prossimi anni, rafforzando ulteriormente il peso economico e geopolitico dell'agricoltura latinoamericana (OECD & Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025).

Per l'Argentina, il settore agroalimentare – dalla produzione primaria alla trasformazione industriale – costituisce la principale attività economica (Fernández & Fernández, 2011) e rappresenta tuttora la maggiore leva per lo sviluppo del paese (Pereira et al., 2023). Nel 2021, l'agroindustria ha contribuito al 15,7% del PIL nazionale. Le province di Buenos Aires, Santa Fe e Córdoba risultano le principali responsabili del valore aggiunto agricolo totale, con rispettivamente il 25%, il 19,9% e il 13,5% (**Fig. 1.1a**), per un contributo complessivo di poco superiore al 58% (World Bank, 2023). I fattori che hanno consentito all'Argentina di affermarsi come leader globale delle esportazioni già agli inizi del XX secolo includono l'abbondanza di risorse naturali, l'estensione della superficie coltivabile – pari a 33,5 milioni di ettari (**Fig. 1.1b**) – e l'accesso diretto al mare (Ferreyra, s.d.; Pereira et al., 2023). Sebbene il paese abbia perso nel tempo il primato assoluto, il settore agroindustriale mantiene un forte orientamento estero: nel 2024, le esportazioni agroalimentari hanno rappresentato il 60% del totale delle esportazioni argentine (Ministerio de Economía, 2025c) e 57% del valore totale della merce argentina esportata (Centro de Economía Internacional, 2025), posizionando l'Argentina come secondo

esportatore netto di alimenti al mondo (Ministerio de Economía, 2025c) e tra i primi 15 esportatori globali in 129 prodotti agroalimentari (Centro de Economía Internacional, 2025).

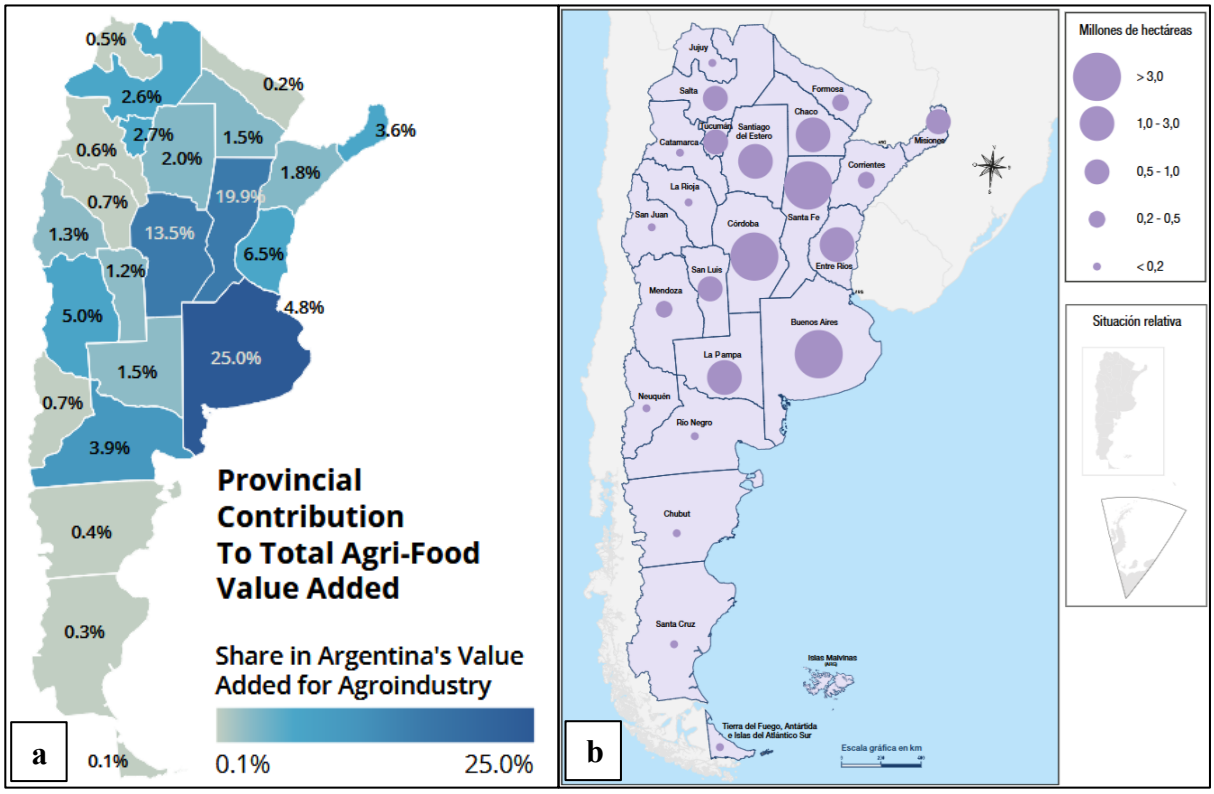


Fig. 1.1 – **a**) contributo al valore aggiunto agricolo totale per provincia (World Bank, 2023); **b**) distribuzione nazionale delle superfici coltivate in ettari (INDEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina, s.d.)

1.2 **Principali produzioni e commercio estero**

La regione pampeana, contraddistinta da condizioni climatiche temperate e dalla maggiore produttività del paese (Ferreyra, s.d.; Fernández & Fernández, 2011), ha storicamente svolto un ruolo determinante nel posizionamento internazionale dell'Argentina. La sua rilevanza nell'economia nazionale deriva sia dai guadagni generati dalle esportazioni e dalla relativa tassazione, sia dalla capacità di soddisfare gran parte del fabbisogno alimentare della popolazione (Ferreyra, s.d.).

Le principali filiere agricole del paese, in ordine decrescente di incidenza economica, sono quelle di soia, mais, carne bovina, frumento e prodotti lattiero-caseari. Complessivamente, esse determinano circa il 70% del valore aggiunto prodotto dall'intero comparto agroalimentare (**Fig. 1.2**), e tale rilevanza si riflette analogamente nelle esportazioni (Consejo Agroindustrial Argentino, 2023). Il saldo commerciale del settore agroalimentare è strutturalmente positivo. Nel 2022 il surplus netto è stato di 45,6 miliardi di USD, riducendosi a 24,9 miliardi nel 2023

(OECD, 2025). Nel 2024, le filiere leader nell'export sono risultate quella sojera, mais, carni e frumento, con incidenze rispettivamente del 42%, 16%, 8% e 6% sul valore totale delle esportazioni del settore (Centro de Economía Internacional, 2025). Le importazioni, pur mostrando negli ultimi anni una lieve tendenza all'aumento, rimangono contenute in proporzione all'export (**Fig. 1.3**).

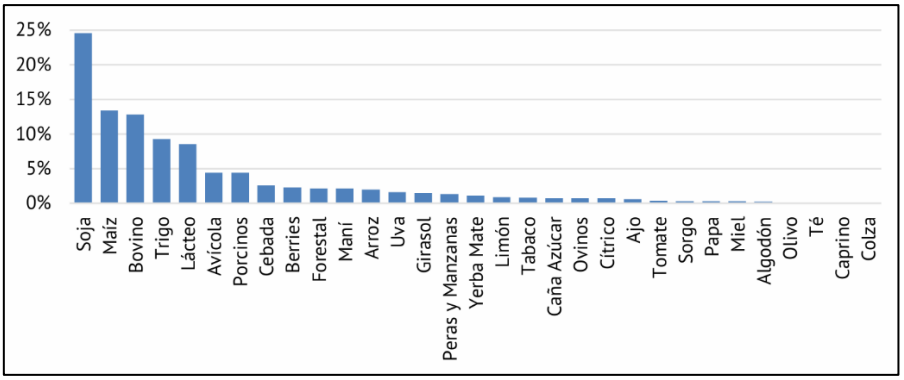


Fig. 1.2 – Distribuzione del contributo di ciascuna filiera agroalimentare al valore aggregato lordo (Consejo Agroindustrial Argentino, 2023).

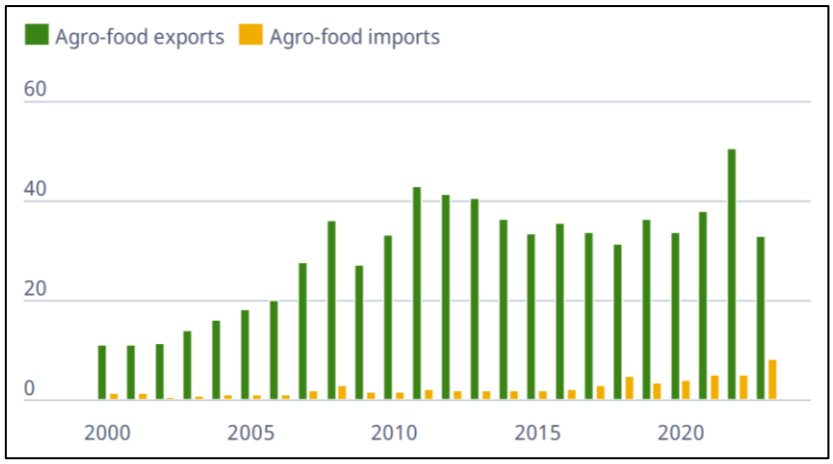


Fig. 1.3 – Valori di export e import agroalimentare in Argentina nel periodo 2000-2023 in USD milioni (OECD, 2025).

1.3 **Pratiche agricole tradizionali e recenti evoluzioni**

A partire dalla seconda metà dell'Ottocento e per circa un secolo, l'agricoltura argentina – basata sulla cerealicoltura e sull'allevamento – ha seguito modelli tradizionali simili a quelli europei. Fino alla metà del Novecento, l'espansione delle superfici coltivate e dei pascoli è avvenuta principalmente attraverso l'occupazione di nuovi terreni. Tuttavia, l'alternanza di periodi siccitosi e piovosi, unitamente a precipitazioni intense di breve durata, ha reso tali pratiche sempre più esposte al rischio di erosione idrica ed eolica (Pereira et al., 2023). A partire

dagli anni Settanta, tali criticità hanno favorito l'adozione e la diffusione di tecniche conservative di gestione dei sistemi agricoli, con particolare riferimento alla semina diretta (*no-tillage* o *no-till*). Questa tecnica, che prevede l'immissione del seme nel terreno senza effettuare una lavorazione preliminare, consente di mantenere in superficie i residui colturali, proteggendo il suolo e migliorandone le caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche (Castilla, 2013). Da oltre un decennio, circa il 90% della superficie agricola argentina è coltivata con tale sistema, che rappresenta il fulcro della strategia produttiva nazionale (Consejo Agroindustrial Argentino, 2023).

I benefici sono molteplici: ridotta ossidazione della sostanza organica, maggiore stabilità degli aggregati, conservazione dei canali biogenici (lombrichi e radici) che favoriscono l'infiltrazione, diminuzione dell'evaporazione, protezione dall'impatto delle piogge e conseguente mitigazione del ruscellamento e dell'erosione (Castilla, 2013; Consejo Agroindustrial Argentino, 2023). L'incremento di produzione e produttività registrato negli ultimi decenni è ascrivibile non solo alla diffusione del *no-tillage* e all'introduzione di macchinari adeguati, ma anche all'impiego di nuovi input agronomici, al potenziamento delle capacità di stoccaggio e all'utilizzo di sementi OGM (per soia, mais e cotone) (Saini & Lema, 2015). Tuttavia, è sui principi dell'agricoltura conservativa – o *agricoltura blu* – che il paese ha fondato il proprio processo di intensificazione sostenibile. Tale approccio si basa su tre pilastri: minima alterazione del suolo, copertura permanente con residui o colture di copertura, e rotazione colturale. L'agricoltura conservativa consente inoltre di aumentare il sequestro di carbonio e, se integrata con altre pratiche, di ridurre l'uso di fitofarmaci e fertilizzanti chimici. In tal senso, si registra un incremento degli agricoltori che adottano strumenti per un uso più efficiente degli input (campionamenti del suolo, applicazioni a rateo variabile) e un crescente ricorso a input biologici quali biofertilizzanti e biopesticidi (Consejo Agroindustrial Argentino, 2023).

1.4 **La regione oggetto di studio**

La Provincia di Buenos Aires è situata nella pianura della Pampa che, insieme a quella del Chaco, costituisce una delle due regioni agricole più produttive dell'Argentina (**Fig. 1.4**). Fin dal XIX secolo essa rappresenta il principale polo agricolo del Paese e concentra una quota rilevante della produzione e delle esportazioni agroalimentari nazionali. Il presente studio è

stato condotto nel *partido* di Junín, situato nella regione Centro-Nord della provincia di Buenos Aires.

1.4.1 *Caratteristiche pedoclimatiche*

La regione pampeana è una vasta pianura fertile, con un'estensione di 613.532 km² che comprende diverse province, e la sua economia è basata sulla produzione agricola e zootecnica industriale (Aliaga et al., 2017). Situata nell'Argentina centro-orientale, tra la regione sub-tropicale e le medie latitudini della fascia temperata, presenta un clima temperato e umido (Aliaga et al., 2017; Pérez et al., 2019). La vicinanza all'Oceano Atlantico determina contenute escursioni termiche giornaliere e annuali rispetto ad aree dell'emisfero boreale a latitudini simili (Aliaga et al., 2017). I venti predominanti provengono da est, originati dall'anticiclone semipermanente della costa brasiliana, e apportano aria calda e umida per tutto l'anno, con un gradiente di umidità decrescente da est a ovest (Pérez et al., 2019).

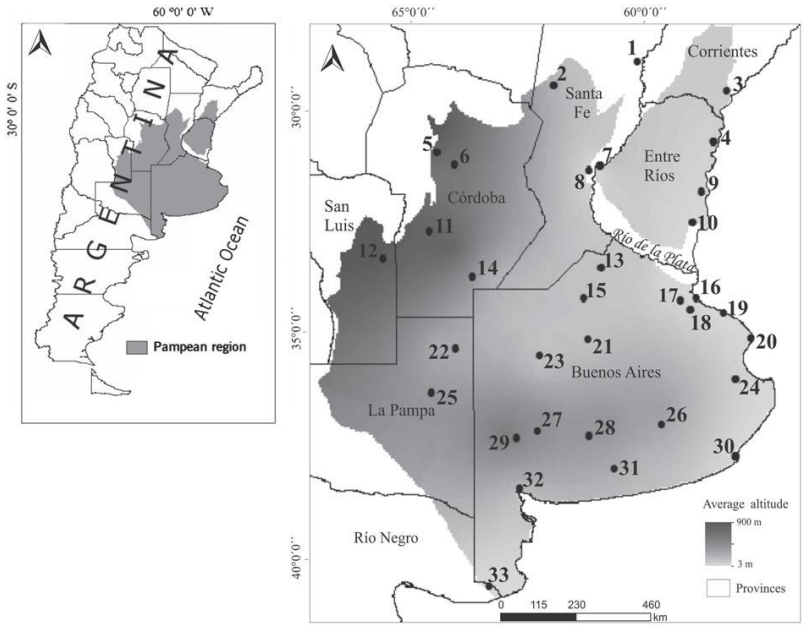


Fig. 1.4 – Regione pampeana; a destra è riportata l'ubicazione delle stazioni meteorologiche (Aliaga et al., 2017).

La pianura è soggetta a lunghi periodi di siccità e allagamenti, che influenzano la disponibilità idrica, la produttività dei sistemi agricoli e le attività antropiche. Le precipitazioni diminuiscono da nord-est a sud-ovest, determinando all'interno della regione pampeana il passaggio da un clima umido e caldo a uno semi-arido. L'area orientale è umida sub-tropicale e sub-umida, mentre il nord-ovest è caratterizzato da steppe a clima caldo e secco; a ovest il clima è secco e freddo, mentre a sud-ovest è arido e freddo. Le temperature medie annuali diminuiscono da nord a sud (Aliaga et al., 2017).

Fino agli anni Settanta, i sistemi agricoli della regione pampeana erano caratterizzati da rotazioni tra colture annuali e prati-pascolo destinati all'allevamento bovino. Questo modello produttivo, basato sull'integrazione tra agricoltura e zootecnia, contribuiva al mantenimento della fertilità dei suoli e alla sostenibilità dell'agroecosistema.

1.4.2 *Uso del suolo e sistemi colturali*

A partire dagli anni Settanta ha avuto inizio un progressivo processo di conversione delle superfici tradizionalmente destinate ai pascoli verso coltivazioni agricole permanenti. Tale trasformazione è stata favorita da una combinazione di fattori, tra cui l'aumento delle precipitazioni in alcune aree della Pampa, l'evoluzione tecnologica del settore agricolo e la crescente domanda internazionale di prodotti agricoli (Pérez et al., 2019).

Negli anni Novanta e Duemila questo processo ha subito un'ulteriore accelerazione grazie alla diffusione della semina diretta, all'impiego di erbicidi ad ampio spettro e all'introduzione delle varietà di soia geneticamente modificate tolleranti al glifosato. In questo contesto la soia è divenuta la coltura economicamente più competitiva, determinando una rapida espansione delle superfici coltivate a suo favore (**Fig. 1.5**) e una progressiva riduzione dell'importanza relativa di altre produzioni agricole e zootecniche della regione (Conte et al., s.d.).

La crescente specializzazione produttiva ha comportato una semplificazione delle rotazioni colturali e, in molte aree, la diffusione di successioni dominate dalla soia o da sistemi a ridotta diversificazione colturale (Conte et al., s.d.; Cano et al., 2025).

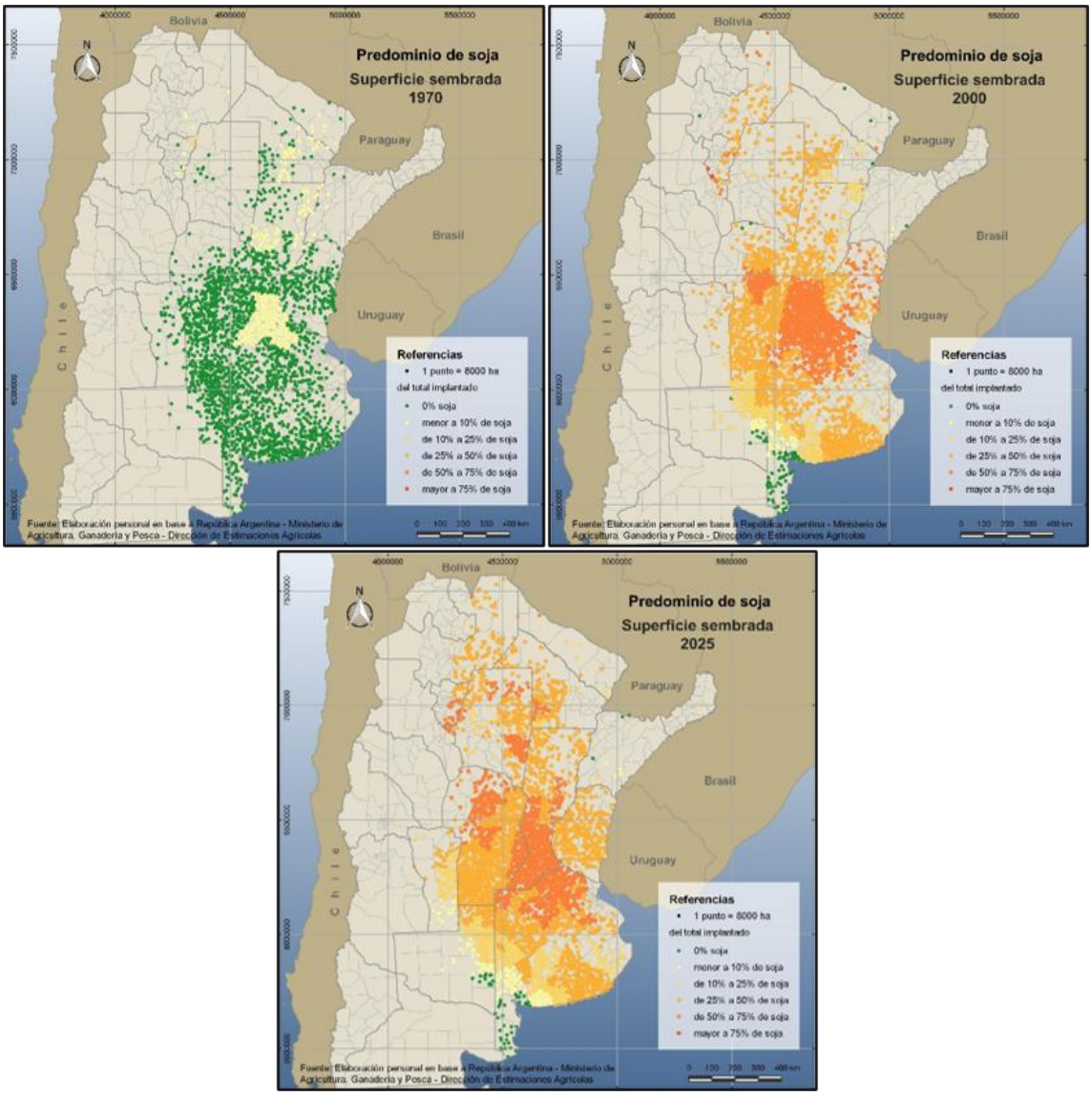


Fig. 1.5 – Incidenza della soia per unità di superficie seminata, andando da sinistra a destra, nel 1970, 2000 e 2025 (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) & Instituto Multidisciplinario de Historia y Ciencias Humanas (IMHICIHU), s.d.).

La diffusione di rotazioni semplici ha determinato problemi ambientali quali riduzione della fertilità dei suoli, perdita di biodiversità e squilibri nutrizionali (in particolare per azoto e fosforo), rendendo necessario il ricorso a rotazioni più complesse per un'intensificazione sostenibile della produzione agricola (Cano et al., 2025).

1.4.3 *Principali produzioni agricole locali*

La Provincia di Buenos Aires riveste un peso significativo nell'economia agricola nazionale (**Fig. 1.6**), qui è localizzata circa il 50% della superficie seminata del paese e vi si concentra circa il 56% del totale delle esportazioni argentine di carne bovina, il 44% di quelle

cerealicole e il 32% di quelle oleaginose. Tra le principali colture della provincia, oltre all'allevamento, figurano soia, mais, frumento, girasole e, talvolta, orzo. Le tendenze produttive hanno subito nel tempo diverse variazioni, per via dell'adozione di innovazioni che hanno consentito significativi incrementi di produttività per alcune colture. Caso emblematico è quello della soia: dopo l'approvazione della varietà transgenica Roundup Ready (RR), resistente al glifosato, nel 1996 con una risoluzione della *Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca*, la produzione è passata da 12 a 30 milioni di tonnellate tra le annate agrarie 1991/1992 e 2000/01, raggiungendo 60 milioni nel 2015/16 (Bona, 2021; Conte, 2019). A ciò si aggiungono il crescente impiego del glifosato, la diffusione della semina diretta (spesso abbinata al controllo chimico delle infestanti e alla fertilizzazione di precisione (Castilla, 2013)), nonché le politiche delle diverse amministrazioni che si sono succedute e le dinamiche dei mercati internazionali (Bocchio et al., 2019; Bona, 2021; Conte, 2019). Differenze produttive si riscontrano anche a livello territoriale; risulta pertanto utile analizzare gli andamenti per singole aree, secondo la suddivisione in sette zone stabilita dal Governo della Provincia di Buenos Aires nel 2011, ad esclusione della Regione Metropolitana di Buenos Aires (**Fig. 1.7**) (Bona, 2021).

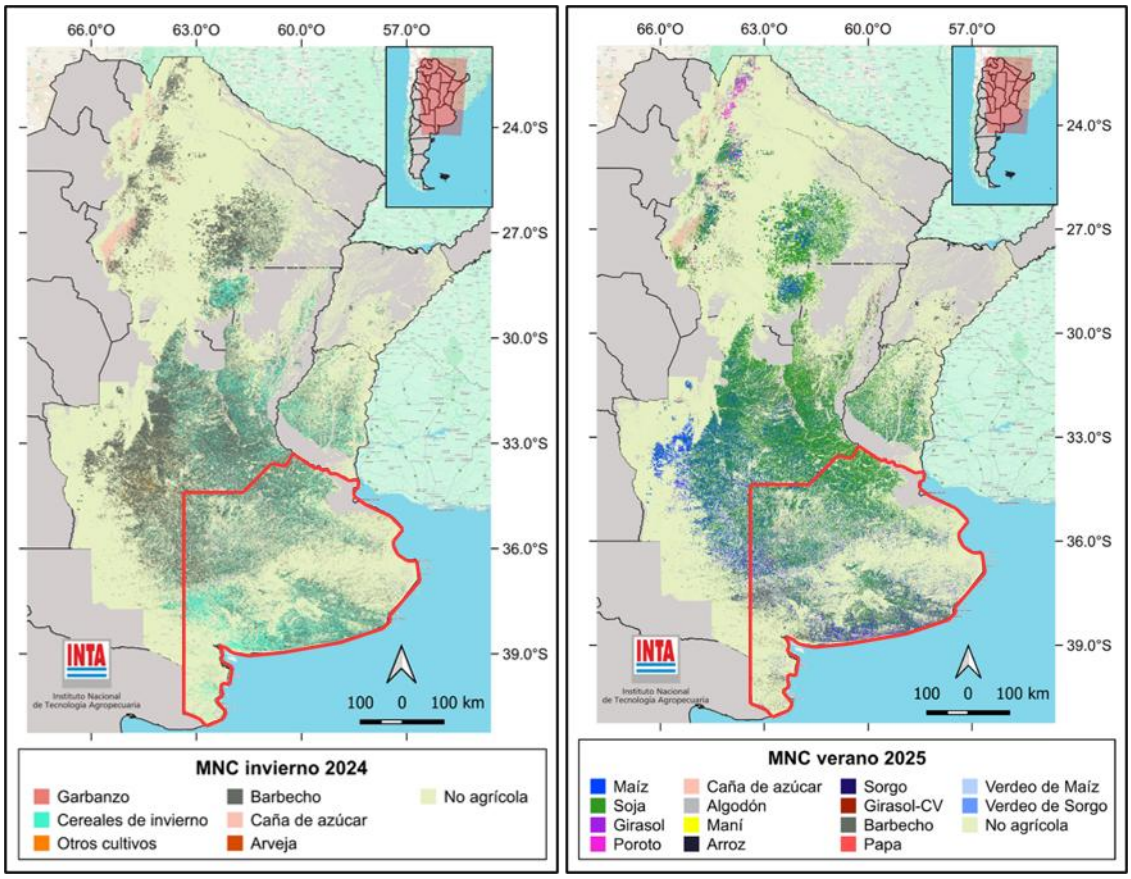


Fig. 1.6 – Mappa nazionale di distribuzione delle colture nell'annata agraria 2024/2025: a sinistra, inverno 2024; a destra, estate 2025. In rosso: Provincia di Buenos Aires (De Abelleyra et al., 2025).

La regione del Centro-Nord, insieme a quella del Cordón Norte, rappresenta l'area di produzione agricola più importante del paese, e in essa si trova il *partido* di Junín, i cui terreni sono oggetto del presente studio. Il Centro-Nord si distingue per la produzione di soia, mais e frumento, con quantitativi compresi tra il 20% e il 26% del totale provinciale. Grazie all'elevata fertilità dei suoli, la destinazione principale delle derrate è il mercato globale, mentre l'allevamento bovino ha qui un ruolo secondario. In quest'area, la superficie destinata alla soia, marginale fino agli anni Settanta, ha registrato una crescita straordinaria a partire dagli anni Ottanta e Novanta. Il girasole ha perso rilevanza dalla fine degli anni Novanta; il mais è rimasto stabile, mentre il frumento ha subito una contrazione tra il 1998/99 e il 2014/15. Successivamente, con i cambiamenti introdotti dalla nuova amministrazione, la superficie seminata a frumento è raddoppiata tra il 2014/15 e il 2018/19, e anche il mais ha registrato un consistente aumento, con conseguente riduzione della superficie coltivata a soia (**Fig. 1.7**) (Bona, 2021).

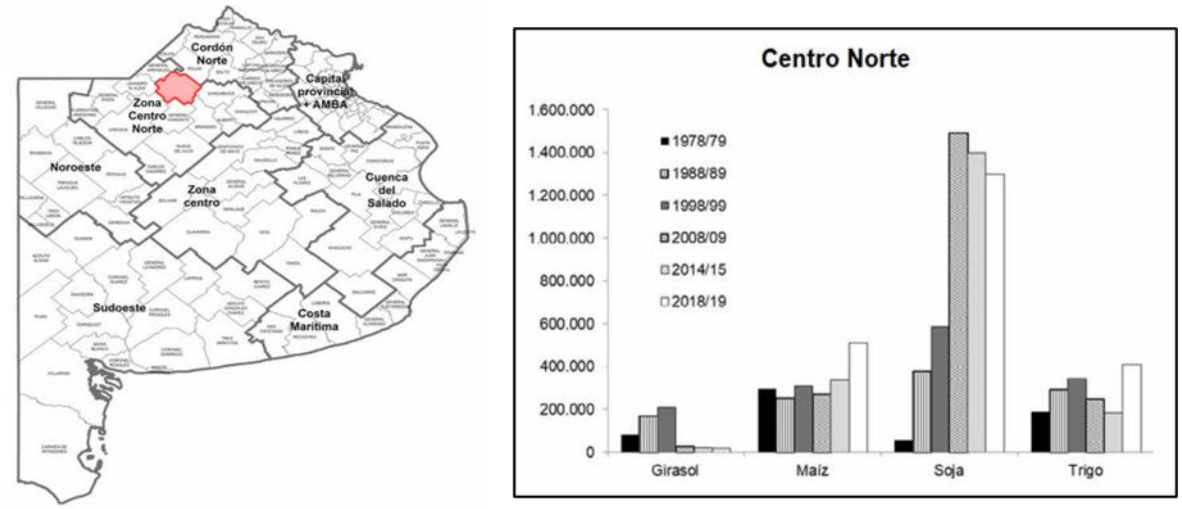


Fig. 1.7 – A sinistra: regioni produttive della provincia di Buenos Aires (in rosso: partido di Junín, situato nella regione Centro-Nord); a destra: evoluzione della superficie seminata di girasole, mais, soia e frumento nella regione Centro-Nord (Bona, 2021).

1.4.4 *Il partido di Junín*

Il *partido* di Junín è situato nel nord-ovest della provincia di Buenos Aires, o centro-nord secondo la suddivisione di Bona (2021) (**Fig. 1.7**). Pur essendo distante dalla capitale e da altri importanti centri logistici provinciali, gode di una posizione strategica: le infrastrutture che lo attraversano facilitano l'accesso ai principali porti esportatori del paese, quali Rosario (circa 220 km), San Nicolás (circa 170 km) e Buenos Aires (circa 260 km). All'interno di questo quadro regionale, il *partido* di Junín rappresenta un caso emblematico delle dinamiche descritte,

combinando condizioni pedoclimatiche favorevoli con una storia agricola che riflette le principali trasformazioni della Pampa. La caratterizzazione fisico-produttiva del territorio è stata realizzata da Melilli (2026), integrando informazioni climatiche, edafiche, topografiche e sull'uso del suolo mediante sistemi informativi geografici (GIS). Il *partido* di Junín, come già accennato, si trova nella regione della Pampa e presenta un clima temperato umido. Le estati sono calde e gli inverni freschi, con una temperatura media annua di circa 16-17°C. Le precipitazioni medie annue sono comprese tra 900 e 1100 mm, ma con elevata variabilità annuale dovuta a fenomeni regionali quali El Niño e La Niña. Il rilievo è prevalentemente pianeggiante, con altitudini comprese tra 68 e 89 m s.l.m., e pendenze inferiori all'1%, che favoriscono l'accumulo di acqua nelle aree depresse, con formazione di bacini e lagune temporanee.

Le caratteristiche pedologiche e la conseguente capacità d'uso del suolo riflettono la posizione geografica nell'ambito della regione pampeana. Il *partido* si trova infatti in una zona di transizione tra la Pampa Ondulata (nord della provincia di Buenos Aires) e la Pampa Arenosa (aree più occidentali). I suoli sono prevalentemente *Mollisol*, specialmente nelle aree a maggiore altitudine, con buon drenaggio naturale. L'orizzonte A è scuro e profondo, ricco di sostanza organica, con struttura granulare stabile e ottima capacità di ritenzione idrica e nutrizionale; tali caratteristiche conferiscono a questi suoli un'eccellente attitudine agricola, consentendo buoni risultati anche in regime di agricoltura conservativa. Secondo la classificazione USDA della capacità d'uso dei terreni, nel *partido* di Junín le classi I e II – corrispondenti a suoli ad elevata attitudine agricola – costituiscono la maggior parte del territorio produttivo (circa il 50% della superficie municipale) e sono localizzate prevalentemente nelle aree a maggiore altitudine. Con la diminuzione dell'altitudine, i suoli presentano dapprima un'idoneità agricola moderata (classi III e IV, pari al 32% della superficie, caratterizzate da terreni sodi e suscettibili a inondazioni), quindi forti limitazioni d'uso per inondazioni e bassa permeabilità (classi da V a VIII, che coprono il 18% del territorio), il cui impiego è limitato all'allevamento estensivo.

Per quanto riguarda la produzione primaria, la coltivazione di colture estensive rappresenta il principale uso del suolo nel *partido*. Durante le stagioni invernali, si distinguono tre categorie di impiego: cereali invernali (prevalentemente frumento), maggese e usi non agricoli (**Tab. 1.1**). Sebbene i cereali invernali svolgano un ruolo fondamentale nelle rotazioni agricole, al maggese viene dedicata una quota estesa, funzionale ad altre esigenze quali la gestione idrica o il controllo delle infestanti. In estate, in linea con la situazione provinciale, le colture principali

sono soia e mais; si osserva una crescita della superficie a girasole, sebbene il divario con soia e mais rimanga notevole (**Tab. 1.1**). Complessivamente, nei sistemi agricoli estensivi del *partido* di Junín prevale la rotazione soia-mais-frumento, con una significativa quota di maggese soprattutto in inverno. Negli ultimi anni si registrano comunque segni di espansione di colture alternative (girasole, sorgo, piselli, arachidi), alla base di nuove strategie di diversificazione e gestione del rischio.

Tab. 1.1 – Superficie seminata delle principali colture o tipologie di colture nel partido di Junín per annata agraria, in ettari (Melilli, 2026).

Inverno			
	2022	*2023*	*2024*
Cereali invernali	37.900	38.300	33.700
Maggese	94.000	104.300	103.600

Estate			
	2022/23	*2023/24*	*2024/25*
Soia	106.600	105.700	104.600
Mais	25.100	35.400	31.700
Girasole	-	23	458

Capitolo 2
IL FRUMENTO TENERO IN ARGENTINA E NELL'AREA DI STUDIO

2.1 **Caratteristiche della coltura**

2.1.1 *Diffusione, aspetti botanici e ciclo colturale*

Tra tutte le piante addomesticate, il frumento (*Triticum* spp.) è forse quella che meglio riassume il percorso storico dell'uomo. In ogni tempo e in ogni luogo l'esistenza di una civiltà agricola stanziale si è manifestata prima di tutto attraverso la coltivazione dei campi di frumento (Blanco et al., 2007). La sua origine è verosimilmente localizzata nella regione della "Mezzaluna fertile", in Mesopotamia, tra il Tigri e l'Eufrate. La prima coltivazione risale a circa 10.000 anni fa, nel corso della Rivoluzione neolitica (Blanco et al., 2007; Simón & Golik, 2022). Da qui, l'agricoltura e le prime coltivazioni di frumento si diffusero verso l'Europa occidentale nell'età della pietra. Nelle Americhe, invece, il frumento ha una storia più recente, essendo stato introdotto nella prima metà del XVI secolo in Messico, Perù e Cile (Baldoni & Giardini, 2000). Oggi il frumento, insieme a mais e riso, è considerato uno dei tre principali cereali coltivati (Shewry, 2009), con circa 765 milioni di tonnellate prodotte ogni anno (Hyles et al., 2020). Più in generale, il frumento rappresenta la coltura attualmente più diffusa a livello mondiale, essendo coltivato su una superficie di circa 219 milioni di ettari e costituendo l'alimento base dell'umanità: fornisce infatti il 18% dell'apporto calorico giornaliero e il 20% dell'apporto proteico a livello globale (Royo et al., 2017).

A livello globale, le regioni più produttive negli ultimi anni sono state l'Asia e l'Europa con, rispettivamente, circa il 44% e il 34% della produzione totale (**Fig. 2.1**).

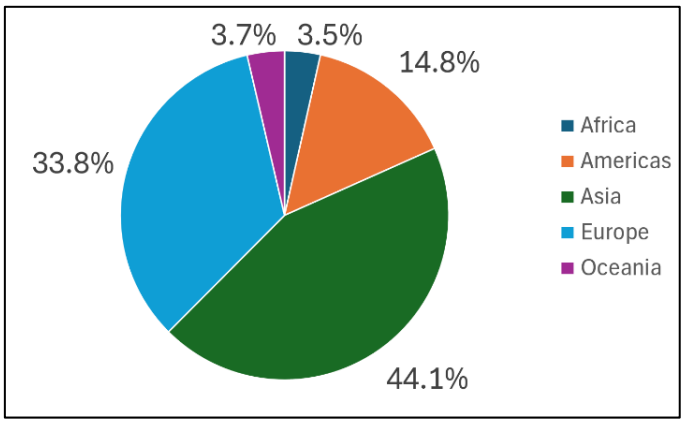


Fig. 2.1 – Contributo medio alla produzione di frumento nel mondo, periodo 2015-2024. (FAOSTAT, s.d.).

Con il termine "frumento" o "grano" si indicano comunemente diverse specie del genere Triticum, appartenente alla famiglia delle *Poaceae* (o *Graminaceae*), che include anche molti altri cereali di interesse agronomico (Blanco et al., 2007). Le due specie di maggiore rilevanza commerciale sono il frumento tenero o comune (*Triticum aestivum* L.) e il frumento duro (*Triticum turgidum* L. var. *durum*). Il frumento tenero occupa circa il 94% della superficie mondiale dedicata al frumento ed è utilizzato prevalentemente per la panificazione e la produzione di prodotti da forno. Il frumento duro, che rappresenta la restante superficie, è destinato principalmente alla produzione di pasta alimentare e ad altri prodotti tipici del bacino del Mediterraneo, dove si concentra il 60% della sua coltivazione. Dal punto di vista genetico, le due specie differiscono per il numero di cromosomi: il frumento duro è tetraploide, mentre il frumento tenero è esaploide (Royo et al., 2017).

Le principali fasi fenologiche del frumento sono caratterizzate da cambiamenti morfologici facilmente osservabili. Tra le diverse scale impiegate per descrivere il ciclo biologico, quella più utilizzata è la scala di Zadoks, basata sulla morfologia esterna della pianta (**Fig. 2.2**) (Baldoni & Giardini, 2000; Simón & Golik, 2022).

Il ciclo biologico del frumento ha inizio con la germinazione della cariosside, che precede lo sviluppo della plantula fino all'emergenza. La germinazione avviene in assenza di dormienza, ma richiede specifiche condizioni: una profondità di semina di 2-3 cm, un'umidità del terreno compresa tra il 60% e l'80% della capacità di campo (affinché la cariosside possa assorbire acqua fino al 45% del suo peso secco) e temperature comprese tra 4°C (minima) e 37°C (massima), con optimum tra 12 e 25°C. La scelta del periodo di semina, pertanto, risulta fondamentale e dipende dalle condizioni territoriali e dalla preparazione del terreno. Le sostanze di riserva dell'endosperma vengono mobilitate verso l'embrione, che inizia ad

accrescersi. Dalla cariosside fuoriesce dapprima l'apice radicale, protetto dalla coleorriza, quindi l'apice del germoglio, coperto dal coleottile, che si sviluppa verso la superficie per allungamento del primo internodo embrionale (epicotile). Dopo circa 10 giorni dalla semina emerge la prima fogliolina, che avvia i processi fotosintetici, sebbene il germoglio dipenda ancora dalle riserve del seme. In condizioni favorevoli, la piantina entra in piena attività dopo l'emissione delle prime 2-3 foglie.

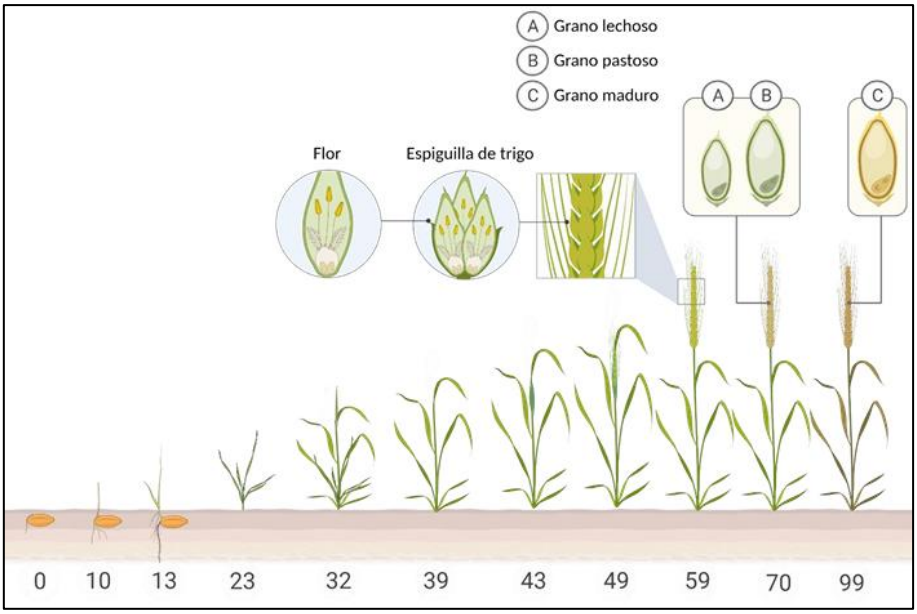


Fig. 2.2 – Rappresentazione del ciclo biologico del frumento mediante scala di Zadoks. La scala si basa su un codice a doppia cifra: la prima definisce gli stadi di crescita (0: germinazione; 1: crescita del germoglio; 2: germogliamento, 3: allungamento del fusto; 4: guaina in accrescimento; 5: emergenza dell'infiorescenza; 6: fioritura; 7: maturazione lattea; 8: maturazione cerosa; 9: maturazione fisiologica), la seconda può indicare il numero di foglie, germogli, nodi o altro, a seconda dello stadio considerato (Simón & Golik, 2022).

Dopo l'emergenza, lo sviluppo prosegue con l'emissione di nuove foglie e il differenziamento di nuovi primordi fogliari all'apice vegetativo. All'ascella di ogni foglia si sviluppa una gemma, da cui origina un culmo di accestimento, che emette proprie foglie e radici avventizie. Questa fase, detta accestimento, varia in funzione della densità di semina e del ritmo di emissione dei culmi, che dipende dall'andamento termico e dalla durata del giorno. In genere, un buon accestimento si raggiunge con l'emissione di 2-3 culmi secondari per ciascun culmo principale. Durante questa fase, ogni culmo emette nuove foglie ma gli internodi restano brevi. Nelle semine autunnali, l'accestimento si protrae per tutto l'inverno e parte della primavera. Nel frattempo, a livello degli apici vegetativi, avvengono modificazioni morfologiche per la differenziazione degli elementi dell'infiorescenza (spighette, glume e glumette). A temperature

superiori a 7-8°C inizia la levata, caratterizzata dall'allungamento rapido degli internodi a partire da quelli basali, in corrispondenza della differenziazione della spighetta terminale. L'emissione di nuove foglie prosegue e, all'ultima foglia apicale, si osserva un ingrossamento della guaina dovuto alla spiga in accrescimento (stadio di botticella). La completa fuoriuscita della spiga (spigatura), sotto la spinta dell'ultimo internodo, avviene dopo 10-20 giorni, a seconda della temperatura. In genere, lo sviluppo dell'apparato radicale si completa prima della spigatura. Pochi giorni dopo la spigatura, e prima della fioritura, all'interno di ciascun fiore della spiga avviene l'impollinazione. Circa una settimana dopo la spigatura inizia la fioritura, con la fuoriuscita delle antere dalle glumette, e ha una durata di circa 10 giorni. Dopo la fecondazione, in circa 40 giorni si sviluppa l'embrione e nell'endosperma si accumula amido, determinando un aumento del peso secco della cariosside. Il contenuto assoluto di acqua aumenta fino al suo massimo allo stadio di maturazione lattea (65-70% di umidità), durante il quale l'endosperma consiste in una sospensione lattiginosa di amido e proteine. Raggiunto il massimo peso secco, la cariosside è allo stadio di maturazione latteo-cerosa (umidità 45-50%). Il tenore di umidità si riduce ulteriormente (circa 30%) e l'endosperma condensa in una massa cerosa (stadio di maturazione cerosa), fino a raggiungere, dopo ulteriore essiccamento, la maturazione piena (umidità circa 15%) (Baldoni & Giardini, 2000; Blanco et al., 2007; Simón & Golik, 2022).

2.1.2 *Determinanti della resa e principali fattori limitanti*

La resa in granella del frumento può essere espressa come il prodotto tra il peso della singola cariosside (calcolato a partire dal peso di 1000 cariossidi) e il numero di cariossidi per unità di superficie (n. cariossidi/m²). Il numero di cariossidi/m² è legato alle condizioni ambientali in cui avviene la fioritura. Secondo l'approccio di Fischer (1983) per la valutazione della resa potenziale – intesa come resa in assenza di limitazioni idriche e nutrizionali – tale parametro deve essere valutato 7 giorni dopo la fioritura. Il peso delle cariossidi, invece, dipende dalla fase di riempimento della granella.

In generale, la variabilità della resa del frumento è governata dall'interazione tra fattori statici, quali le proprietà del suolo (tessitura, pH, capacità di scambio cationico o CSC, sostanza organica) e la topografia, e fattori dinamici, quali il clima stagionale e la gestione agronomica. I fattori limitanti la resa possono essere di varia natura, spaziando da precipitazioni e temperatura (Andrade & Satorre, 2015) alla disponibilità d'azoto (Romano et al., 2015), ma un'influenza può essere esercitata anche dall'interazione tra disponibilità idrica, proprietà del

suolo, posizione nel paesaggio e vincoli climatici nelle fasi riproduttive (Basso et al., 2009; Fernández-Long et al., 2025; Verón et al., 2004). Diacono et al. (2012) evidenziano come la variabilità spaziale delle proprietà del suolo, specialmente il contenuto idrico, influenzi la crescita e la resa intra-appezzamento del frumento; infatti, come sostenuto dagli stessi autori, la carenza idrica durante la crescita vegetativa e in prossimità della fioritura determina una perdita di produzione per via della riduzione del n. cariossidi/m², mentre siccità ed elevate temperature durante la fase di accumulo della biomassa secca nella granella può ridurre il peso medio per cariosside, in seguito al rallentamento della traslocazione dei fotosintetati. Basso et al. (2009), invece, hanno valutato anche l'interazione della topografia con le precipitazioni, dimostrando che pure la posizione del paesaggio può contribuire a creare variabilità. Tra i fattori limitanti di tipo statico, anche la sostanza organica (Soil Organic Matter, SOM) interagisce positivamente con la capacità di ritenzione idrica, riducendo il gap di resa su scala regionale (De Paepe & Álvarez, 2016).

Le temperature elevate durante la fase riproduttiva riducono la resa attraverso l'accorciamento della fioritura e la minore radiazione incidente (García et al., 2018). Infatti, la data di antesi è un forte determinante del potenziale di resa: un ritardo di 10 giorni produce cambiamenti sostanziali nel numero e peso della granella a seconda della latitudine (Menéndez & Satorre, 2007).

Le carenze nutrizionali rappresentano un altro fattore limitante per la produzione. In caso di carenza di azoto (N), la crescita della pianta risulta stentata per una ridotta efficienza d'uso dell'energia radiante, a causa dell'insufficiente superficie fogliare sviluppata; inoltre, viene compromessa la fertilità delle spighe, con conseguente riduzione del numero di cariossidi/m². La carenza di fosforo, invece, produce un effetto simile sullo sviluppo fogliare ma non compromette la fertilità della spiga, poiché i suoi effetti si manifestano prevalentemente nelle fasi precedenti la fioritura (Abbate, 2004). Anche nella disponibilità di nutrienti, in particolare N, la sostanza organica ricopre un ruolo significativo, poiché, come dimostrato da Martínez et al. (2018), nei suoli ad alta fertilità, cioè più ricchi di carbonio organico (Soil Organic Carbon, SOC), le previsioni di resa e assorbimento di N migliorano significativamente combinando disponibilità idrica e mineralizzazione, mentre nei suoli a bassa fertilità le precipitazioni sono il fattore limitante principale ad influenzare la resa. Inoltre, un adeguato approvvigionamento di N è cruciale per migliorare la tolleranza alla siccità del frumento, aumentando il contenuto di clorofilla e la capacità antiossidante e prolungando il periodo di riempimento della granella, determinando l'incremento del peso delle cariossidi e della resa (Cao et al., 2026).

Tra i fattori dinamici di gestione, la protezione da patogeni e infestanti non è di carattere secondario, poiché la resa del frumento è influenzata anche da stressori di natura biotica (quali fitofagi, patogeni e infestanti) oltre a quelli di natura abiotica (Alisaac & Mahlein, 2023). Le malattie fungine sono una delle principali cause biotiche di perdita nel frumento, con perdite annuali nell'ordine del 15–20%. A contribuire in misura significativa sono oggi soprattutto le ruggini, le maculature e la fusariosi della spiga/scabbia. Non vanno trascurate, inoltre, malattie di recente emergenza o relativamente sottovalutate, quali il wheat blast e la maculatura bruna, che esercitano anch'esse una pressione sulla produzione di granella (Figueroa et al., 2018). Le malattie fogliari riducono la durata della superficie fogliare sana e l'intercettazione della radiazione durante il riempimento, con cali di biomassa e resa soprattutto per minore assorbimento di luce più che per variazioni dell'efficienza dell'uso della radiazione (Radiation Use Efficiency, RUE) (Serrago et al., 2009). Le malattie della spiga, invece, come la fusariosi (o Fusarium head blight), determinano un'importante perdita di resa e qualità commerciale, introducendo il problema delle micotossine, in particolare il deossinivalenolo (DON) (Horo et al., 2026).

Infine, come già enunciato da Diacono et al. (2012), alla luce delle suddette evidenze anche la gestione agronomica, insieme a tratti genetici, proprietà del suolo e condizioni climatiche, concorre a determinare la resa. Gli autori hanno riconosciuto che nelle zone aride il frumento in monocoltura utilizza la risorsa idrica e l'N in modo meno efficiente e suggeriscono che l'introduzione di altre colture negli agroecosistemi potrebbe sostenere la fertilità del suolo, contribuendo a migliorare la sostenibilità delle pratiche agricole e la produttività. Inoltre, per massimizzare la resa ottenibile è necessario definire una densità di semina ottimale, tale da consentire uno sviluppo fogliare sufficiente al raggiungimento della copertura totale del suolo prima dello sviluppo delle spighe. Tuttavia, la scelta della densità di semina deve anche considerare la gestione degli apporti di nutrienti e la prevenzione di stress idrici (Abbate, 2004). In merito alla gestione fitosanitaria, invece, la difesa si attua attraverso un approccio integrato che combina pratiche agronomiche preventive (rotazioni colturali, scelta varietale, epoca di semina), monitoraggio delle infestazioni e, ove necessario, interventi chimici mirati (Abbate, 2004).

2.2 **Il frumento in Argentina**

2.2.1 *Evoluzione storica della coltura e importanza economica*

Il frumento tenero è la principale coltura invernale del Paese, in termini di quantità prodotta sia di superficie seminata (Fernández-Long et al., 2025). Da un'analisi dettagliata delle variabili climatiche e edafiche, quali precipitazioni, temperatura, caratteristiche del terreno e altitudine, che definiscono le condizioni agroecologiche della coltivazione del cereale, sono state stabilite 26 differenti sottoregioni per la coltivazione del frumento (*subregiones trigueras*) e di altri cereali invernali, ulteriormente caratterizzate in base alla loro continuità di produzione (**Fig. 2.3**) (Abbate et al., 2021). Tuttavia, la regione del paese vocata alla coltivazione è compresa tra le latitudini 25° e 40°S e le longitudini 58° e 66°W, una vasta area che include zone caratterizzate da diverse condizioni agroecologiche e da una significativa variabilità interannuale. A nord, l'area tradizionale di coltivazione è delimitata dall'isoterma dei 13°C (temperatura media del mese di luglio), mentre a sud è delimitata dall'isoterma dei 7°C (Molfese et al., 2021).

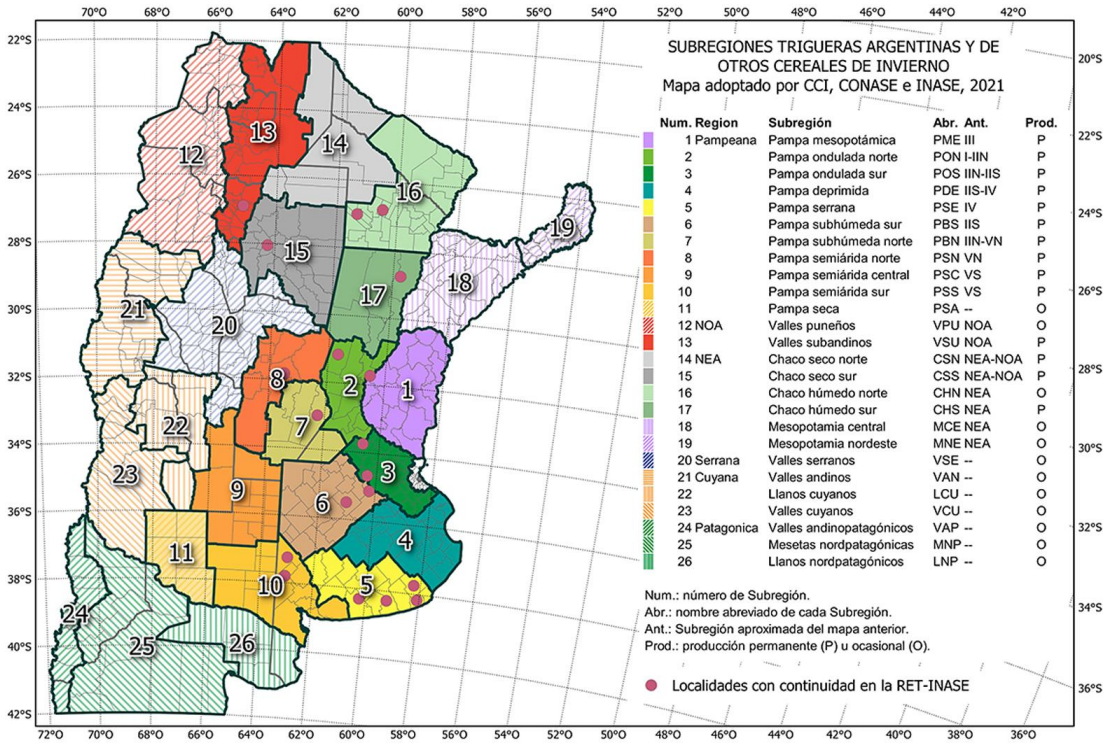


Fig. 2.3 – Sottoregioni produttrici di frumento (*subregiones trigueras*) e di altri cereali invernali in Argentina, la quale adozione è stata approvata il 12 gennaio 2021 dalla *Comisión Nacional de Semillas* (CONASE) (Abbate et al., 2021). CCI: *Comité de Cereales de Invierno*; INASE: *Instituto Nacional de Semillas*.

L'Argentina occupa una posizione di rilievo nel mercato mondiale del frumento. La capacità produttiva nazionale consente infatti di soddisfare ampiamente il fabbisogno interno, generando un surplus esportabile pari a circa cinque volte il consumo nazionale (Curin et al., 2021). Grazie a tali caratteristiche, il Paese si afferma come il principale produttore ed esportatore di frumento del Sud America e come uno degli attori più importanti nel commercio internazionale di questo cereale.

Poiché la superficie coltivata a frumento è rimasta sostanzialmente stabile dagli anni Sessanta, l'incremento della produzione dipende principalmente dall'aumento delle rese unitarie (Curin et al., 2021). A tal fine, un ruolo fondamentale è svolto sia dall'adozione di pratiche agronomiche più efficienti sia dal miglioramento genetico delle varietà coltivate. Nel periodo 1989-2008 il tasso medio annuo di incremento delle rese a livello mondiale è stato pari a circa lo 0,9%; tuttavia, secondo diverse stime, tale ritmo di crescita potrebbe non essere sufficiente a soddisfare la domanda globale in continua crescita, di conseguenza, risulta necessario continuare a migliorare sia le tecniche colturali sia il potenziale produttivo delle cultivar.

Nel corso del XX secolo, in particolare durante la Rivoluzione Verde, il miglioramento genetico del frumento è stato orientato principalmente all'aumento dell'indice di raccolta (Harvest Index, HI), ossia del rapporto tra la biomassa destinata alla produzione di granella e la biomassa totale della pianta. A partire dagli anni Ottanta, i progressi nella resa sono stati ottenuti soprattutto attraverso un incremento della biomassa complessivamente prodotta dalla coltura. In alcuni Paesi, tra cui l'Argentina, l'HI mostra tuttora margini di miglioramento. Attualmente, i programmi di miglioramento genetico del frumento argentini sono orientati principalmente all'aumento della produttività e della stabilità delle rese, attraverso lo sviluppo di varietà caratterizzate da una maggiore adattabilità alle diverse condizioni ambientali (Curin et al., 2021).

2.2.2 *Classificazione qualitativa e criteri agronomici di selezione varietale*

Al fine di soddisfare le necessità degli impianti industriali automatizzati, la moderna industria alimentare richiede elevati standard di uniformità della qualità del frumento. Tuttavia, tali requisiti sono difficili da perseguire, dato il ruolo dei fattori genetici, dell’ambiente e delle loro complesse relazioni nel concorrere a determinare il livello qualitativo finale della granella (Vázquez et al., 2012). Infatti, la variabilità della qualità commerciale e industriale del frumento, vale a dire quella molitoria e panificatoria, è fortemente determinata da fattori come

la disponibilità di N, il livello di resa e le temperature e il regime pluviometrico durante l'accumulo delle sostanze di riserva (Abbate et al., 2010).

Le varietà commerciali di *T. aestivum* impiegate in Argentina sono classificate in tre distinti gruppi di qualità o *grupos de calidad* (GC, stabiliti dalla CCI della CONASE), in funzione degli usi specifici (Molfese et al., 2021):

- **GC 1**: varietà ad elevata qualità panificatoria, che migliorano quelle di qualità inferiore e sono adatte ai processi di panificazione industriale.
- **GC 2**: frumento di ottima qualità panificatoria, adatto alla panificazione tradizionale, con fermentazioni superiori a 8 ore.
- **GC 3**: frumento di buona ma medio-bassa qualità panificatoria, adatto alla panificazione diretta, con tempi di fermentazione inferiori a 8 ore.

La suddetta classificazione è ottenuta sulla base di indici calcolati come la somma ponderata delle variabili quali peso ettolitrico, tenore in proteine, percentuale di glutine umido, tasso di macinazione, forza dell'impasto (misurata tramite alveogramma, W), stabilità farinografica e volume del pane. Tali parametri vengono quantificati mediante analisi di laboratorio (Molfese et al., 2021; Abbate et al., 2010).

A guidare la scelta delle varietà di frumento nel Paese sudamericano non sono esclusivamente le performance produttive, ma sono coinvolte anche le caratteristiche agronomiche e tecnologiche, quali il ciclo colturale, l'adattamento agli ambienti di produzione e la qualità panificatoria. Dal punto di vista agronomico, le varietà possono essere classificate in funzione della durata del ciclo vitale, nello specifico in varietà a ciclo corto, intermedio o lungo (Celestina et al., 2023), che si differenziano per adattabilità alla data di semina, condizioni idriche e potenziale produttivo. Un ulteriore criterio di classificazione riguarda la qualità tecnologica della granella. Infine, un aspetto fondamentale è rappresentato dalla stabilità produttiva e dall'adattamento alle condizioni pedoclimatiche, particolarmente rilevante in contesti caratterizzati da elevata variabilità come la regione pampeana (Fernández-Long et al., 2025; Molfese et al., 2021; INTA, s.d.).

2.2.3 *Principali varietà coltivate*

Le cultivar presenti in misura maggiore nella regione pampeana riflettono la complessità della scelta varietale descritta nel paragrafo precedente. Attualmente, il panorama varietale argentino è caratterizzato dalla presenza di genotipi sviluppati da case sementiere nazionali (es. Klein, Buck) e internazionali (es. Nidera, Don Mario, Bioceres). Secondo i dati del *Sistema de*

Información Simplificado Agrícola (SISA), nell'annata agraria 2025/2026, la varietà più seminata in tutto il Paese è stata Catalpa, seguita da Pehuen, Baguette 620, Fresno, Baguette 750, Baguette 610, Aromo, Araucaria, Baguette 802 e Baguette 820 (INASE, 2026) (**Tab. 2.1**).

Tab. 2.1 – Principali varietà seminate in Argentina, suddivise per anno di iscrizione della varietà, GC di appartenenza, superficie seminata in ha e frazione percentuale della superficie coperta dal totale delle varietà. Elaborazione personale ottenuta a partire dal documento INASE, (2026). Le aziende che hanno richiesto l'iscrizione delle varietà e gli anni di iscrizione al registro sono tratti dal *Catálogo Nacional de Cultivares*, INASE (https://gestion.inase.gob.ar/registroCultivares/publico/catalogo).

Ordine	Varietà	Azienda	Anno iscrizione RNC	GC	Ciclo	Superficie seminata (ha)	Superficie coltivata (%)
1	Catalpa	GDM Argentina S.A.	2021	2	I	*1.135.048*	*19,29*
2	Pehuen	GDM Argentina S.A.	2020	2	I	*608.272*	*10,34*
3	Baguette 620	Syngenta Crop Protection A.G.	2017	2	I	*504.445*	*8,57*
4	Fresno	SAS Florimond Desprez Veuve et Fils	2021	2	L	*193.523*	*3,29*
5	Baguette 750	Syngenta Crop Protection A.G.	2016	2	L	*178.122*	*3,03*
6	610 Baguette	Syngenta Crop Protection A.G.	2023	2	C	*167.045*	*2,84*
7	Aromo	GDM Argentina S.A.	2021	2	C	*157.103*	*2,67*
8	Araucaria	GDM Argentina S.A.	2023	2	I	*134.943*	*2,29*
9	Baguette 802	Serasem In Vivo-Group	2012	2	L	*127.045*	*2,16*
10	Baguette 820	Syngenta Crop Protection A.G.	2021	3	I	*122.375*	*2,08*
	Altre 252 varietà					*2.556.081*	*43,44*
	Totale generale					***5.884.002***	***100,00***

RNC: Registro nazionale delle cultivar (*Registro Nacional de Cultivares*); GC: Gruppo di qualità (*grupo de calidad*); C: Ciclo corto; I: Ciclo intermedio; L: Ciclo lungo.

Tutte le 262 varietà coltivate coprono una quota significativa della superficie nazionale (**Fig. 2.4**). Nel complesso, nella stagione 2025/2026 le varietà del GC2 sono risultate essere le più coltivate, occupando circa il 70% della superficie totale dichiarata, mentre quelle dei gruppi GC1 e GC3 hanno contribuito rispettivamente al 4,28% e all'8,31%.

Nella provincia di Buenos Aires, la superficie totale seminata a frumento nella stagione produttiva 2025/2026 è stata di 2.020.929 ha, dove la varietà Catalpa ha occupato la frazione maggiore (414.109 ha) pari a 20,49%, seguita da Baguette 620 (10,22%, 206.550 ha), Baguette 802 (6,10%, 123.387 ha), Baguette 820 (5,78%, 116.764 ha) e Fresno (4,93%, 99.659 ha). Analizzando, invece, la suddivisione per durata del ciclo vitale nel territorio provinciale, le cinque maggiori varietà a ciclo intermedio hanno occupato il 43,07% (870.394 ha) della superficie, mentre quelle a ciclo lungo e corto rispettivamente il 16,46% (332.574 ha) e il 9,42% (190.347 ha) (INASE, 2026) (**Tab. 2.2**).

Tab. 2.2 – Distribuzione delle cinque maggiori cultivar per tipologia di ciclo (corto, intermedio, lungo) nella provincia di Buenos Aires (INASE, 2026).

Ciclo corto		**Ciclo intermedio**		**Ciclo lungo**	
Varietà	Superficie (ha)	Varietà	Superficie (ha)	Varietà	Superficie (ha)
610 Baguette	*56.195*	Catalpa	*414.109*	Baguette 802	*123.387*
Aromo	*44.886*	Baguette 620	*206.550*	Fresno	*99.659*
Alerce	*37.869*	Baguette 820	*116.764*	Baguette 750	*39.085*
Baguette 525	*28.044*	Pehuen	*91.115*	Buck Destello	*36.164*
Ceibo	*23.353*	Araucaria	*41.856*	Basilio	*34.279*

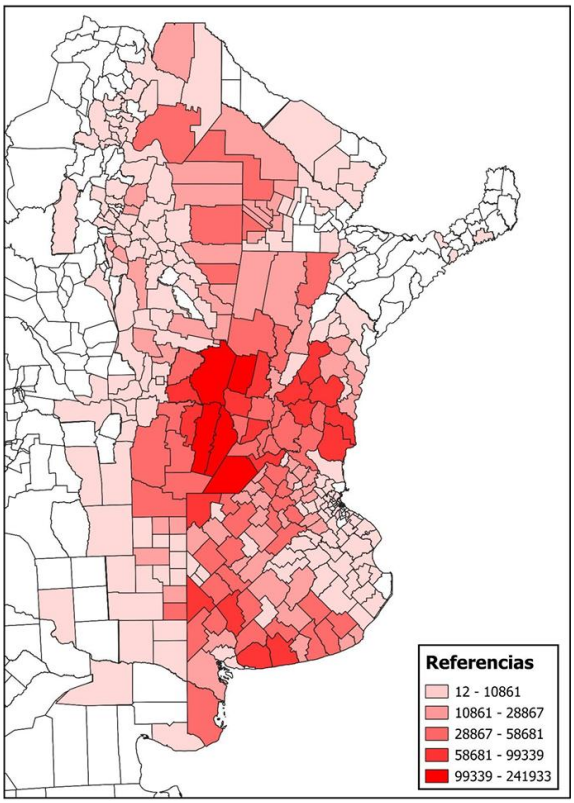


Fig. 2.4 – Distribuzione geografica della superficie coltivata a frumento in Argentina, divisa per dipartimenti, per l'annata agraria 2025/2026 (INASE, 2026).

2.2.4 *Produzione, mercato e destinazioni d'uso*

Analizzando i dati dell'annata agraria argentina del frumento 2024/25, la produzione totalizzata di granella ammonta a 18,5 milioni di tonnellate, valore superiore del 16,8% rispetto alla stagione precedente. Sebbene tale differenza sia in parte dovuta alla bassa produzione registrata nella a.a. 2023/24, si osserva un andamento positivo anche rispetto alla media degli ultimi dieci anni (16,9 milioni di tonnellate, pari a +9,1%). Tale aumento è attribuibile a due fattori:

- Incremento della superficie raccolta: +13,7% nel 2024/25 rispetto al 2023/24 (circa 975.000 ha in più). Rispetto alla media degli ultimi 10 anni, l'incremento è pari a +11,1%; rispetto alla media degli ultimi 5 anni, è pari a +3,2% (**Fig. 2.5**).
- Aumento della produttività: +2,7% rispetto al 2023/24.

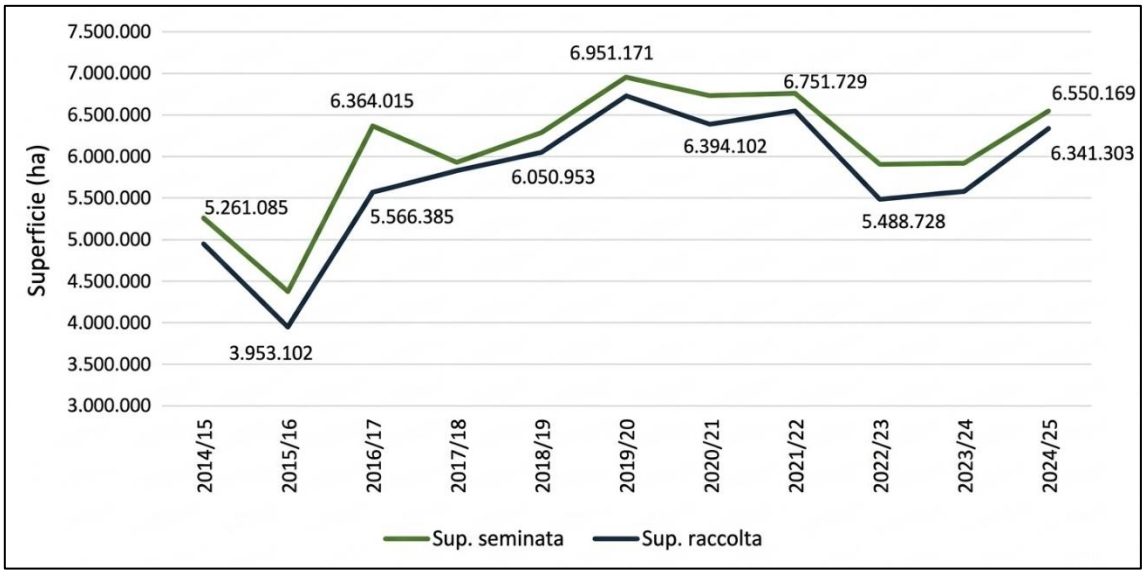


Fig. 2.5 – Andamento delle superfici seminate e raccolte di frumento negli ultimi anni (periodo 2014- 2025). Le eccezioni all'andamento crescente delle superfici sono stati gli anni in cui sono state rilevate severe siccità a causa del fenomeno de "La Niña" (Ministerio de Economía, 2025a).

Dall'a.a. 2015/16 al 2024/25, la superficie seminata è passata da circa 4,4 milioni di ha a circa 7 milioni, corrispondente ad un aumento del 58%. La produttività, invece, ha registrato un incremento del 2,7% rispetto alla media degli ultimi 5 anni, ma un -1,3% rispetto alla media degli ultimi 10 anni (**Fig. 2.6**).

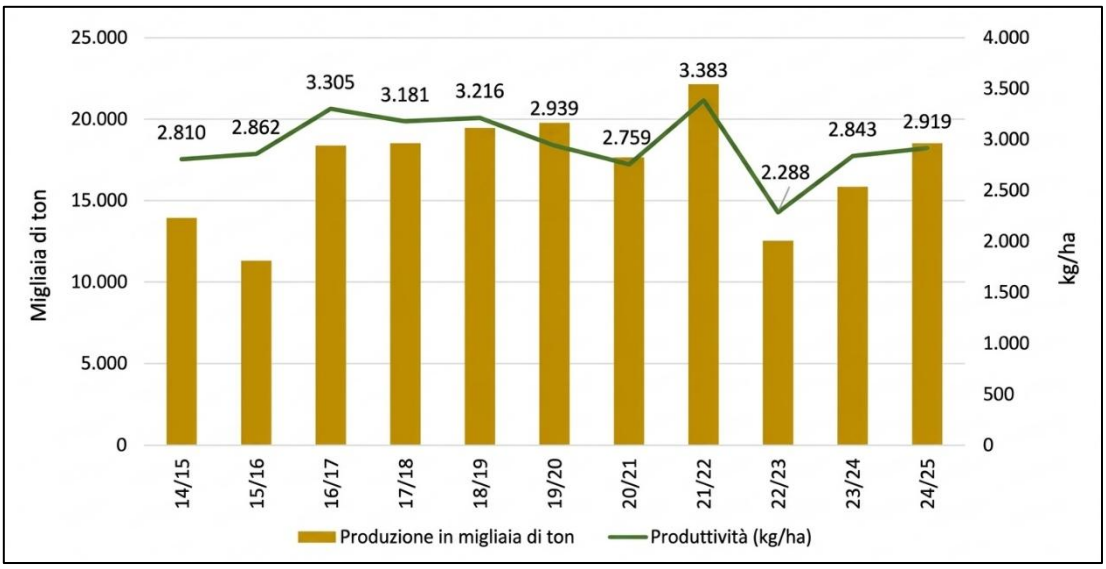


Fig. 2.6 – Andamento della produzione e della produttività del frumento nelle ultime 11 annate agrarie (periodo 2014/15, 2024/25) (Ministerio de Economía, 2025a).

Analizzando i contributi provinciali, si osserva che la provincia di Buenos Aires, da sola, nell'a.a. 2024/25 è stata responsabile della metà dell'intera produzione nazionale di granella di frumento (**Fig. 2.7**).

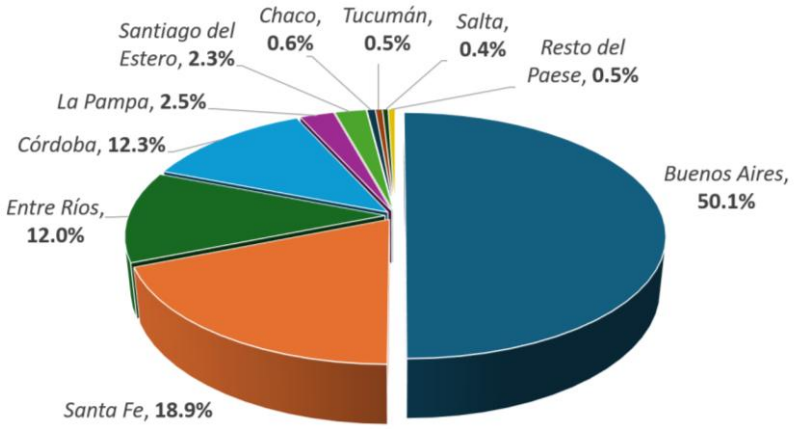


Fig. 2.7 – Produzione di frumento per provincia nell'annata agraria 24/25 (Ministerio de Economía, 2025a).

Tale primato produttivo trova riscontro anche nella distribuzione della superficie coltivata: nell'a.a. 2024/25 l'area seminata a frumento in provincia di Buenos Aires ha raggiunto 2.620.117 ha, pari a circa il 40% dei 6.550.169 ha complessivamente destinati alla coltura a livello nazionale (Ministerio de Economía, 2025a).

Considerando un orizzonte pluriennale, il grado di concentrazione territoriale della produzione risulta ancora più marcato: nella media delle cinque annate agrarie comprese tra il

2019/20 e il 2023/24, oltre il 90% del frumento commercializzato a livello nazionale ha avuto origine in sole quattro province – Buenos Aires, Santa Fe, Córdoba ed Entre Ríos – con un contributo maggioritario della provincia di Buenos Aires, pari a circa il 41% del totale nazionale (Maldonado et al., 2025). Tale concentrazione conferma il ruolo strategico della Pampa umida, e in particolare del territorio bonaerense, come principale bacino produttivo e commerciale del cereale in Argentina.

Confrontando le destinazioni d'uso della produzione nazionale nelle ultime tre a.a. (2022/23, 2023/24 e 2024/25), la granella destinata all'industria molitoria, alla produzione di seme e al foraggio rimane pressoché costante, mentre si registra una differenza significativa per l'export (**Tab. 2.3**). Per l'anno commerciale 2024/25 (relativo al periodo 01/12/2024 – 30/11/2025), l'offerta complessiva per il consumo interno (trasformazione industriale, seme e uso foraggero) è stata di 7,71 milioni di tonnellate, mentre il volume destinato all'export di 12,65 milioni di tonnellate, al di sopra della tendenza degli ultimi anni (Ministerio de Economía, 2026). In **Fig. 2.8** è dettagliata la stima della composizione percentuale dell'offerta e della domanda di frumento.

Tab. 2.3 – Destinazioni d'uso della granella di frumento prodotta nelle campagne produttive 2022/23, 2023/24 e 2024/25, in milioni di ton. [1]Industria: granella per produzione di farina e semola. [2]Altri usi: è compresa la produzione di foraggio. Elaborazione propria dei dati del *Ministerio de Economía* (2025a, 2026).

Annata agraria	Scorta iniziale	Produzione	Industria[1]	Seme e altri usi[2]	Export	Scorta finale
2022/23	*1,17*	*12,60*	*6,47*	*0,93*	*3,11*	*3,26*
2023/24	*3,26*	*15,90*	*6,45*	*0,93*	*7,60*	*4,18*
2024/25	*4,18*	*18,50*	*6,73*	*0,98*	*12,65*	*2,32*

La quota di granella assorbita dall'industria molitoria (**Tab. 2.3**) trova un preciso riscontro nella distribuzione territoriale degli impianti di trasformazione. Nella sola provincia di Buenos Aires sono infatti localizzati 84 impianti molitori, pari al 47% del totale nazionale, la cui attività ha consentito di processare, nel 2023, circa 3,1 milioni di tonnellate di frumento. Di questi impianti, il 51% dispone dell'autorizzazione all'esportazione, un dato che spiega perché il territorio bonaerense rappresenti una componente rilevante anche delle esportazioni argentine di farine, oltre che di granella (Pinedo et al., 2024).

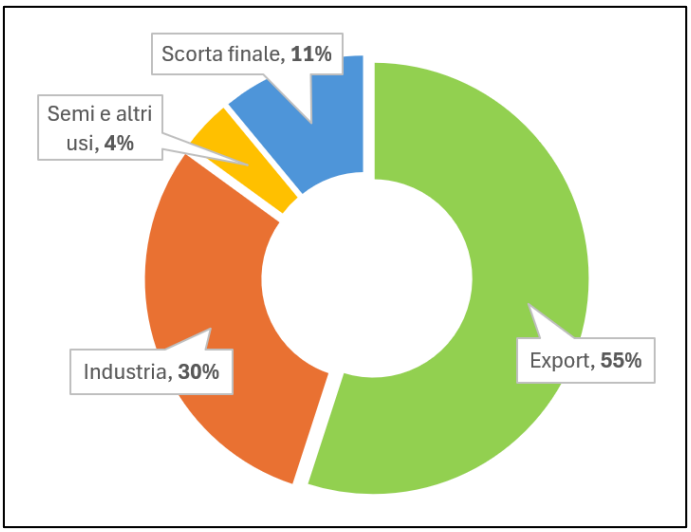


Fig. 2.8 – Proiezioni delle destinazioni d'uso del frumento prodotto nell'annata agraria 2024/25 (Ministerio de Economía, 2025b). Industria: granella per la produzione di farine e semole; Altri usi: inclusa la granella per uso foraggero.

2.2.5 *Tecniche colturali e sistemi produttivi*

Nei sistemi agricoli della regione pampeana il frumento è tradizionalmente inserito all'interno delle rotazioni colturali, spesso in successione con la soia e, in misura minore, con il mais. A partire dagli anni Novanta, l'agricoltura argentina ha attraversato una fase di profonda trasformazione caratterizzata dall'introduzione di nuove tecnologie produttive, dalla diffusione della semina diretta (no-tillage), dall'adozione di varietà transgeniche di soia e dall'impiego estensivo di prodotti fitosanitari. Tali innovazioni hanno favorito un notevole incremento della produttività agricola e una rapida espansione della superficie coltivata a soia, la cui produzione nazionale è raddoppiata tra la fine degli anni Novanta e l'inizio degli anni Duemila (Pengue, 2005). Attualmente la soia occupa circa 20 milioni di ettari, dei quali l'87% è localizzato nella regione pampeana (Serri et al., 2018).

L'espansione della soia e la crescente specializzazione produttiva hanno contribuito a consolidare il ruolo dell'Argentina come importante esportatore di commodities agricole. Tuttavia, tali processi hanno determinato anche diverse criticità ambientali, tra cui la diminuzione della fertilità dei suoli, la degradazione della struttura del terreno, l'aumento dei fenomeni erosivi, la perdita di biodiversità e il rischio di desertificazione in alcune aree (Pengue, 2005).

Per mitigare questi effetti e migliorare la sostenibilità dei sistemi produttivi, negli ultimi anni si è assistito a una progressiva reintroduzione di rotazioni più diversificate, nelle quali la soia viene alternata a colture graminacee quali frumento e mais (Salado-Navarro & Sinclair,

2009). In tale contesto assume particolare rilevanza la pratica della doppia coltura (double cropping), ampiamente diffusa nelle Pampas argentine. Questa tecnica prevede la coltivazione di una coltura invernale, generalmente frumento, seguita da una coltura estiva, prevalentemente soia, consentendo di incrementare la produttività annuale per unità di superficie e la quantità di residui colturali restituiti al terreno.

La successione frumento–soia rappresenta quindi una delle combinazioni più diffuse nei sistemi agricoli della regione ed è generalmente adottata ogni due o tre anni, sebbene in alcune aziende il frumento possa essere sostituito dal mais in funzione delle condizioni pedoclimatiche e delle opportunità di mercato (Andrade et al., 2017). L'inserimento del frumento nelle rotazioni contribuisce a migliorare l'efficienza d'uso delle risorse del suolo, a incrementare l'apporto di sostanza organica e a favorire una maggiore sostenibilità agronomica ed ambientale dei sistemi colturali (Serri et al., 2018).

2.3 **Caso studio: il frumento nel partido di Junín**

2.3.1 *Importanza della coltura nell'area di studio*

Secondo la suddivisione ufficiale in *subregiones trigueras* adottata nel 2021 da CCI, CONASE e INASE (Abbate et al., 2021), il *partido* di Junín ricade nella subregione 6 (*Pampa subhúmeda sur*), che corrisponde in modo approssimato alla subregione II Sur della suddivisione tradizionale, ancora impiegata nella letteratura tecnica (Golik et al., 2022) (**Fig. 2.3**). Si tratta di un ambiente tipicamente bonaerense, con caratteristiche intermedie tra il nord e il sud del bacino triticolo. Il clima è nel complesso molto favorevole alla coltura: le temperature di giugno-agosto sono prossime all'optimum per l'accestimento e le precipitazioni annue, intorno ai 900 mm, sono ben distribuite, con 80-90 mm in ottobre-novembre, quando il fabbisogno è massimo. Valori inferiori (fino a circa 700 mm) si registrano solo nella fascia occidentale e sud-occidentale, dove la disponibilità idrica diventa limitante. La spigatura avviene nella seconda metà di ottobre e la raccolta a metà dicembre, con data media dell'ultima gelata al 30 settembre (± 20 giorni). In un contesto climatico così favorevole, le rese dipendono soprattutto dal tipo di suolo e dalle scelte di gestione (Golik et al., 2022). A Junín le precipitazioni medie annue (900-1100 mm) e i suoli *Mollisol* in posizione di transizione tra Pampa Ondulata e Pampa Arenosa (1.4.4) richiamano le zone nord e nord-ovest della subregione, descritte da Golik et al. (2022) rispettivamente su Argiudol della pampa ondulata e su associazioni Hapludol-Haplustol franco-sabbiose, di capacità produttiva media.

La subregione è tra le più rilevanti del Paese: nel periodo 2016-2019 ha contribuito per il 13% alla superficie e per il 21% alla produzione nazionali, con le rese medie più elevate d'Argentina (4,0-4,2 t ha^{-1}) (Golik et al., 2022). Nel 2024/25 vi sono stati seminati 807.998 ha, pari al 12,3% dei 6.550.169 ha nazionali, per una produzione di 2.720.917 t, cioè il 14,7% del totale (*Trigo Argentino*, s.d.; Ministerio de Economía, 2025a). Anche a scala di *partido* il frumento è una coltura di primo piano: nel 2024/25 è stato seminato su circa 39.000 ha, con una produzione di 163.800 t, pari a circa 4,2 t ha^{-1} sulla superficie seminata, valore confrontabile con quello storico della subregione (**Fig. 2.10**; **Tab. 2.4**). La superficie è più che raddoppiata rispetto al 2014/15 e il frumento si affianca a soia e mais nella rotazione dominante dell'area (1.4.4).

Nella subregione prevalgono i cicli intermedio-lunghi (circa il 75% dei materiali): i cicli lunghi si seminano tra fine maggio e inizio giugno, gli intermedi in giugno e i corti da metà giugno a metà luglio (Golik et al., 2022). Non risultano disponibili dati pubblici sulla diffusione delle cultivar disaggregati a livello di *partido*. Un'indicazione indiretta proviene dal rilievo di 15 lotti commerciali condotto dall'AER Junín dell' *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria* (INTA) nella stagione 2024/2025 (Tellería & Melilli, 2026), composto da 7 lotti monitorati e 8 segnalati da produttori e professionisti, e dunque non probabilistico. Cinque lotti erano seminati con Catalpa, la varietà più diffusa in Argentina e nella provincia di Buenos Aires (**Tab. 2.1**; **Tab. 2.2**), tre con Pehuen e due con Baguette 610; i restanti cinque erano investiti a varietà diverse (DM Tipa, Klein Valor, SY 300, NEO 51T25, DM Casuarina). Tra le varietà di cui la **Tab. 2.1** riporta il ciclo (10 lotti su 15), otto erano a ciclo intermedio (Catalpa, Pehuen) e due a ciclo corto (Baguette 610), coerentemente con la prevalenza dei cicli intermedio-lunghi. Le rese dei lotti a Catalpa sono variate da 5,8 a 7,7 t ha^{-1} (media 6,7 t ha^{-1}), contro una media di 6,2 t ha^{-1} e un intervallo di 4,5 – 7,7 t ha^{-1} per l'insieme dei 15 lotti. Gli autori attribuiscono tali differenze soprattutto alla fertilizzazione azotata e al numero di trattamenti fungicidi, più che alla cultivar.

L'appezzamento oggetto di questo studio è coerente con tale quadro.

- È stato seminato il 24 giugno 2025 con Catalpa, varietà a ciclo intermedio, in un'epoca compatibile con quella indicata per questi cicli nella subregione.
- Aveva come coltura precedente la soia di prima, considerata nella subregione un antecedente preferibile al mais per il minor volume di residui, il minor rischio di malattie e la maggiore disponibilità di azoto (Golik et al., 2022).

- Ha ricevuto due trattamenti fungicidi (7.2), in risposta a una pressione di ruggini e maculature favorita a Junín dalla stagione umida (Tellería & Melilli, 2026) e tipica della subregione (Golik et al., 2022).
- È stato raccolto il 16 dicembre, in linea con l'epoca di raccolta della subregione, con una resa media di 7,08 t ha^{-1} (8.1), compresa nell'intervallo dei lotti a Catalpa rilevati dall'INTA.

Il caso studio può dunque considerarsi coerente con la pratica agronomica prevalente nell'area e con la varietà più diffusa a scala nazionale e provinciale. La ridotta numerosità del campione INTA impone però cautela nell'estendere le conclusioni a livello municipale. Le condizioni dell'annata agraria 2024/2025 che hanno determinato tali rese sono discusse nel paragrafo seguente.

2.3.2 *Tecniche di gestione produzioni e rese medie*

La stagione produttiva di frumento del 2025 nel *partido* di Junín ha registrato risultati ottimi, grazie a condizioni climatiche favorevoli che hanno consentito uno sviluppo ottimale della coltura. In particolare, le abbondanti precipitazioni nel mese di maggio (periodo precedente la semina), durante la crescita vegetativa (luglio-settembre), la fioritura (fine ottobre, fase critica) e lo stadio di riempimento della granella (novembre, con precipitazioni inferiori alla media storica ma comunque frequenti) hanno garantito una buona disponibilità idrica (**Fig. 2.9**). Tali condizioni, unite a temperature adeguate o leggermente inferiori alla media nelle fasi più delicate per la resa – fioritura (per il numero di cariossidi/m^2 ottenibili) e accumulo di sostanze di riserva – hanno permesso una crescita ottimale della coltura, senza stress termici o idrici.

Tuttavia, le condizioni di elevata umidità hanno reso necessario il trattamento della coltura con fungicidi per il controllo di malattie crittogamiche. Inoltre, sempre a causa delle precipitazioni, è stata fondamentale la concimazione azotata di copertura, a seguito del ridotto tenore di nitrati rilevato nel terreno (Tellería & Melilli, 2026).

Rispetto alle stagioni produttive precedenti, nel *partido* di Junín si registra un andamento crescente della superficie seminata a frumento e della produzione (**Fig. 2.10**). Nell'annata agraria 2024/25, si evidenzia un incremento della produzione del 5,0% rispetto all'annata precedente e del 38,1% rispetto alla media dei 10 anni precedenti (**Tab. 2.4**).

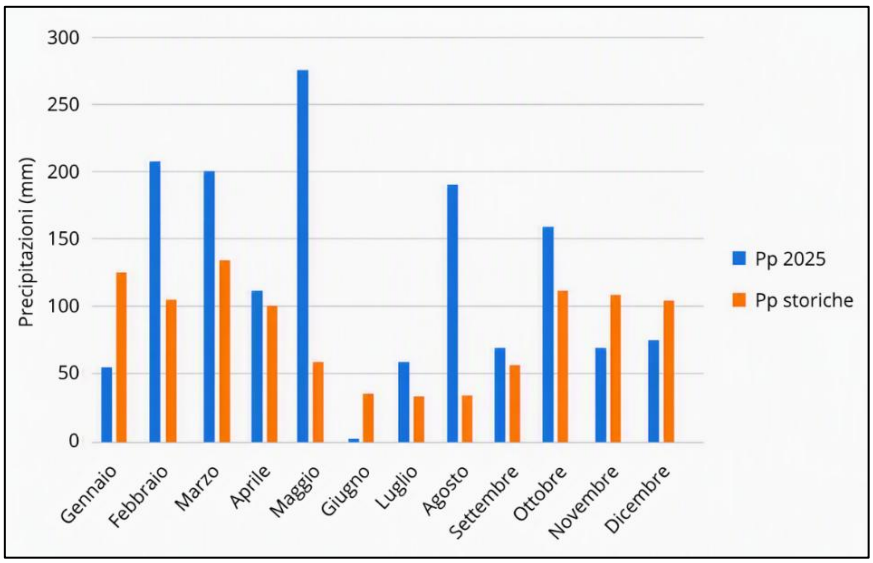


Fig. 2.9 – Precipitazioni mensili a Junín nel 2025 confrontate con i valori storici (Tellería & Melilli, 2026).

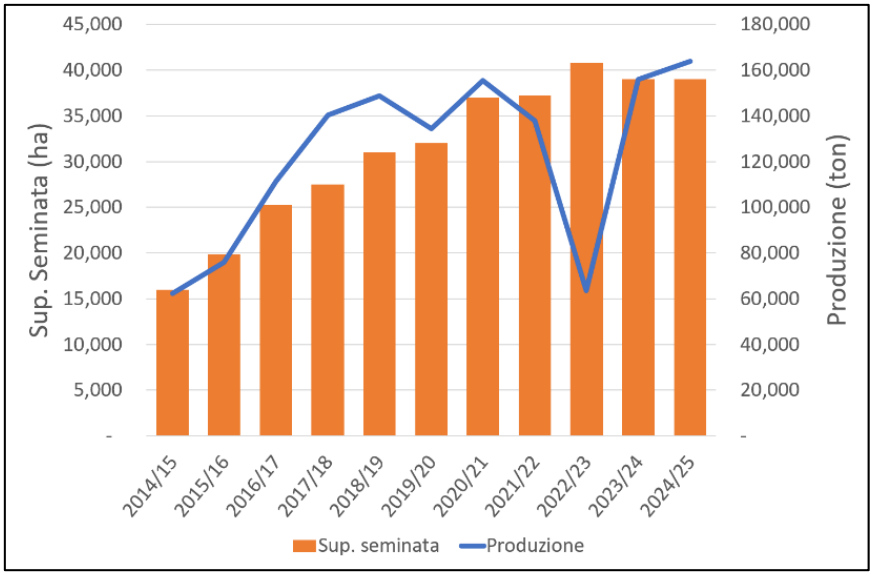


Fig. 2.10 – Andamento della superficie seminata e della produzione di granella di frumento nel partido di Junín nelle ultime 11 stagioni produttive (da 2014/15 a 2024/25). Elaborazione propria dei dati del *Ministerio de Economía* (Datos Abiertos Estadística PBA - Estimaciones Agrícolas, https://datos.estadistica.ec.gba.gov.ar/).

Tab. 2.4 – Confronto dei valori di produzione di frumento nel partido di Junín nell'annata agraria 2024/25 con quella precedente e con la media dei 10 anni precedenti. Elaborazione propria dei dati del *Ministerio de Economía* (Datos Abiertos Estadística PBA - Estimaciones Agrícolas, https://datos.estadistica.ec.gba.gov.ar/).

Periodo	Produzione (ton)	Incremento 2024/25 rispetto a
2014/15 - 2023/24	118.588 (media)	38.1%
2023/24	156.000	5.0%
2024/25	163.800	-

Capitolo 3
PRINCIPI DI AGRICOLTURA DI PRECISIONE

3.1 **Definizione, principi e obiettivi**

Fin dalla nascita dell'agricoltura, l'uomo ha progressivamente modificato gli ecosistemi naturali per renderli funzionali alla produzione di alimenti. Nel corso dei secoli, le tecniche agronomiche si sono evolute consentendo un costante incremento della produttività attraverso l'introduzione di nuove conoscenze, tecnologie e mezzi tecnici.

A partire dalla metà del XX secolo, la Rivoluzione Verde ha determinato una profonda trasformazione dei sistemi agricoli, favorendo un significativo incremento della produttività grazie all'introduzione di varietà ad elevato potenziale genetico, all'impiego di fertilizzanti e prodotti fitosanitari di sintesi, alla meccanizzazione delle operazioni colturali e, successivamente, all'adozione di tecniche di gestione sempre più avanzate. Sebbene tale modello abbia consentito di incrementare in modo sostanziale le produzioni agricole e di ridurre il fabbisogno di manodopera, esso ha comportato anche importanti criticità ambientali, legate all'impiego intensivo di input chimici, al consumo di combustibili fossili e alla crescente pressione sulle risorse naturali (Segarra, 2024). A tali problematiche si aggiunge la continua crescita della popolazione mondiale che, secondo le stime, raggiungerà circa 9-10 miliardi di abitanti entro il 2050, rendendo necessario un incremento della produzione alimentare di circa il 70% rispetto ai livelli attuali (Karunathilake et al., 2023).

In questo contesto si inserisce l'Agricoltura di Precisione (AdP), sviluppatasi a partire dagli anni Novanta grazie alla diffusione dei sistemi di posizionamento satellitare, della sensoristica e delle tecnologie informatiche, rappresentando un nuovo paradigma nella gestione dei sistemi agricoli (Pallottino et al., 2018; Finger et al., 2019). Il suo obiettivo è incrementare l'efficienza produttiva attraverso l'ottimizzazione dell'impiego dei fattori di produzione, riducendo gli sprechi e gli impatti ambientali (Getahun et al., 2024).

Più nel dettaglio, l'AdP è un sistema di gestione che utilizza informazioni georeferenziate e tecnologie innovative per identificare, analizzare e controllare la variabilità spaziale e temporale presente all'interno degli appezzamenti (Kuunya et al., 2026), con l'obiettivo di

aumentare il numero di decisioni corrette per unità di superficie e di tempo, migliorando l'efficienza complessiva del sistema produttivo (Pisante, 2013). In questo senso, l'AdP supera il paradigma della Rivoluzione Verde, poiché la massimizzazione della produzione non viene perseguita mediante un incremento indiscriminato degli input, ma attraverso il loro utilizzo ottimale, in funzione delle reali esigenze della coltura e della sostenibilità dell'agroecosistema (**Fig. 3.1**) (Segarra, 2024; Karunathilake et al., 2023). Tale approccio riconosce infatti che gli agroecosistemi sono caratterizzati da un'elevata eterogeneità, dovuta alla variabilità spaziale e temporale delle risorse naturali, e che questa può essere gestita mediante interventi sito-specifici (Pisante, 2013; Finger et al., 2019).

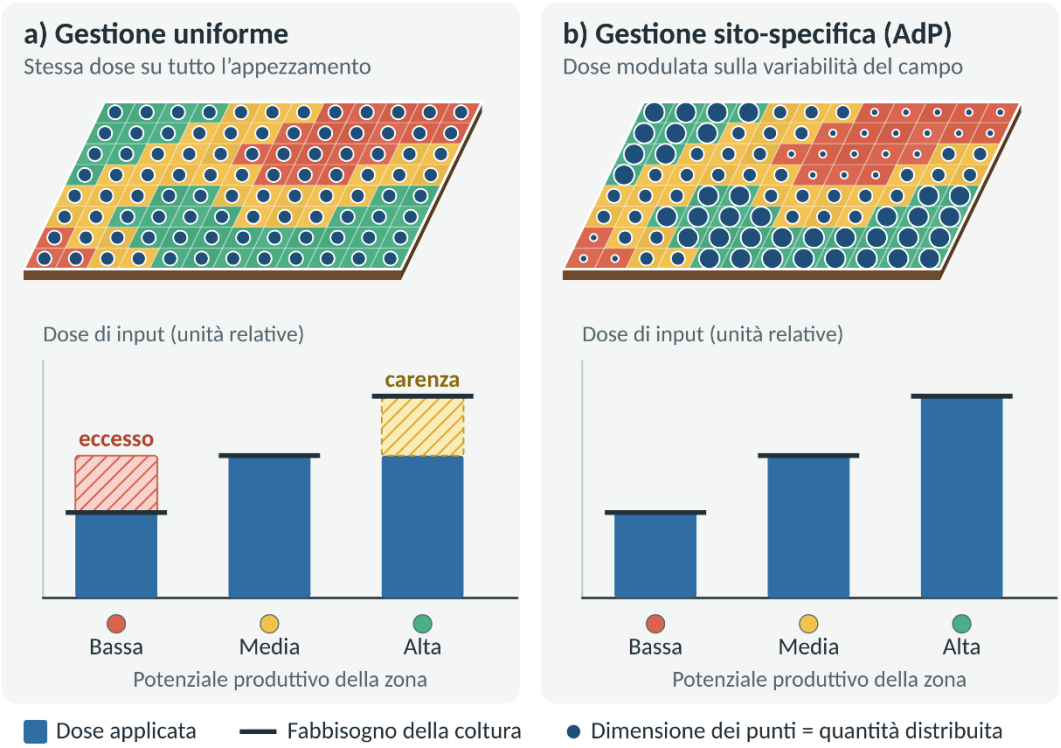


Fig. 3.1 – Confronto tra gestione uniforme (a) e gestione sito-specifica (b) in un appezzamento con zone a diverso potenziale produttivo; in (b) la dose segue il fabbisogno di ciascuna zona. Illustrazione originale realizzata con il supporto dell'IA (Claude, Anthropic); elaborazione propria da Pisante (2013) e Segarra (2024).

La letteratura propone numerose definizioni di AdP. Pierce e Novak (1999) la descrivono come "un sistema che fornisce gli strumenti per fare la cosa giusta, nel posto giusto e al momento giusto". Successivamente, Blasi et al. (2017) hanno ampliato questo concetto definendola come un sistema di gestione aziendale basato sull'osservazione, sulla misura e sulla risposta alle variabili quantitative e qualitative che caratterizzano l'azienda agricola, finalizzato allo sviluppo di sistemi di supporto alle decisioni in grado di ottimizzare la sostenibilità ambientale, economica, produttiva e sociale. Il Parlamento Europeo, infine, definisce l'AdP

come un approccio gestionale integrato che utilizza tecnologie dell'informazione, sistemi di posizionamento satellitare (GNSS), telerilevamento e sensori prossimali per supportare le decisioni agronomiche (Maloku, 2020).

L'applicazione dell'AdP si fonda sull'integrazione di diverse tecnologie, tra cui sistemi GNSS, sensori prossimali e remoti, sistemi informativi geografici (GIS), mappe di resa e sistemi di supporto alle decisioni, che consentono di acquisire informazioni dettagliate sullo stato del suolo e delle colture e di pianificare interventi differenziati all'interno dell'appezzamento.

I benefici derivanti dall'adozione dell'AdP sono molteplici. Dal punto di vista aziendale, essa consente una gestione più efficiente degli input, una maggiore produttività, una migliore corrispondenza tra il potenziale produttivo delle diverse aree del campo e gli interventi agronomici, nonché una riduzione dei costi legati all'impiego di fertilizzanti, prodotti fitosanitari, carburante e altre risorse produttive. Inoltre, favorisce una più accurata selezione varietale e una migliore valorizzazione economica dei terreni aziendali.

Anche a livello sociale e ambientale i benefici risultano significativi. La diffusione dell'AdP contribuisce infatti alla riduzione dell'inquinamento dovuto all'impiego eccessivo di fertilizzanti e fitofarmaci, favorisce un uso più sostenibile delle risorse naturali e promuove lo sviluppo di nuove professionalità ad elevato contenuto tecnologico, legate alla sensoristica, ai sistemi di guida assistita, ai software GIS, alla gestione dei dati e ai sistemi di supporto alle decisioni (Mulla, 2013).

3.2 **Variabilità spaziale e temporale dei sistemi colturali**

La variabilità rappresenta il presupposto fondamentale per l'applicazione dell'AdP. La conoscenza della sua distribuzione spaziale e temporale costituisce infatti il punto di partenza per adattare gli interventi agronomici alle reali esigenze della coltura e migliorare l'efficienza nell'impiego dei fattori produttivi.

La variabilità delle produzioni agricole, sia in termini quantitativi sia qualitativi, è il risultato delle complesse interazioni tra caratteristiche del suolo, condizioni climatiche, materiale genetico, fertilità, pratiche colturali e fattori accidentali. In particolare, la variabilità del terreno deriva dalle caratteristiche pedologiche e geologiche che ne hanno determinato l'evoluzione, quali tessitura, contenuto di sostanza organica, disponibilità di elementi nutritivi, capacità di scambio cationico, pH e salinità. A tali fattori naturali si aggiungono gli effetti delle pratiche agronomiche adottate nel tempo, che possono contribuire ad accentuare l'eterogeneità

degli appezzamenti. Le differenze nelle proprietà del suolo si riflettono direttamente sullo sviluppo della coltura e determinano una conseguente variabilità spaziale della produzione (Pisante, 2013; Ceccon, 2017).

Accanto alla componente spaziale assume particolare importanza anche la variabilità temporale, poiché gli stessi fattori che influenzano la produttività possono modificare la propria intensità nel corso del tempo. La variabilità temporale di un determinato parametro descrive infatti la sua tendenza ad assumere valori differenti nello stesso punto dell'appezzamento in momenti diversi. Essa può manifestarsi sia nel corso della medesima stagione agraria, come nel caso della disponibilità idrica della coltura, fortemente influenzata dall'andamento meteorologico e dalla gestione agronomica, sia tra annate differenti, come avviene per la resa colturale, che può variare in funzione delle condizioni climatiche e delle caratteristiche della singola stagione produttiva (Pisante, 2013).

Nel complesso, i fattori che determinano la variabilità possono essere distinti in statici e dinamici. I primi presentano prevalentemente una componente spaziale e comprendono, ad esempio, la topografia, la tessitura del terreno e il pH, caratteristiche che tendono a mantenersi relativamente stabili nel tempo. I fattori dinamici, invece, presentano sia una componente spaziale sia una componente temporale; tra questi rientrano il contenuto idrico del terreno, la disponibilità di nitrati e, più in generale, tutte quelle proprietà che possono modificarsi durante il ciclo colturale o tra stagioni agrarie differenti (Pisante, 2013).

La corretta caratterizzazione della variabilità rappresenta quindi la base conoscitiva dell'AdP, poiché consente di individuare aree omogenee all'interno dell'appezzamento e di pianificare interventi agronomici sito-specifici, ottimizzando l'impiego delle risorse e migliorando la sostenibilità del sistema produttivo.

3.3 **Evoluzione storica dell'AdP**

Le pratiche agricole, le caratteristiche delle colture e degli allevamenti, i fattori che influenzano la produzione e le condizioni ambientali, intese sia in senso climatico e pedologico sia socioeconomico, sono soggetti a una continua evoluzione nello spazio e nel tempo. In questo contesto, la capacità di gestire tale variabilità rappresenta uno degli obiettivi principali dell'agricoltura moderna. Parallelamente, il rapido sviluppo delle tecnologie digitali ha progressivamente interessato anche il settore agricolo, modificando profondamente le modalità di gestione delle aziende (Avola et al., 2024).

Nei Paesi industrializzati, l'agricoltura si è evoluta passando da un modello fortemente basato sul lavoro manuale a sistemi sempre più meccanizzati e automatizzati. I primi tentativi di automatizzazione risalgono già agli inizi del XX secolo; nel 1924 venne infatti brevettato un prototipo di sistema di guida automatica per trattori. Tuttavia, è soltanto dagli anni Settanta che lo sviluppo dell'elettronica e dell'informatica ha reso concretamente possibile la realizzazione di sistemi in grado di misurare la variabilità degli appezzamenti e di modulare gli interventi colturali in funzione delle reali esigenze delle colture (**Fig. 3.2**) (Avola et al., 2024).

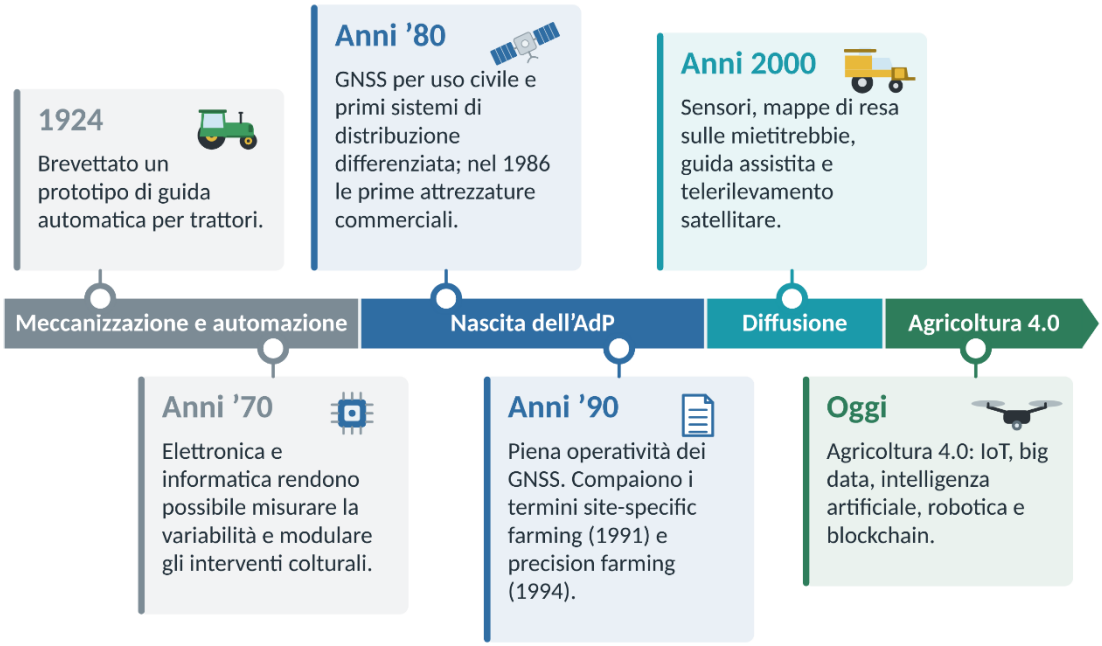


Fig. 3.2 – Tappe principali dell'evoluzione storica dell'AdP. Illustrazione originale realizzata con il supporto dell'IA (Claude, Anthropic); elaborazione propria da Avola et al. (2024) e Karunathilake et al. (2023).

Un impulso decisivo allo sviluppo dell'AdP è derivato dalla diffusione dei Global Navigation Satellite Systems (GNSS), che hanno reso possibile il posizionamento georeferenziato delle macchine agricole e dei dati raccolti in campo. Tra questi, il sistema statunitense Global Positioning System (GPS) è stato il primo ad essere ampiamente utilizzato nelle applicazioni agricole, seguito successivamente dagli altri sistemi di navigazione satellitare, quali GLONASS, Galileo e BeiDou. La disponibilità dei servizi GNSS per le applicazioni civili, a partire dagli anni Ottanta (Karunathilake et al., 2023), e la loro piena operatività negli anni Novanta hanno rappresentato una svolta per lo sviluppo dell'AdP. L'integrazione tra ricevitori GNSS, sistemi informativi geografici (GIS) e sensoristica ha infatti consentito la georeferenziazione delle informazioni raccolte in campo e la loro successiva elaborazione, rendendo possibile la gestione sito-specifica delle operazioni agronomiche.

Parallelamente, si sono sviluppate le prime tecnologie per l'applicazione a rateo variabile dei fattori produttivi. Nella prima metà degli anni Ottanta vennero studiati i primi sistemi di distribuzione differenziata dei fertilizzanti e, nel 1986, furono commercializzate le prime attrezzature in grado di modulare automaticamente la distribuzione di fertilizzanti e prodotti fitosanitari in funzione della variabilità spaziale del terreno (Avola et al., 2024).

L'evoluzione tecnologica ha portato anche a una progressiva definizione del concetto stesso di AdP. Nel 1991 Schueller introdusse nella letteratura scientifica il termine site-specific farming, evidenziando come i progressi dell'automazione rendessero possibile una gestione differenziata delle produzioni agricole (Avola et al., 2024). Negli anni successivi furono utilizzate diverse terminologie, tra cui site-specific agriculture, prescription farming e precision agriculture, fino all'affermazione del termine precision farming, introdotto formalmente nella letteratura nel 1994 (Avola et al., 2024).

Nel corso degli anni Duemila, il continuo sviluppo della sensoristica, dei sistemi per la mappatura delle rese installati sulle mietitrebbie, dei sistemi di guida assistita e del telerilevamento satellitare ha ampliato notevolmente le potenzialità dell'AdP, consentendo agli agricoltori di monitorare in tempo reale la produttività delle colture e di pianificare interventi sempre più mirati.

Nonostante i notevoli progressi tecnologici, l'AdP deve ancora confrontarsi con alcune criticità, quali l'utilizzo non sempre sostenibile delle risorse, la diffusione di sistemi colturali semplificati, la crescente pressione sugli ecosistemi, la disomogenea diffusione delle tecnologie digitali, le problematiche legate alla sicurezza alimentare e le difficoltà di adozione delle innovazioni da parte di alcune realtà produttive (Karunathilake et al., 2023).

Per rispondere a tali sfide, negli ultimi anni l'evoluzione dell'AdP si è progressivamente integrata con le tecnologie della cosiddetta Industria 4.0, quali Internet of Things (IoT), big data, intelligenza artificiale, robotica e blockchain. Da questa integrazione è nato il concetto di Agricoltura 4.0 (Smart Agriculture), caratterizzato da una crescente digitalizzazione dei processi produttivi, dall'automazione delle operazioni colturali e dall'impiego di sistemi intelligenti di supporto alle decisioni (Karunathilake et al., 2023).

3.4 **Tecnologie e flusso operativo dell'AdP**

Per perseguire gli obiettivi dell'AdP, gli agricoltori possono utilizzare una combinazione di diverse tecnologie (Finger et al., 2019). Ad oggi, in letteratura le innovazioni tecnologiche

da implementare sono suddivise in tre principali categorie: sulla base dell'ordine cronologico di utilizzo, esse si dividono in sistemi per l'acquisizione dei dati, per la loro valutazione e analisi e, infine, per le applicazioni di precisione (**Fig. 3.3**) (Avola et al., 2024; Karunathilake et al., 2023).

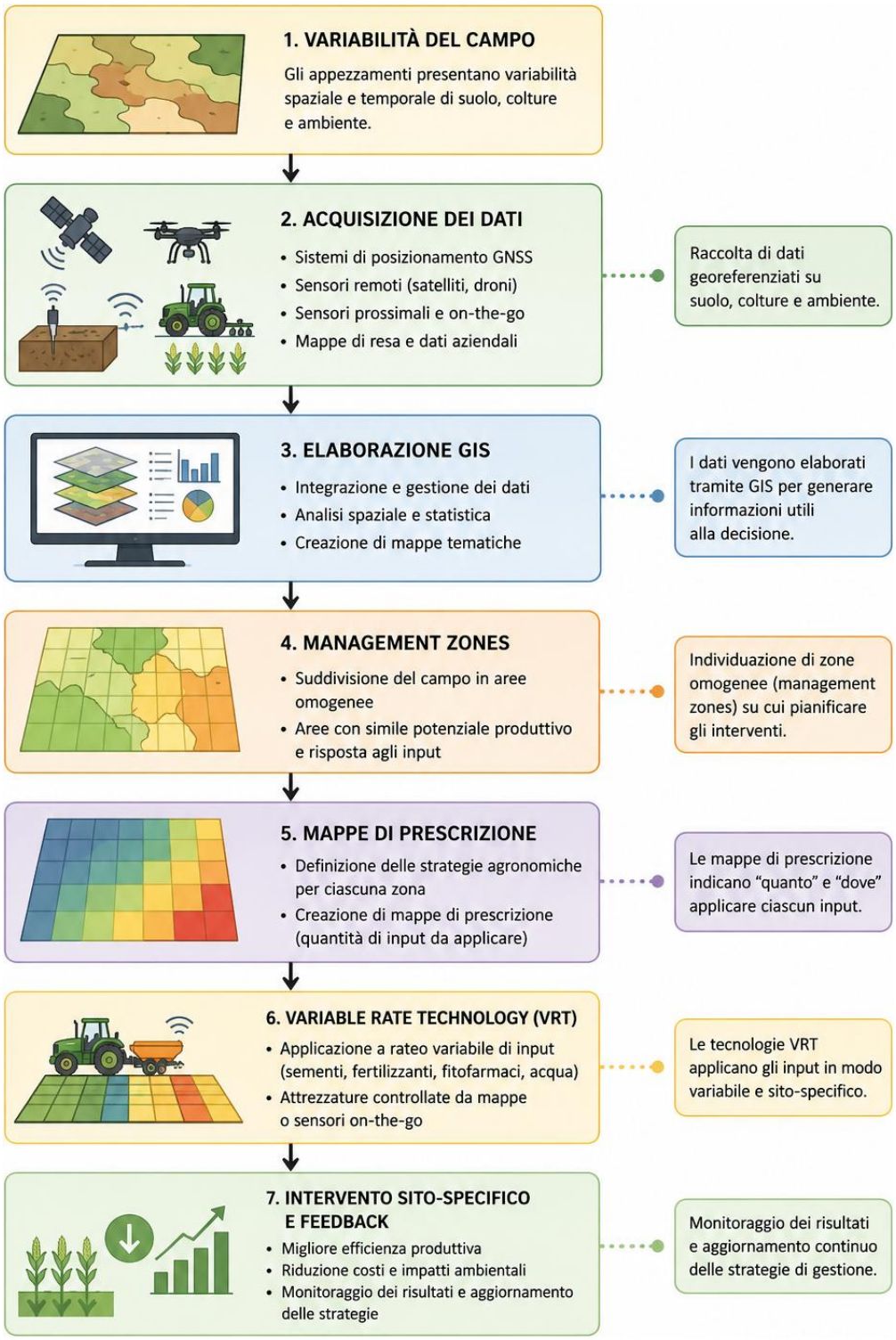


Fig. 3.3 – Flusso operativo dell'AdP, dalla variabilità del campo all'intervento sito-specifico. Illustrazione realizzata con ChatGPT (OpenAI).

3.4.1 *Acquisizione dei dati*

La raccolta dei dati rappresenta la prima fase del sistema integrato dell'AdP. Quantificare la variabilità significa infatti individuare e misurare tutti i parametri che possono influenzare la produttività, la qualità e lo stato sanitario delle colture. Le informazioni possono essere acquisite mediante tecniche di telerilevamento, sensori installati sulle macchine agricole, sistemi di monitoraggio della resa, sensori dedicati all'analisi del suolo e della coltura, oltre che attraverso la conoscenza storica dell'azienda e l'esperienza dell'imprenditore agricolo (Pisante, 2013).

Il ruolo dei sensori è quello di rilevare i diversi fattori che determinano la crescita delle colture e il comportamento del suolo, fornendo le informazioni necessarie per supportare le decisioni agronomiche e ottimizzare l'impiego dei fattori produttivi (Paul et al., 2022). Essi possono essere installati su differenti piattaforme (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020) e, in funzione della distanza dal bersaglio, si distinguono principalmente in sistemi di remote sensing e proximal sensing.

Nel **remote sensing**, i sensori sono generalmente installati su piattaforme satellitari o aeromobili a pilotaggio remoto (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) e acquisiscono informazioni analizzando la radiazione elettromagnetica riflessa dalla vegetazione. Tali sistemi consentono il monitoraggio rapido e non distruttivo di ampie superfici agricole, sebbene richiedano opportune correzioni atmosferiche durante la fase di elaborazione delle immagini (Blasi et al., 2017).

Nel **proximal sensing**, invece, i sensori operano a breve distanza dalla coltura o direttamente a contatto con la stessa, risultando generalmente installati su trattrici, macchine operatrici o altre piattaforme terrestri. La ridotta distanza dal bersaglio consente di ottenere misure caratterizzate da un'elevata accuratezza e risoluzione spaziale, particolarmente utili per il monitoraggio dello stato della coltura e delle proprietà del suolo (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

Affinché le informazioni raccolte possano essere utilizzate nella gestione sito-specifica, è necessario che siano georeferenziate, cioè associate a una precisa posizione all'interno dell'appezzamento (Pisante, 2013; Ceccon, 2017). A tale scopo vengono impiegati i Global Navigation Satellite Systems (GNSS), oggi tra le tecnologie fondamentali dell'AdP, che consentono di determinare con precisione le coordinate geografiche dei punti rilevati (latitudine, longitudine e altitudine) (Paul et al., 2022; Adamchuk et al., 2004).

Un GNSS è costituito da una costellazione di satelliti con copertura globale che trasmettono segnali contenenti informazioni temporali e di posizionamento. Il ricevitore determina la propria posizione mediante il principio della trilaterazione, calcolando il tempo impiegato dai segnali provenienti da almeno quattro satelliti per raggiungere l'antenna ricevente (Guo et al., 2018).

Attualmente i principali sistemi pienamente operativi sono quattro: Global Positioning System (GPS) sviluppato dagli Stati Uniti, GLObal NAvigation Satellite System (GLONASS) dalla Federazione Russa, Galileo dall'Unione Europea e BeiDou Navigation Satellite System (BDS-3) dalla Cina (Gao et al., 2024).

L'accuratezza del posizionamento rappresenta un requisito fondamentale nelle applicazioni di AdP e varia in funzione dell'operazione da svolgere (Guo et al., 2018). Generalmente si distinguono tre livelli di precisione:

- accuratezza metrica, sufficiente per il monitoraggio aziendale, il tracciamento delle macchine e delle operazioni;
- accuratezza sub-metrica, impiegata nelle operazioni di guida assistita, distribuzione di fertilizzanti e raccolta delle colture estensive e mappatura degli appezzamenti;
- accuratezza centimetrica, indispensabile per applicazioni ad elevata precisione, quali la guida automatica delle macchine agricole, il trapianto, la semina di precisione.

Le prestazioni dei sistemi GNSS possono tuttavia essere influenzate da diversi fattori, quali ostacoli fisici (vegetazione, edifici o morfologia del terreno), condizioni atmosferiche e ritardi nella propagazione del segnale attraverso ionosfera e troposfera, con conseguente riduzione della precisione di posizionamento (Braff & Shively, 2005; Radočaj et al., 2023).

Per migliorare accuratezza, continuità e affidabilità del posizionamento sono stati sviluppati sistemi di correzione differenziale. Tra questi si distinguono i Ground-Based Augmentation Systems (GBAS), basati su stazioni permanenti a terra che calcolano e trasmettono correzioni ai ricevitori mobili, e i Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS), che diffondono tali correzioni attraverso satelliti geostazionari. Tra i sistemi SBAS più diffusi si ricordano il WAAS negli Stati Uniti e EGNOS in Europa (Gao et al., 2024).

Nelle applicazioni agricole che richiedono il massimo livello di precisione viene oggi largamente impiegata la tecnologia Real-Time Kinematic (RTK). Essa si basa su una stazione di riferimento fissa che rileva continuamente gli errori di posizionamento dei segnali GNSS e trasmette in tempo reale le correzioni al ricevitore installato sulla macchina agricola. In questo modo è possibile raggiungere accuratezze dell'ordine di pochi centimetri, requisito essenziale

per applicazioni quali la guida automatica, la semina di precisione, la distribuzione a rateo variabile e la mappatura della resa (Radočaj et al., 2023). Sebbene i sistemi GNSS rappresentino una delle tecnologie più diffuse nell'AdP, il loro impiego non è indispensabile in tutte le applicazioni. In funzione della strategia adottata, è infatti possibile distinguere due differenti approcci operativi: il sistema map-based e il sistema real-time (**Fig. 3.4**) (Adamchuk et al., 2004).

Nell'approccio map-based, i dati acquisiti mediante ricevitori GNSS e altri sensori vengono georeferenziati, elaborati all'interno di un sistema informativo geografico (GIS) e successivamente utilizzati per la realizzazione di mappe tematiche e mappe di prescrizione, che guidano gli interventi agronomici.

L'approccio real-time, invece, si basa sull'impiego di sensori on-the-go, installati direttamente sulle macchine agricole, in grado di rilevare in tempo reale le caratteristiche del suolo, della coltura o la presenza di fitofagi e di adattare automaticamente gli interventi colturali durante l'avanzamento della macchina (Grisso et al., 2009). In questo caso i sistemi GNSS non sono strettamente indispensabili, sebbene possano essere integrati con i sensori di bordo per georeferenziare le informazioni raccolte e combinarle successivamente con altre fonti di dati (Adamchuk et al., 2004; Anyou Xie et al., 2024).

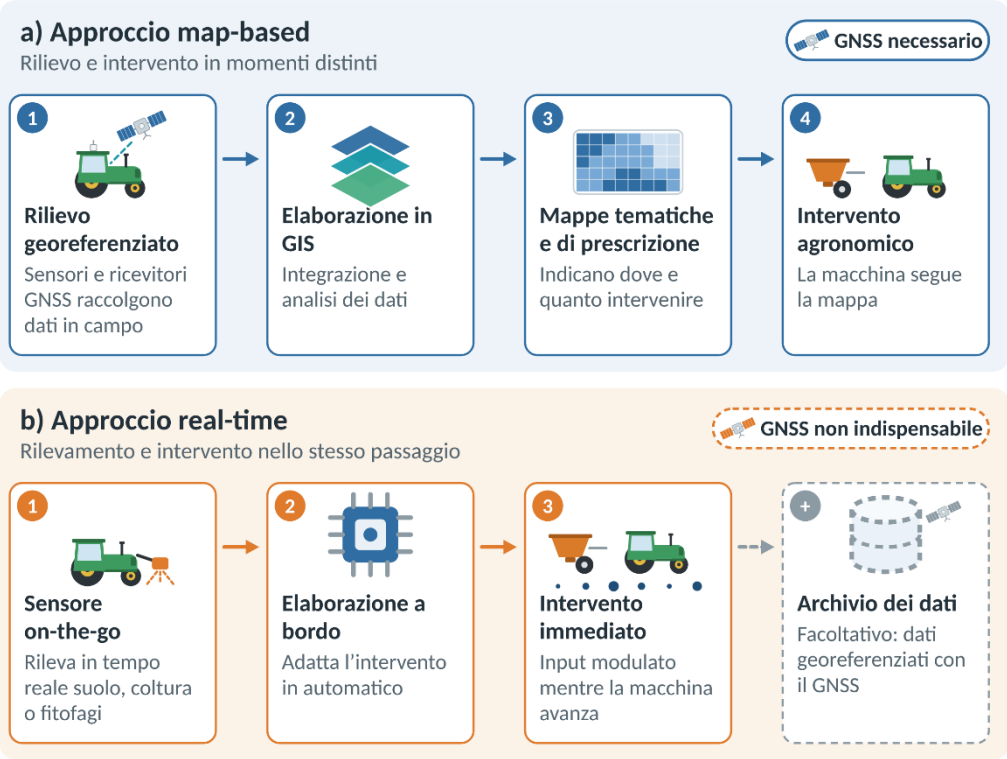


Fig. 3.4 – Approccio map-based (a) e approccio real-time (b). Illustrazione originale realizzata con il supporto dell'IA (Claude, Anthropic); elaborazione propria da Adamchuk et al. (2004) e Grisso et al. (2009).

Numerosi sensori consentono inoltre, di caratterizzare la variabilità del suolo e delle colture. Tra quelli dedicati al suolo trovano largo impiego i sensori ad induzione elettromagnetica (EMI), che consentono di misurare la conducibilità elettrica apparente, parametro correlato a tessitura, contenuto idrico, salinità e grado di compattamento. A questi si affiancano i georesistivimetri, che determinano la resistività elettrica del terreno mediante contatto diretto, e gli spettrometri a raggi gamma, utilizzati per la caratterizzazione delle proprietà pedologiche attraverso la misura della radiazione naturale emessa dai primi strati del suolo (Blasi et al., 2017).

Per il monitoraggio della coltura sono invece disponibili sensori ottici e multispettrali, installati sia su piattaforme prossimali sia remote, che consentono di valutare il vigore vegetativo, lo stato nutrizionale, il contenuto idrico e permettono di monitorare in modo rapido e non distruttivo lo stato delle colture attraverso l'analisi della radiazione elettromagnetica riflessa. Le informazioni ottenute costituiscono la base per il calcolo degli indici vegetativi e per la realizzazione di mappe tematiche utilizzate nelle successive fasi del processo decisionale. Poiché il telerilevamento rappresenta uno degli strumenti fondamentali dell'AdP e costituisce il principale oggetto del presente lavoro, esso verrà approfondito nel capitolo successivo.

3.4.2 *Elaborazione dei dati e applicazioni a rateo variabile*

Una volta acquisiti i dati relativi alla variabilità del sistema colturale, essi devono essere elaborati mediante un Sistema Informativo Geografico (Geographic Information System, GIS). Il GIS rappresenta uno degli strumenti fondamentali dell'AdP, poiché consente di acquisire, integrare, elaborare, analizzare e visualizzare dati georeferenziati provenienti da differenti fonti informative, quali rilievi di campo, sensori prossimali, immagini telerilevate e sistemi di posizionamento satellitare. Attraverso tali elaborazioni è possibile generare mappe tematiche contenenti informazioni relative, ad esempio, alla produttività, alle caratteristiche pedologiche, allo stato delle colture, alla disponibilità idrica e alla distribuzione dei nutrienti (Zhou, 2025; Sharma et al., 2024).

La disponibilità di tali informazioni permette di comprendere la variabilità spaziale dell'appezzamento e costituisce la base per l'ottimizzazione dell'impiego dei fattori produttivi, la definizione delle strategie di gestione e la riduzione degli sprechi, con conseguente incremento dell'efficienza nell'uso delle risorse e contenimento dei costi aziendali (Radočaj et al., 2023).

L'elaborazione dei dati consente inoltre di suddividere il campo in aree caratterizzate da comportamento produttivo omogeneo, comunemente denominate management zones (MZs) o zone omogenee di gestione. La loro individuazione rappresenta uno dei passaggi fondamentali dell'AdP, poiché permette di adattare gli interventi agronomici alle differenti condizioni presenti all'interno dello stesso appezzamento, una management zone può quindi essere definita come una porzione di campo nella quale l'interazione tra i fattori che limitano la produttività determina un comportamento agronomico sufficientemente uniforme da poter essere gestito con le stesse modalità operative (Pisante, 2013).

L'impiego delle MZs consente di distribuire gli input in funzione del reale potenziale produttivo delle diverse aree del campo, destinando quantità maggiori di risorse alle zone più produttive e riducendone l'impiego nelle aree meno vocate, con l'obiettivo di massimizzare il ritorno economico degli interventi agronomici (Grisso et al., 2009). Il numero e la dimensione delle zone omogenee dipendono dalla naturale eterogeneità dell'appezzamento, dalla sua estensione e dagli obiettivi gestionali dell'azienda (Saiz-Rubio & Rovira-Más, 2020).

Le informazioni processate in ambiente GIS possono quindi essere utilizzate per la realizzazione delle mappe di prescrizione, che rappresentano il collegamento tra la fase di analisi e quella operativa dell'AdP. Attraverso tali mappe è possibile definire, per ciascuna zona omogenea, il quantitativo ottimale dei diversi fattori produttivi (**Fig. 3.5**).

L'applicazione pratica delle mappe di prescrizione avviene mediante le tecnologie di Variable Rate Technology (VRT). La sola raccolta e analisi dei dati, infatti, non sarebbe sufficiente a produrre benefici concreti se non fosse accompagnata dalla possibilità di modulare gli interventi colturali all'interno dell'appezzamento (Pisante, 2013). Le VRT consentono di distribuire sementi, acqua, fertilizzanti minerali e organici e prodotti fitosanitari in modo differenziato, sulla base delle prescrizioni contenute nelle mappe oppure delle informazioni acquisite in tempo reale dai sensori on-the-go, adeguando gli input alle esigenze specifiche di ciascuna area del campo (Karunathilake et al., 2023; Grisso et al., 2009; Pisante, 2013).

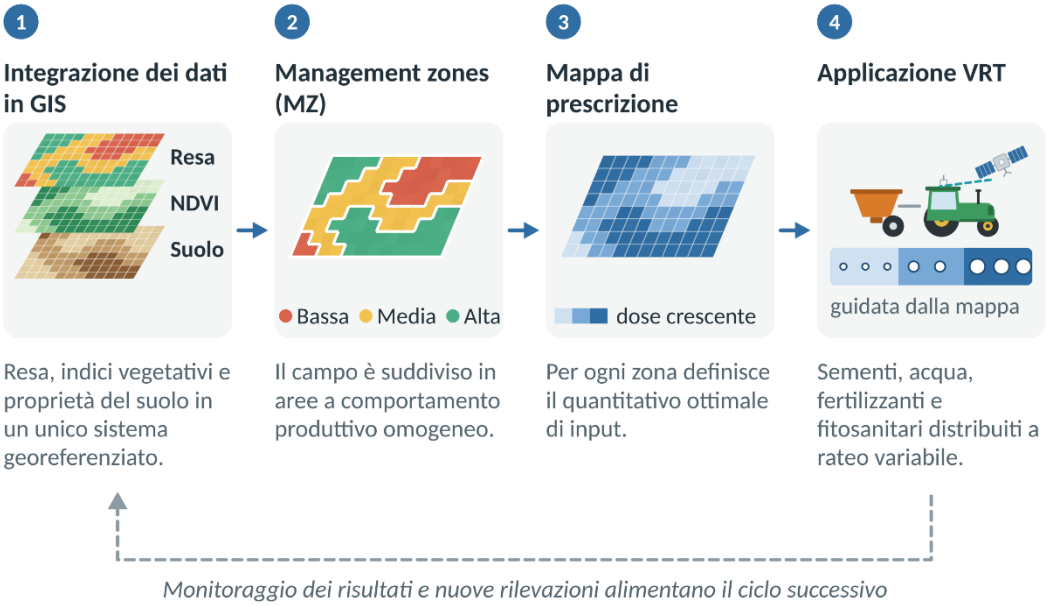


Fig. 3.5 – Dall'integrazione dei dati in ambiente GIS all'applicazione a rateo variabile: management zones, mappa di prescrizione e VRT. Illustrazione originale realizzata con il supporto dell'IA (Claude, Anthropic); elaborazione propria da Pisante (2013) e Grisso et al. (2009).

3.5 **Barriere all'adozione dell'AdP**

Nonostante i numerosi vantaggi descritti, l'adozione dell'AdP non avviene con la stessa intensità in tutti i contesti produttivi, ma dipende dalle caratteristiche economiche, sociali e strutturali dei diversi sistemi agricoli.

Nei Paesi economicamente più sviluppati, quali gli Stati membri dell'Unione Europea, gli Stati Uniti e il Giappone, dove il settore agricolo beneficia di consistenti politiche di sostegno, l'AdP è oggi orientata principalmente al miglioramento della sostenibilità ambientale, della qualità e della sicurezza delle produzioni, oltre che alla riduzione dei costi e al miglioramento della tracciabilità delle filiere agroalimentari (Pisante, 2013). Nei Paesi emergenti, invece, tali tecnologie si stanno diffondendo più lentamente, principalmente a causa degli elevati investimenti iniziali richiesti e della necessità di personale adeguatamente formato per la loro gestione (Getahun et al., 2024).

L'Argentina rappresenta un caso particolare. Le dimensioni mediamente elevate delle aziende agricole e la forte vocazione all'agricoltura estensiva rendono infatti il Paese particolarmente favorevole all'adozione delle tecnologie di AdP. Tuttavia, poiché una parte rilevante dell'economia nazionale è legata alle esportazioni agricole, gli obiettivi prioritari del settore rimangono l'incremento della produttività, il miglioramento della qualità delle produzioni e il mantenimento della competitività sui mercati internazionali (Pisante, 2013).

Nonostante le favorevoli prospettive di sviluppo, la diffusione dell'AdP incontra ancora numerosi ostacoli. Il principale consiste nell'integrare efficacemente queste tecnologie nelle normali attività aziendali e nel garantirne una gestione corretta nel tempo. Diversi studi evidenziano come l'adozione dell'AdP sia influenzata da fattori strutturali, economici, tecnologici e socio-culturali (Maloku, 2020). Tra questi assumono particolare rilievo la dimensione aziendale, l'età, il livello di formazione e l'esperienza dell'imprenditore agricolo, la disponibilità di risorse finanziarie, la difficoltà di accesso al credito e il livello di sviluppo delle infrastrutture tecnologiche.

Negli ultimi anni sono inoltre emerse nuove criticità legate alla crescente digitalizzazione del settore agricolo. La raccolta e la gestione di grandi quantità di dati georeferenziati richiedono frequentemente l'impiego di piattaforme software sviluppate da aziende private, sollevando problematiche relative alla proprietà, alla sicurezza e alla riservatezza dei dati. Tali aspetti possono generare una certa riluttanza da parte degli agricoltori nel condividere le informazioni aziendali con soggetti esterni, rappresentando un'ulteriore barriera alla diffusione delle tecnologie di AdP (Karunathilake et al., 2023).

Nonostante tali limitazioni, il continuo sviluppo delle tecnologie digitali, la progressiva riduzione dei costi dei sistemi di acquisizione dati e la crescente disponibilità di immagini satellitari ad elevata risoluzione stanno contribuendo a rendere l'AdP sempre più accessibile anche a realtà produttive di dimensioni medio-piccole, favorendone una progressiva diffusione.

Capitolo 4
TELERILEVAMENTO E INDICI VEGETATIVI

Il telerilevamento (remote sensing) rappresenta oggi una delle principali tecnologie a supporto dell'AdP. Grazie alla possibilità di acquisire in modo rapido, non distruttivo e georeferenziato informazioni sullo stato del suolo e delle colture, esso costituisce uno strumento fondamentale per il monitoraggio degli agroecosistemi e per la gestione sito-specifica delle operazioni colturali. L'analisi della radiazione elettromagnetica riflessa dalla superficie terrestre consente infatti di ottenere informazioni quantitative sulle proprietà biofisiche della vegetazione e del suolo, fornendo dati utili alla caratterizzazione della variabilità spaziale degli appezzamenti (Grisso et al., 2009).

La possibilità di acquisire informazioni in differenti regioni dello spettro elettromagnetico, dal visibile fino alle microonde, rende il telerilevamento uno strumento estremamente versatile. Le sue applicazioni comprendono il monitoraggio dello sviluppo vegetativo, la valutazione dello stato nutrizionale e idrico delle colture, la stima della biomassa e della produttività, nonché l'individuazione precoce di condizioni di stress biotico e abiotico. A tale scopo vengono impiegati sensori multispettrali, iperspettrali e termici, sistemi LiDAR (Light Detection and Ranging) e tecniche di spettroscopia a fluorescenza (Sharma et al., 2024).

L'elevata quantità e qualità delle informazioni ottenibili attraverso il telerilevamento consente di descrivere la variabilità dell'agroecosistema nel suo complesso, comprendendo le caratteristiche del suolo, lo stato fisiologico della coltura e le condizioni ambientali. Tali dati costituiscono la base per il calcolo degli indici vegetativi e per la realizzazione di mappe tematiche, strumenti indispensabili per individuare carenze nutrizionali e idriche, monitorare lo sviluppo della coltura, valutare la risposta agli interventi agronomici e supportare pratiche agricole più sostenibili ed efficienti nell'impiego delle risorse (Kuunya et al., 2026).

Nel presente lavoro il telerilevamento riveste un ruolo centrale, poiché rappresenta la principale fonte di informazioni per l'analisi della variabilità produttiva del frumento. In particolare, attraverso l'elaborazione di immagini multispettrali acquisite dalla costellazione PlanetScope saranno calcolati diversi indici vegetativi, successivamente confrontati con le

mappe di resa georeferenziate al fine di valutarne la capacità di descrivere la variabilità spaziale della produzione e di supportare l'individuazione di aree a differente potenziale produttivo.

Per comprendere il contributo del telerilevamento all'AdP è innanzitutto necessario richiamare i principi fisici alla base dell'interazione tra radiazione elettromagnetica e superficie terrestre, sui quali si fondano le diverse tecniche di acquisizione e interpretazione delle immagini satellitari.

4.1 **Le radiazioni elettromagnetiche**

Il principio di funzionamento del telerilevamento si basa sull'interazione tra la radiazione elettromagnetica e la superficie terrestre. La radiazione elettromagnetica è una forma di energia che si propaga nello spazio come un'onda, generata dalla simultanea oscillazione di un campo elettrico e di un campo magnetico, reciprocamente perpendicolari tra loro e alla direzione di propagazione (**Fig. 4.1**). A differenza delle onde meccaniche, essa può propagarsi sia nel vuoto sia nei mezzi materiali (Cozzi et al., 2013).

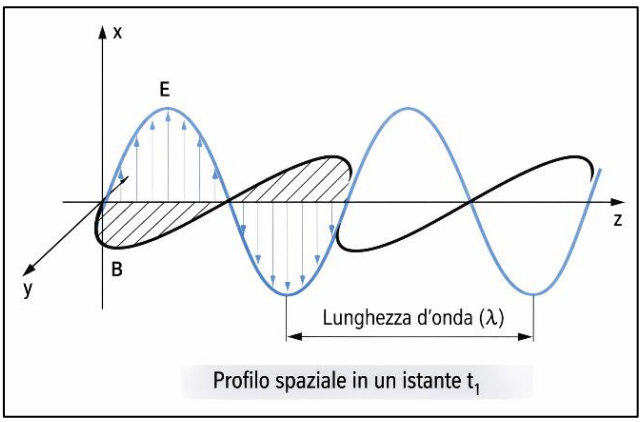


Fig. 4.1 – Onda elettromagnetica. E: campo elettrico; B: campo magnetico (Cozzi et al., 2013).

Ogni onda elettromagnetica è descritta da alcuni parametri fondamentali, tra cui la lunghezza d'onda (λ), ossia la distanza tra due punti consecutivi in fase, la frequenza, corrispondente al numero di oscillazioni nell'unità di tempo, il periodo, l'ampiezza e l'intensità, che rappresenta l'energia trasportata dall'onda attraverso una superficie unitaria. L'energia associata a una radiazione è direttamente proporzionale alla sua frequenza e inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda (Cozzi et al., 2013).

L'insieme di tutte le radiazioni elettromagnetiche costituisce lo spettro elettromagnetico (**Fig. 4.2**), che comprende un intervallo di lunghezze d'onda estremamente ampio, dalle onde radio ai raggi cosmici.

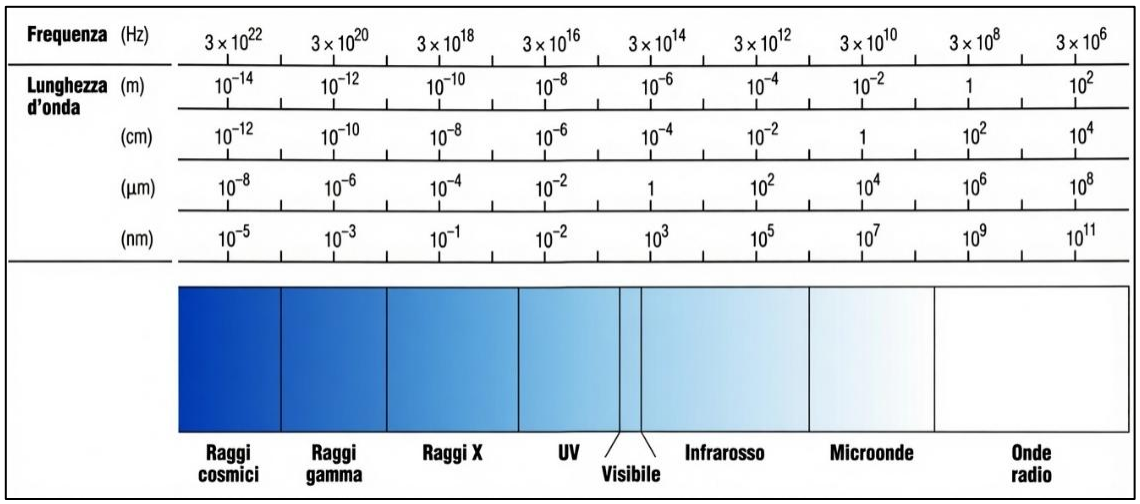


Fig. 4.2 – Spettro elettromagnetico (Cozzi et al., 2013).

Secondo la fisica quantistica, ogni radiazione elettromagnetica consiste nell'emissione di un numero enorme di "pacchetti di energia" o "quanti di luce", anche detti fotoni. Per questo motivo, oltre ad avere proprietà ondulatorie, la radiazione elettromagnetica possiede anche proprietà corpuscolari, siccome i fotoni hanno caratteristiche simili sia a quelle di un'onda che a quelle di una particella (Cozzi et al., 2013).

Quando una radiazione elettromagnetica interagisce con la materia possono verificarsi contemporaneamente tre fenomeni fondamentali (Cozzi et al., 2013):

- Trasmissione, quando la radiazione attraversa totalmente o parzialmente un materiale trasparente o semitrasparente;
- Assorbimento, quando l'energia radiante viene assorbita dalla materia e successivamente trasformata, generalmente sotto forma di energia termica;
- Riflessione, quando la radiazione viene respinta dalla superficie del materiale.

La diversa proporzione con cui questi tre fenomeni si manifestano dipende sia dalle caratteristiche della radiazione incidente sia dalle proprietà fisiche e chimiche del materiale colpito. Nel caso della vegetazione, ad esempio, la riflettanza varia in funzione della struttura fogliare, del contenuto di clorofilla e di acqua e dello stato fisiologico della coltura. Proprio tali differenze costituiscono il principio fisico sul quale si basano il telerilevamento e il calcolo degli indici vegetativi descritti nei paragrafi successivi.

Nell'ambito del telerilevamento vengono utilizzate principalmente le regioni del visibile, del vicino infrarosso (Near Infrared, NIR), dell'infrarosso a onde corte (Short Wave Infrared, SWIR) e, in alcune applicazioni, dell'infrarosso termico e delle microonde, poiché forniscono informazioni sulle caratteristiche biofisiche della vegetazione, del suolo e del contenuto idrico.

4.2 **Telerilevamento: generalità, sensori e piattaforme**

4.2.1 *Generalità del telerilevamento*

Il telerilevamento (remote sensing) è una tecnica che consente l'acquisizione a distanza di informazioni riguardanti la superficie terrestre e l'ambiente, nonché l'insieme dei metodi e delle procedure utilizzati per la loro elaborazione e interpretazione. Il suo principio di funzionamento si basa sulla possibilità di distinguere gli oggetti presenti sulla superficie terrestre attraverso l'analisi della radiazione elettromagnetica da essi riflessa, trasmessa o emessa. L'obiettivo è quello di descrivere le caratteristiche fisiche e biofisiche dei diversi elementi territoriali, quali suolo, vegetazione e corpi idrici, mediante l'analisi del loro comportamento spettrale alle diverse lunghezze d'onda cui sono sensibili i sensori (Gomarasca, 1998).

L'acquisizione delle informazioni avviene mediante sensori che operano senza entrare in contatto diretto con l'oggetto osservato. Tali strumenti misurano la risposta della superficie terrestre all'interazione con la radiazione elettromagnetica, consentendo non solo un'analisi qualitativa e descrittiva delle immagini, ma anche una valutazione quantitativa di numerosi parametri fisici e biofisici. Attraverso queste informazioni è infatti possibile riconoscere indirettamente la struttura degli elementi territoriali, stimare caratteristiche quali la temperatura superficiale oppure analizzare la distribuzione spaziale di specifici parametri ambientali e colturali (Gomarasca, 1998).

Nelle applicazioni agricole il telerilevamento si basa prevalentemente sulla misura della radiazione riflessa dalle superfici, piuttosto che su quella trasmessa o assorbita (Mulla, 2013). Lo scopo è stabilire una corrispondenza tra la quantità e la qualità dell'energia riflessa e le caratteristiche della superficie osservata. Ogni materiale, infatti, riflette la radiazione elettromagnetica in modo differente in funzione delle proprie caratteristiche fisiche e chimiche; il rapporto tra l'intensità della radiazione riflessa e quella incidente prende il nome di riflettanza ed è caratteristico di ciascun materiale (Gomarasca, 1998).

La variazione della riflettanza in funzione della lunghezza d'onda prende il nome di firma spettrale ed è generalmente rappresentata mediante un grafico in cui la lunghezza d'onda è riportata in ascissa e la riflettanza in ordinata (**Fig. 4.3**) (Casa, 2024). La firma spettrale costituisce il principale strumento per distinguere i diversi elementi presenti sulla superficie terrestre e rappresenta il fondamento teorico dell'interpretazione delle immagini telerilevate.

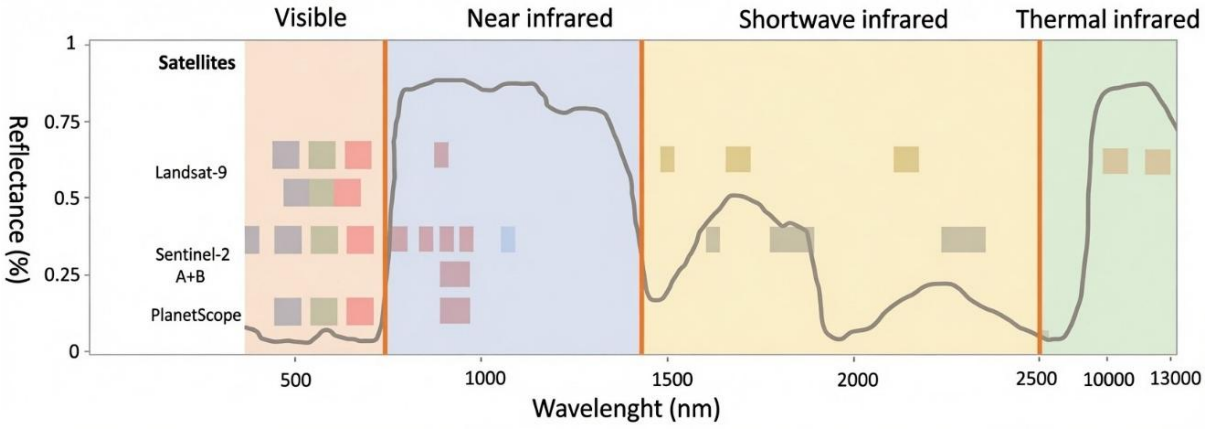


Fig. 4.3 – Firma spettrale della vegetazione e bande spettrali disponibili in alcuni sensori satellitari (Landsat-9, Sentinel-2 e PlanetScope) (Segarra, 2024).

Nell'AdP il telerilevamento genera una grande quantità di dati caratterizzati da elevata risoluzione spaziale, spettrale, radiometrica e temporale. L'integrazione di tali informazioni con le moderne tecniche di elaborazione dei dati, comprese quelle basate sull'intelligenza artificiale, consente di supportare il processo decisionale in numerosi ambiti applicativi, dalla gestione delle colture erbacee, orticole e foraggere fino alla viticoltura e all'allevamento (Sishodia et al., 2020).

La capacità di interpretare correttamente la risposta spettrale delle superfici rappresenta quindi il presupposto per lo sviluppo di numerose applicazioni del telerilevamento in agricoltura, tra cui il calcolo degli indici vegetativi, il monitoraggio dello stato fisiologico delle colture e la valutazione della variabilità spaziale degli appezzamenti. Nei paragrafi successivi saranno descritti i principali sensori, le piattaforme di acquisizione e le caratteristiche delle immagini telerilevate utilizzate nelle applicazioni di AdP.

4.2.2 *Sensori per il telerilevamento*

Le informazioni acquisite mediante telerilevamento dipendono dalle caratteristiche dei sensori impiegati, che rappresentano l'elemento fondamentale di ogni sistema di osservazione della superficie terrestre. Nel corso degli ultimi decenni tali strumenti si sono evoluti da semplici sistemi ottici a sensori digitali sempre più sofisticati, consentendo l'acquisizione di immagini caratterizzate da elevata qualità e da un crescente livello di dettaglio spaziale, spettrale e radiometrico (Adamchuk et al., 2007).

Dal punto di vista del principio di funzionamento, i sensori possono essere distinti in passivi e attivi. I sensori passivi rilevano la radiazione elettromagnetica naturalmente riflessa o emessa dalla superficie terrestre, sfruttando prevalentemente l'energia proveniente dal sole. Essi

costituiscono la categoria maggiormente utilizzata nelle applicazioni agricole e comprendono la maggior parte dei sensori installati sui satelliti e sugli aeromobili impiegati per il monitoraggio delle colture. I sensori attivi, invece, sono dotati di una propria sorgente di radiazione, che viene emessa verso la superficie e successivamente registrata dopo l'interazione con il bersaglio, consentendo misurazioni indipendenti dalle condizioni di illuminazione naturale (Adamchuk et al., 2007).

In funzione dell'intervallo di lunghezze d'onda rilevate, i sensori ottici possono inoltre essere distinti in pancromatici, RGB, multispettrali e iperspettrali. I sensori pancromatici acquisiscono informazioni in un'unica ampia banda dello spettro elettromagnetico, mentre i sensori RGB registrano esclusivamente le bande del visibile (rosso, verde e blu). I sensori multispettrali rilevano un numero limitato di bande, generalmente inferiore a dieci, opportunamente selezionate nelle regioni del visibile e dell'infrarosso, risultando oggi i più diffusi nelle applicazioni di AdP. I sensori iperspettrali, invece, acquisiscono informazioni in decine o centinaia di bande molto strette e contigue, consentendo una caratterizzazione estremamente dettagliata delle proprietà biofisiche della vegetazione e del suolo (Adamchuk et al., 2007).

Accanto ai sensori ottici trovano crescente impiego anche altre tipologie di strumenti, quali i sensori termici, i sensori a microonde e i sistemi LiDAR (Light Detection and Ranging) (Sishodia et al., 2020).

I sensori termici misurano l'energia emessa dalla vegetazione nella regione dell'infrarosso termico, consentendo di stimare la temperatura superficiale delle colture. Tale parametro è strettamente correlato allo stato idrico della pianta e può essere utilizzato per la valutazione dello stress idrico, della traspirazione e dell'evapotraspirazione, fornendo informazioni utili alla gestione dell'irrigazione (Casa, 2024; Sishodia et al., 2020).

I sensori a microonde operano nella corrispondente regione dello spettro elettromagnetico e possono essere sia passivi sia attivi. Essi sono impiegati principalmente per la stima dell'umidità del suolo e del contenuto idrico della vegetazione su vaste superfici, fornendo informazioni utili per la valutazione dello stato idrico delle colture e per il supporto alle decisioni irrigue. I sensori a microonde possono operare sia in modalità passiva, misurando la radiazione naturalmente emessa dalla superficie terrestre, sia in modalità attiva, emettendo un proprio segnale elettromagnetico e registrandone la radiazione diffusa. Tuttavia, soprattutto nel caso dei sensori passivi, la limitata risoluzione spaziale ne riduce l'impiego nelle applicazioni

di AdP, dove sono generalmente richiesti dati ad elevato dettaglio spaziale (Sishodia et al., 2020).

Tra le tecnologie più innovative rientrano infine i sistemi LiDAR, che consentono di acquisire informazioni tridimensionali sulla struttura della vegetazione. Il principio di funzionamento consiste nell'emissione di impulsi laser verso il bersaglio e nella misura del tempo impiegato dal segnale riflesso per ritornare al sensore. Integrando tali informazioni con il posizionamento fornito dai sistemi GNSS è possibile determinare con elevata precisione la posizione dei punti rilevati e ricostruire la struttura tridimensionale della coltura, rendendo questi sistemi particolarmente utili per la stima della biomassa, del Leaf Area Index (LAI) e di altri parametri strutturali della vegetazione (Casa, 2024).

Le diverse tipologie di sensori possono essere installate su differenti piattaforme di acquisizione, quali satelliti, aeromobili, velivoli a pilotaggio remoto e sistemi terrestri. Le caratteristiche e le potenzialità delle principali piattaforme utilizzate nelle applicazioni di AdP saranno descritte nei paragrafi successivi.

4.2.3 *Risoluzione delle immagini telerilevate*

Le prestazioni di un sistema di telerilevamento dipendono non solo dalle caratteristiche del sensore impiegato, ma anche dalla qualità delle immagini acquisite. A tale scopo vengono generalmente considerate quattro tipologie di risoluzione, che descrivono la capacità del sensore di rappresentare le caratteristiche della superficie osservata: risoluzione spaziale, spettrale, temporale e radiometrica (Gomarasca, 1998; Adamchuk et al., 2007) (**Tab. 4.1**).

- **Risoluzione spaziale:** rappresenta la dimensione della più piccola area al suolo distinguibile dal sensore ed è direttamente correlata alle dimensioni del pixel dell'immagine. Ogni immagine telerilevata è infatti costituita da un insieme di pixel, ciascuno dei quali rappresenta l'energia elettromagnetica proveniente da una determinata porzione di superficie terrestre (Gomarasca, 1998). La distanza tra il sensore e il bersaglio, così come l'angolo di osservazione, influenzano la superficie rappresentata da ciascun pixel. Le immagini utilizzate nelle applicazioni agricole possono presentare risoluzioni spaziali molto differenti, inferiori al metro nel caso di rilievi aerei o mediante UAV, fino a decine di metri per molte piattaforme satellitari (Adamchuk et al., 2007).
- **Risoluzione spettrale**: indica l'intervallo di lunghezze d'onda che il sensore è in grado di rilevare ed è definita dal numero di bande spettrali acquisite e dalla loro ampiezza

(Gomarasca, 1998). In funzione di tali caratteristiche si distinguono sensori pancromatici, RGB, multispettrali e iperspettrali. Una maggiore risoluzione spettrale permette di discriminare con maggiore accuratezza le differenti caratteristiche della vegetazione e del suolo (Adamchuk et al., 2007).

- **Risoluzione temporale**: corrisponde all'intervallo di tempo che intercorre tra due acquisizioni successive della stessa area (Gomarasca, 1998). Questo parametro assume particolare importanza nel monitoraggio delle colture, poiché consente di seguire l'evoluzione delle condizioni vegetative durante il ciclo colturale e di rilevare tempestivamente eventuali condizioni di stress (Adamchuk et al., 2007).
- **Risoluzione radiometrica**: descrive la sensibilità del sensore nel discriminare differenti livelli di energia elettromagnetica provenienti dalla superficie osservata (Adamchuk et al., 2007). Essa è legata alla capacità dello strumento di rilevare anche piccole variazioni dell'intensità della radiazione riflessa o emessa, distinguendole dal rumore di fondo del sistema di acquisizione (Gomarasca, 1998).

Tab. 4.1 – Risoluzione dei sensori di acquisizione.

Tipo di risoluzione	Definizione	Rilevanza per l'AdP
Spaziale	Dimensione del pixel	Individuazione della variabilità all'interno dell'appezzamento
Spettrale	Numero e ampiezza delle bande	Calcolo degli indici vegetativi e discriminazione delle colture
Temporale	Frequenza di acquisizione	Monitoraggio dell'evoluzione della coltura
Radiometrica	Sensibilità del sensore	Rilevazione di piccole variazioni della riflettanza

Le quattro tipologie di risoluzione concorrono complessivamente a determinare la qualità dell'informazione telerilevata e devono essere valutate congiuntamente nella scelta della piattaforma e del sensore più idonei. In ambito agricolo, la combinazione di un'elevata risoluzione spaziale e temporale rappresenta spesso un requisito fondamentale per il monitoraggio della variabilità colturale e per le applicazioni di AdP.

4.2.4 *Piattaforme per il telerilevamento*

I sensori utilizzati nel telerilevamento possono essere installati su differenti piattaforme di acquisizione, la cui scelta dipende dalla scala di osservazione, dal livello di dettaglio richiesto,

dalla frequenza di acquisizione e dai costi operativi. Nelle applicazioni agricole le principali piattaforme possono essere raggruppate in tre categorie: satellitari, aeree e terrestri (**Fig. 4.4**) (Sishodia et al., 2020).

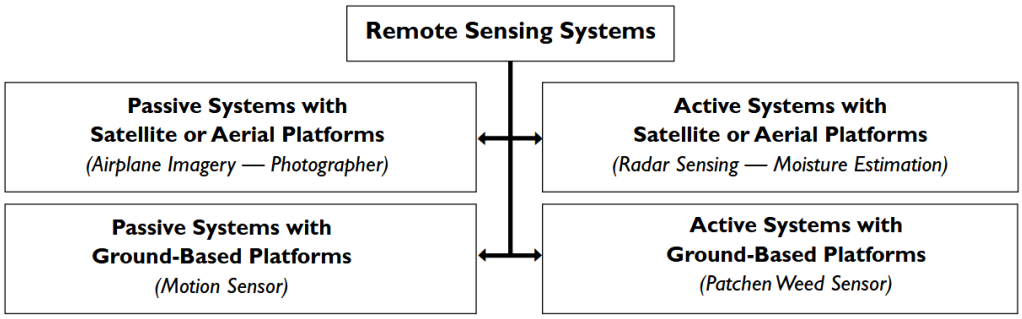


Fig. 4.4 – Principali piattaforme per il telerilevamento impiegate nelle applicazioni di AdP (Adamchuk et al., 2007).

Le piattaforme satellitari rappresentano oggi la soluzione maggiormente impiegata per il monitoraggio di vaste superfici agricole, grazie alla loro capacità di acquisire immagini in modo sistematico, standardizzato e ripetitivo. Esse consentono di monitorare nel tempo l'evoluzione delle colture su estensioni molto ampie, risultando particolarmente adatte alla produzione di mappe tematiche e al monitoraggio della variabilità spaziale degli appezzamenti.

Le piattaforme aeree, comprendenti aeromobili tradizionali e UAV, permettono invece di acquisire immagini ad elevata risoluzione spaziale e con elevata flessibilità operativa. In particolare, gli UAV hanno conosciuto una rapida diffusione negli ultimi anni grazie alla possibilità di effettuare rilievi on-demand, adattando il momento dell'acquisizione alle esigenze della coltura e riducendo le limitazioni dovute ai tempi di rivisitazione dei satelliti (Sishodia et al., 2020).

Le piattaforme terrestri, infine, comprendono sensori installati direttamente su trattori, macchine operatrici o veicoli autonomi. Tali sistemi, generalmente indicati come proximal sensing, operano a breve distanza dal bersaglio e consentono di acquisire dati caratterizzati da elevata accuratezza e risoluzione spaziale, risultando particolarmente efficaci per il monitoraggio delle proprietà del suolo e dello stato fisiologico della vegetazione (Sishodia et al., 2020).

Negli ultimi anni si è assistito inoltre allo sviluppo di piattaforme robotiche autonome, quali gli Unmanned Ground Vehicles (UGV), in grado di operare in ambienti agricoli complessi. Sebbene il loro impiego sia ancora limitato dagli elevati costi e dalla ridotta velocità operativa, tali sistemi presentano interessanti prospettive di sviluppo grazie al ridotto compattamento del terreno, alla capacità di operare anche in condizioni difficili e alla possibilità

di automatizzare operazioni potenzialmente rischiose per gli operatori, come i trattamenti fitosanitari (Casa, 2024).

Ciascuna piattaforma presenta pertanto specifici vantaggi e limitazioni in termini di copertura spaziale, risoluzione, frequenza di acquisizione, flessibilità operativa e costi. Per questo motivo, la scelta della soluzione più idonea dipende dagli obiettivi dell'applicazione e dalla scala di osservazione richiesta. Nelle applicazioni di AdP è sempre più frequente l'integrazione di dati provenienti da differenti piattaforme, così da sfruttarne le rispettive potenzialità.

Poiché il presente lavoro si basa sull'elaborazione di immagini satellitari multispettrali, nel paragrafo successivo saranno approfondite le principali piattaforme satellitari utilizzate nelle applicazioni agricole, con particolare attenzione alla costellazione PlanetScope, impiegata nel caso di studio.

4.2.5 *Evoluzione delle piattaforme satellitari*

L'impiego dei satelliti ha rappresentato una delle principali innovazioni nello sviluppo del telerilevamento applicato all'agricoltura. A partire dagli anni Settanta, la crescente disponibilità di immagini satellitari ha consentito di monitorare in modo sistematico vaste superfici agricole, favorendo lo sviluppo di numerose applicazioni nell'ambito della gestione delle risorse naturali e, successivamente, dell'AdP.

Il primo programma satellitare dedicato all'osservazione sistematica della superficie terrestre fu Landsat, avviato dalla National Aeronautics and Space Administration (NASA) con il lancio di Landsat-1 nel 1972. Successivamente il programma è stato sviluppato congiuntamente dalla NASA e dallo United States Geological Survey (USGS), dando origine a una serie di satelliti che hanno fornito immagini multispettrali di elevata qualità per il monitoraggio ambientale e agricolo. L'attuale Landsat-9, lanciato nel 2021, acquisisce immagini multispettrali con risoluzione spaziale di 30 m e continua a rappresentare una delle principali fonti di dati per studi territoriali e applicazioni agricole, quali la classificazione dell'uso del suolo, il monitoraggio delle colture e la stima del fabbisogno irriguo (Sishodia et al., 2020).

Un ulteriore progresso si è avuto con il programma Copernicus dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e, in particolare, con la costellazione Sentinel-2, progettata specificamente anche per rispondere alle esigenze del settore agricolo. La costellazione è costituita dai satelliti Sentinel-2A lanciato il 23 giugno 2023 e da Sentinel-2B, lanciato il 7 marzo 2017, dotati di

sensori multispettrali con una risoluzione spaziale fino a 10 m e un tempo di rivisitazione di circa 5 giorni, riducibile fino a 2 giorni alle alte latitudini. Un ulteriore punto di forza della missione Sentinel-2 è rappresentato dalla libera disponibilità dei dati, che ha favorito un'ampia diffusione delle applicazioni di telerilevamento in ambito agricolo e ambientale (Segarra et al., 2020).

Sebbene Landsat e Sentinel-2 abbiano contribuito in maniera determinante allo sviluppo dell'AdP, in molte applicazioni essi non soddisfano pienamente i requisiti di risoluzione spaziale e temporale richiesti per il monitoraggio dettagliato delle colture. A tali limitazioni si aggiungono i lunghi tempi necessari per la progettazione e il lancio delle tradizionali piattaforme satellitari (Sishodia et al., 2020; Frazier & Hemingway, 2021).

Per superare tali criticità, negli ultimi anni si è assistito alla diffusione delle costellazioni di nanosatelliti, caratterizzate da dimensioni ridotte, costi di produzione inferiori e maggiore rapidità di realizzazione rispetto ai satelliti tradizionali. Grazie al loro numero elevato e alla possibilità di essere lanciati come carico secondario in altre missioni spaziali, tali sistemi consentono di incrementare sensibilmente la frequenza di acquisizione delle immagini mantenendo, al tempo stesso, un'elevata risoluzione spaziale (Sishodia et al., 2020).

Tra le aziende che hanno maggiormente innovato questo settore si distingue Planet Labs Inc., che ha sviluppato la costellazione PlanetScope, costituita da una rete di piccoli satelliti (smallsat o CubeSat) progettati per l'osservazione quotidiana della superficie terrestre. Le dimensioni contenute dei satelliti, paragonabili a quelle di un piccolo filone di pane, consentono una produzione rapida, costi relativamente contenuti e una maggiore facilità di sostituzione rispetto ai satelliti convenzionali (Frazier & Hemingway, 2021).

Attualmente la costellazione PlanetScope comprende tre principali generazioni di satelliti (Dove Classic, Dove-R e SuperDove), con più di 180 piattaforme in orbita, tutte caratterizzate da una risoluzione spaziale di circa 3 m, ma differenti per numero di bande spettrali e prestazioni radiometriche. In particolare, la più recente generazione SuperDove dispone di otto bande multispettrali, comprendenti Coastal Blue, Blue, Green I, Green II, Yellow, Red, Red Edge e NIR, che consentono una caratterizzazione più dettagliata dello stato della vegetazione rispetto alle precedenti generazioni (**Fig. 4.5**) (Frazier & Hemingway, 2021).

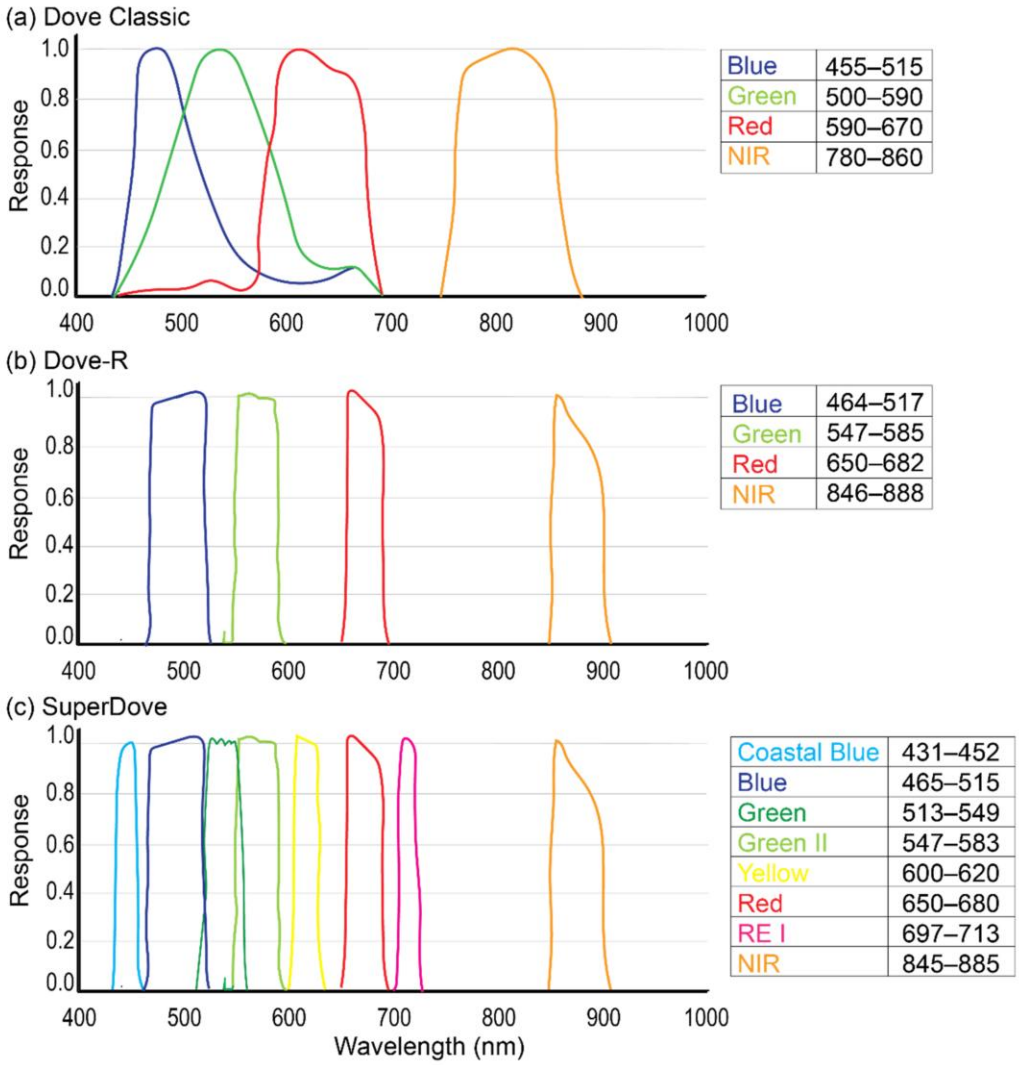


Fig. 4.5 – Risposte spettrali dei sensori installati sui satelliti PlanetScope: (a) Dove Classic 'PS2', quattro bande (RGB-NIR); (b) Dove-R 'PS2.SD', quattro bande (RGB-NIR) ma con migliore separazione tra le bande; (c) SuperDove 'PSB.SD', otto bande, Blue, Green II, Red, NIR, Coastal Blue, Green, Yellow, Red-Edge (Frazier & Hemingway, 2021).

L'elevata risoluzione spaziale, la frequenza di acquisizione pressoché giornaliera e la disponibilità di bande specifiche, quali la Red Edge, rendono PlanetScope particolarmente adatto alle applicazioni di AdP. Tali caratteristiche consentono infatti di monitorare con elevato dettaglio la variabilità spaziale delle colture, seguire la loro evoluzione durante il ciclo colturale e calcolare numerosi indici vegetativi utilizzati per valutare vigore vegetativo, stato nutrizionale e condizioni di stress.

Per le caratteristiche descritte, PlanetScope rappresenta la piattaforma satellitare di riferimento del presente studio. Le immagini acquisite da questa costellazione, saranno

utilizzate per il calcolo e il confronto degli indici vegetativi, successivamente correlati con le mappe di resa georeferenziate al fine di analizzare la variabilità produttiva del frumento.

4.2.6 *Piattaforme prossimali e sviluppi recenti*

Nonostante il continuo miglioramento delle piattaforme satellitari, il loro impiego nelle applicazioni di AdP presenta ancora alcune limitazioni, legate principalmente alla copertura nuvolosa, alla flessibilità operativa e, in alcune applicazioni, alla risoluzione spaziale e temporale richiesta (Sishodia et al., 2020; Casa, 2024).

Per superare tali criticità, negli ultimi anni hanno assunto un ruolo sempre più importante le piattaforme UAV. Questi sistemi, equipaggiati con sensori multispettrali, iperspettrali, termici o LiDAR, consentono di acquisire dati on-demand, con risoluzione spaziale centimetrica e nel momento ritenuto più opportuno in funzione dello stadio fenologico della coltura. Inoltre, l'acquisizione a bassa quota permette di ridurre le problematiche associate alla copertura nuvolosa e di ottenere immagini particolarmente dettagliate, risultando particolarmente adatta al monitoraggio del ciclo colturale e alle applicazioni di AdP (Sishodia et al., 2020).

Oltre al monitoraggio, gli UAV trovano impiego anche nella gestione operativa delle colture. In particolare, possono essere utilizzati per l'irrorazione di prodotti fitosanitari e per interventi mirati in situazioni in cui l'accesso con i mezzi agricoli tradizionali risulta difficoltoso, come nei terreni caratterizzati da elevate pendenze o da condizioni di elevata umidità del suolo. Un ulteriore vantaggio è rappresentato dai costi relativamente contenuti rispetto alle tradizionali campagne di rilievo aereo, rendendo tali sistemi particolarmente interessanti anche per aziende agricole di piccole e medie dimensioni (Casa, 2024; Sishodia et al., 2020).

Tra gli sviluppi più recenti rientrano anche le piattaforme robotiche terrestri, costituite dai cosiddetti Unmanned Ground Vehicles (UGV) o rover autonomi. Questi sistemi sono progettati per operare direttamente all'interno degli appezzamenti agricoli, consentendo l'acquisizione di dati ad altissima risoluzione e l'esecuzione automatizzata di specifiche operazioni colturali. Sebbene il loro impiego sia ancora limitato dagli elevati costi e dalla ridotta velocità operativa, gli UGV presentano interessanti prospettive di sviluppo grazie al minore compattamento del terreno, alla capacità di operare anche in condizioni difficili e alla possibilità di sostituire gli operatori nelle attività maggiormente esposte a rischi per la salute, quali i trattamenti fitosanitari (Casa, 2024).

L'evoluzione delle piattaforme di acquisizione evidenzia come il telerilevamento stia progressivamente integrando strumenti caratterizzati da differenti livelli di dettaglio spaziale, temporale e operativo. La crescente disponibilità di dati provenienti da satelliti, UAV e piattaforme terrestri offre oggi nuove opportunità per il monitoraggio delle colture e per l'implementazione di strategie di AdP sempre più efficaci. Nel presente lavoro, tuttavia, l'analisi sarà focalizzata sulle immagini multispettrali acquisite dalla costellazione PlanetScope, che rappresenta la base informativa utilizzata per il calcolo degli indici vegetativi e la successiva analisi della variabilità produttiva del frumento.

4.3 **Indici vegetativi**

4.3.1 *Principi teorici degli indici vegetativi*

Gli indici vegetativi (Vegetation Indices, VIs) rappresentano uno degli strumenti più utilizzati nell'ambito del telerilevamento applicato all'AdP. Essi derivano dall'elaborazione matematica della riflettanza misurata in differenti bande dello spettro elettromagnetico e consentono di ottenere informazioni sintetiche sullo stato della vegetazione, supportando il monitoraggio delle colture e la valutazione della loro variabilità spaziale e temporale (Sishodia et al., 2020; Phang et al., 2023).

Il calcolo degli indici vegetativi si basa sul diverso comportamento della vegetazione nei confronti della radiazione elettromagnetica. La quantità di radiazione riflessa dalle piante è infatti inversamente correlata a quella assorbita dai pigmenti vegetali e varia in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente (Mulla, 2013). Inoltre, la riflettanza dipende sia dalle caratteristiche chimiche sia da quelle morfologiche della vegetazione, risultando influenzata dalla specie coltivata, dal contenuto idrico, dalla struttura della chioma e dalle caratteristiche della copertura vegetale (Sishodia et al., 2020).

Tra i pigmenti fotosintetici, la clorofilla riveste un ruolo fondamentale nel determinare la risposta spettrale della vegetazione. Essa assorbe intensamente la radiazione nella regione del visibile (400-700 nm), con massimi di assorbimento intorno a 430 nm e 660 nm per la *clorofilla a* e a 450 nm e 650 nm per la *clorofilla b*. Anche altri pigmenti, quali carotenoidi e antociani, contribuiscono all'assorbimento della radiazione nella regione del visibile. Al contrario, nella regione del NIR (700-1300 nm) la vegetazione presenta valori di riflettanza elevati, principalmente determinati dalla struttura interna delle foglie e dalla densità della copertura vegetale (Mulla, 2013; Sishodia et al., 2020).

Il marcato contrasto tra il forte assorbimento della radiazione nella banda del rosso e l'elevata riflettanza nel vicino infrarosso costituisce il fondamento teorico dello sviluppo degli indici vegetativi. Questi ultimi sono ottenuti combinando matematicamente i valori di riflettanza misurati nelle diverse bande spettrali in un unico parametro numerico, capace di sintetizzare informazioni relative allo stato della vegetazione (Mulla, 2013; Phang et al., 2023).

Gli indici vegetativi, tuttavia, non rappresentano una misura diretta delle caratteristiche della coltura, ma costituiscono indicatori sintetici che consentono di stimare, in modo indiretto, numerosi parametri biofisici mediante relazioni empiriche o modelli calibrati sperimentalmente. Tra le principali applicazioni rientrano la valutazione del vigore vegetativo, della biomassa, dell'attività fotosintetica, del contenuto di clorofilla e dello sviluppo della coltura (Sishodia et al., 2020). Integrando tali informazioni con altri dati agronomici è inoltre possibile ottenere stime indirette di parametri non direttamente misurabili, quali il contenuto di azoto, strettamente correlato alla concentrazione di clorofilla nelle foglie (Segarra et al., 2020).

Il calcolo e la successiva rappresentazione cartografica degli indici vegetativi consentono quindi di descrivere la variabilità spaziale e temporale delle colture, individuando aree caratterizzate da differente sviluppo vegetativo o da possibili condizioni di stress. Per questo motivo, essi costituiscono oggi uno degli strumenti più efficaci a supporto delle strategie di AdP, permettendo di pianificare interventi sito-specifici e di migliorare l'efficienza nell'impiego dei fattori produttivi (Sishodia et al., 2020).

4.3.2 *Classificazione degli indici vegetativi*

Nel corso degli ultimi decenni sono stati sviluppati numerosi indici vegetativi, ciascuno progettato per evidenziare specifiche caratteristiche della vegetazione o per ridurre le limitazioni associate ad altri indici già esistenti. Attualmente sono disponibili centinaia di indici, sviluppati per differenti applicazioni e condizioni colturali; tuttavia, essi possono essere raggruppati in alcune categorie principali sulla base delle proprietà della vegetazione che intendono descrivere (Phang et al., 2023).

In particolare, gli indici vegetativi vengono generalmente classificati in tre gruppi (**Tab. 4.2**):

- Indici della struttura della vegetazione, utilizzati per stimare parametri quali copertura fogliare, biomassa, Leaf Area Index (LAI) e radiazione fotosinteticamente attiva assorbita (Photosynthetically Active Radiation, PAR).

- Indici biochimici, impiegati per valutare caratteristiche legate alla composizione della vegetazione, quali il contenuto di pigmenti fotosintetici, il contenuto idrico, le proteine e altri componenti strutturali delle piante.
- Indici fisiologici o di stress, utilizzati per monitorare lo stato fisiologico della coltura e individuare precocemente condizioni di stress biotico o abiotico, attraverso la valutazione di parametri quali il contenuto di clorofilla, il ciclo delle xantofille o lo stato idrico della vegetazione.

Sebbene siano stati proposti numerosi indici vegetativi, soltanto una parte di essi trova un impiego consolidato nelle applicazioni di AdP. Tra questi, il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) rappresenta l'indice più diffuso e costituisce il punto di riferimento per lo sviluppo di numerosi altri indici, progettati per migliorarne le prestazioni in specifiche condizioni operative (Phang et al., 2023; Vidican et al., 2023).

Tab. 4.2 – Classificazione generale degli indici vegetativi in funzione delle principali proprietà della vegetazione valutate e delle relative applicazioni in AdP.

Categoria	Parametri stimati	Esempi di applicazione
Struttura della vegetazione	Copertura fogliare, biomassa, LAI, PAR	Monitoraggio dello sviluppo della coltura
Biochimica	Clorofilla, pigmenti, contenuto idrico, proteine	Stato nutrizionale e qualità della vegetazione
Fisiologia / Stress	Stress idrico, attività fotosintetica, xantofille	Individuazione precoce di stress biotici e abiotici

4.3.3 *Principali indici vegetativi*

Tra i numerosi indici vegetativi sviluppati nel corso degli anni, gli studi condotti in ambito agricolo si sono concentrati principalmente su un numero relativamente limitato di essi (Vidican et al., 2023). Tali indici differiscono per le bande spettrali utilizzate e per le caratteristiche della vegetazione che consentono di descrivere, risultando quindi più o meno adatti in funzione della coltura, dello stadio fenologico e degli obiettivi dell'analisi.

L'indice maggiormente utilizzato è il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, **Eq. 1**), considerato il riferimento per gran parte delle applicazioni di telerilevamento in agricoltura (Phang et al., 2023). Esso sfrutta il diverso comportamento della vegetazione nelle bande del rosso e del NIR ed è calcolato mediante la seguente relazione:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \qquad \textbf{Eq. 1}$$

L'NDVI assume valori compresi tra -1 e +1, valori positivi elevati sono generalmente associati a vegetazione densa e in buono stato vegetativo, mentre valori prossimi allo zero o negativi corrispondono a superfici prive di vegetazione, quali suolo nudo, aree urbanizzate, acqua o ghiaccio (Sishodia et al., 2020). Grazie alla sua semplicità di calcolo e alla buona correlazione con numerosi parametri biofisici della coltura, esso viene ampiamente utilizzato per stimare biomassa, Leaf Area Index (LAI), vigore vegetativo e attività fotosintetica.
Tuttavia, fattori esterni alle condizioni della vegetazione, quali la riflettanza del suolo, la presenza di residui colturali e gli effetti atmosferici, possono influenzare il valore dell'NDVI, determinando interferenze nella corretta interpretazione dei dati. Inoltre, in presenza di coperture vegetali particolarmente dense, l'indice tende a manifestare fenomeni di saturazione, riducendo la propria sensibilità alle variazioni di biomassa e di LAI (**Fig. 4.6**) (Sishodia et al., 2020).

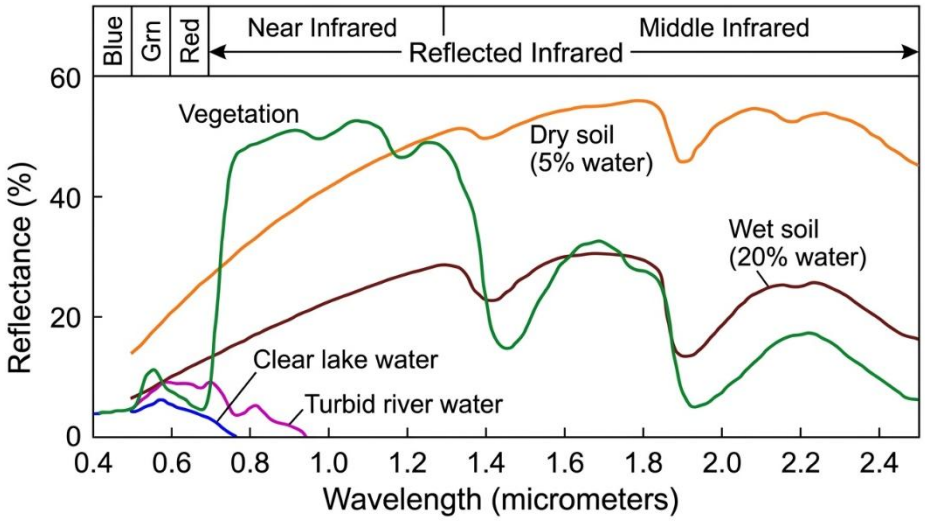


Fig. 4.6 – Tipici spettri di riflessione, o firme spettrali, di suolo, acqua e vegetazione (Sishodia et al., 2020).

Per superare tali limitazioni sono stati sviluppati numerosi indici derivati dall'NDVI, progettati per migliorarne le prestazioni in specifiche condizioni operative.

Tra questi, il Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) introduce un fattore correttivo che riduce l'influenza della riflettanza del suolo, risultando particolarmente utile nelle prime fasi di sviluppo della coltura o in presenza di coperture vegetali discontinue. Il Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI) sostituisce la banda del rosso con quella del verde,

aumentando la sensibilità alle variazioni del contenuto di clorofilla e dell'attività fotosintetica; esso risulta quindi particolarmente indicato nelle colture caratterizzate da elevata copertura vegetale o negli stadi fenologici più avanzati. L'Enhanced Vegetation Index (EVI) è stato invece sviluppato per ridurre gli effetti della saturazione dell'NDVI e delle interferenze atmosferiche, migliorando la capacità di discriminare differenze di biomassa in colture molto sviluppate. Un ulteriore indice frequentemente impiegato è il Ratio Vegetation Index (RVI), ottenuto dal rapporto diretto tra la riflettanza nel vicino infrarosso e quella nella banda del rosso; esso presenta una buona sensibilità alle variazioni della biomassa, pur risultando maggiormente influenzato dal rumore radiometrico e dalle condizioni ambientali.

Un secondo gruppo comprende gli indici che utilizzano la banda Red Edge, regione dello spettro particolarmente sensibile alle variazioni del contenuto di clorofilla e dello stato nutrizionale della vegetazione. Tra questi rientrano il Red-edge NDVI (RNDVI), il Normalized Difference Red Edge (NDRE) e il Red Edge Difference Vegetation Index (REDVI), che hanno mostrato prestazioni superiori rispetto all'NDVI nella stima del contenuto di azoto, del LAI e della biomassa in condizioni di elevata copertura vegetale (Sishodia et al., 2020; Vidican et al., 2023).

Ulteriori indici sfruttano invece informazioni provenienti dalla regione del medio infrarosso (SWIR) o dell'infrarosso termico, risultando particolarmente indicati per la valutazione dello stato idrico delle colture. La riflettanza nelle bande SWIR è infatti strettamente correlata al contenuto idrico della vegetazione e di altri costituenti fogliari, quali zuccheri, carboidrati e proteine, mentre la radiazione emessa nell'infrarosso termico è direttamente correlata alla temperatura della chioma e, quindi, ai processi di traspirazione. Tra gli indici maggiormente utilizzati rientrano il Shortwave Infrared Water Stress Index (SIWSI) e il Crop Water Stress Index (CWSI), ampiamente impiegati per il monitoraggio dello stress idrico, dell'umidità del suolo, delle malattie della vegetazione e per la stima della produttività delle colture (Sishodia et al., 2020).

In generale, la scelta dell'indice vegetativo più appropriato dipende dall'obiettivo dell'indagine, dalla coltura considerata, dallo stadio fenologico e dalle caratteristiche del sensore utilizzato. Alcuni indici, come l'NDVI, trovano impiego in un'ampia gamma di applicazioni, mentre altri sono stati sviluppati per specifiche finalità o risultano maggiormente sensibili in determinate condizioni colturali (Vidican et al., 2023). Nel presente lavoro saranno utilizzati NDVI, NDRE, EVI e RVI, selezionati in quanto calcolabili a partire dalle immagini

multispettrali acquisite da PlanetScope e ampiamente impiegati nella valutazione del vigore vegetativo e della variabilità produttiva delle colture cerealicole.

4.4 **Applicazioni**

Come illustrato nei paragrafi precedenti, il telerilevamento rappresenta una delle principali tecnologie a supporto dell'AdP, poiché consente di acquisire in modo rapido, non distruttivo e georeferenziato informazioni sullo stato del suolo e delle colture. I dati acquisiti mediante differenti sensori, integrati con i sistemi di posizionamento satellitare (GNSS) e con gli strumenti di elaborazione geografica (GIS), costituiscono una base informativa fondamentale per la gestione sito-specifica degli appezzamenti durante l'intero ciclo colturale, dalla semina alla raccolta.

Le immagini multispettrali e iperspettrali consentono infatti di stimare numerosi parametri biofisici, quali la copertura vegetale, il vigore della coltura, il contenuto idrico e altre caratteristiche dello stato fisiologico delle piante. Tali informazioni possono essere impiegate per supportare numerose decisioni agronomiche, tra cui il monitoraggio delle colture, la stima della resa, la gestione dell'irrigazione e della fertilizzazione, il controllo delle fitopatie e delle infestanti e la caratterizzazione delle proprietà del suolo (Liaghat, 2010).

Nei paragrafi seguenti sono illustrate le principali applicazioni del telerilevamento nell'ambito dell'AdP.

4.4.1 *Monitoraggio delle colture*

Il monitoraggio dello stato delle colture rappresenta una delle principali applicazioni del telerilevamento in AdP. La possibilità di acquisire informazioni in modo rapido, non distruttivo e ripetuto durante il ciclo colturale consente infatti di valutare la risposta fisiologica delle piante alle condizioni ambientali e alle pratiche agronomiche, fornendo un supporto fondamentale per la pianificazione degli interventi colturali. Un monitoraggio continuo dello sviluppo della vegetazione contribuisce inoltre al miglioramento della produttività, della sostenibilità e della sicurezza alimentare.

Tra i parametri maggiormente utilizzati per descrivere lo stato della coltura rientrano il Leaf Area Index (LAI) e la biomassa, considerati indicatori fondamentali dello sviluppo vegetativo (**Fig. 4.7**). La loro stima avviene principalmente attraverso il calcolo di diversi indici vegetativi ottenuti da immagini acquisite mediante sensori RGB, NIR o multispettrali in differenti momenti della stagione produttiva. L'analisi temporale di tali dati consente di seguire

l'evoluzione della coltura e di individuare eventuali anomalie nello sviluppo vegetativo (Adamchuk et al., 2007; Sishodia et al., 2020; Phang et al., 2023).

Le informazioni derivate dal telerilevamento permettono inoltre di interpretare i principali fattori che influenzano la crescita delle colture, quali le caratteristiche sito-specifiche dell'appezzamento (ad esempio suolo e topografia), la disponibilità di acqua e nutrienti, la presenza di stress biotici e abiotici e gli effetti delle pratiche agronomiche adottate. In questo modo è possibile identificare precocemente aree caratterizzate da differente vigore vegetativo e pianificare interventi di gestione mirati.

Nelle prime fasi di sviluppo della coltura, la presenza di suolo nudo può influenzare significativamente la risposta spettrale della vegetazione e ridurre l'affidabilità della stima di parametri quali il LAI. Per questo motivo vengono frequentemente impiegati indici vegetativi corretti, in grado di limitare l'influenza della riflettanza del suolo e di altri fattori confondenti. Parallelamente, tecnologie basate su sistemi LiDAR, integrate con dati di posizionamento GNSS, consentono di ricostruire modelli tridimensionali della vegetazione mediante nuvole di punti, migliorando la stima della struttura della coltura e della biomassa (Adamchuk et al., 2007; Sishodia et al., 2020; Phang et al., 2023).

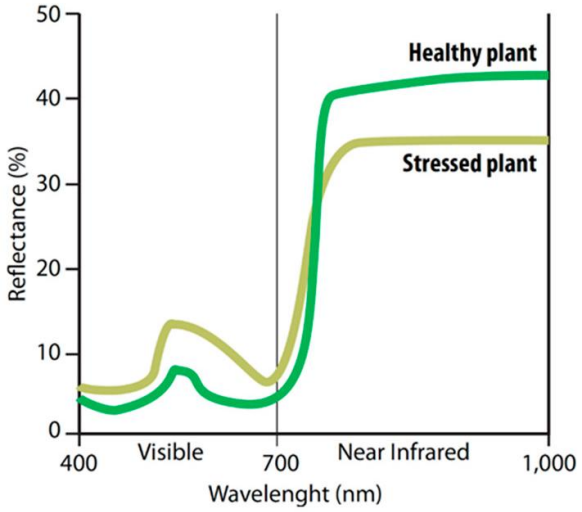


Fig. 4.7 – Confronto tra le firme spettrali di una pianta in buono stato vegetativo e di una pianta soggetta a condizioni di stress (Sishodia et al., 2020).

Le informazioni ottenute dal monitoraggio delle colture costituiscono la base per numerose applicazioni dell'AdP, tra cui la stima della resa, la gestione della fertilizzazione e dell'irrigazione, il monitoraggio fitosanitario e la definizione di strategie di intervento sito-specifiche, descritte nei paragrafi successivi.

4.4.2 *Stima della resa*

La stima della resa rappresenta una delle applicazioni più consolidate del telerilevamento in AdP, in particolare per le colture cerealicole. L'integrazione tra dati satellitari e informazioni georeferenziate provenienti dai sensori installati sulle mietitrebbie consente infatti di realizzare mappe di resa ad elevata risoluzione, in grado di descrivere la variabilità produttiva all'interno dell'appezzamento.

A differenza delle tradizionali valutazioni basate su valori medi aziendali o su campionamenti puntuali, le mappe di resa permettono di evidenziare la distribuzione spaziale della produttività, individuando aree caratterizzate da differenti potenziali produttivi. L'integrazione delle informazioni provenienti dalle immagini satellitari, dagli indici vegetativi e da variabili biofisiche derivate da modelli radiativi, quali il Leaf Area Index (LAI), consente inoltre di interpretare le cause della variabilità osservata, mettendo in relazione la produttività con parametri quali biomassa, stato nutrizionale, disponibilità idrica e sviluppo della coltura (Segarra et al., 2022; Segarra, 2024).

L'analisi congiunta delle mappe di resa e degli indici vegetativi rappresenta quindi uno strumento di particolare interesse per la gestione sito-specifica, poiché consente non solo di identificare le aree a minore produttività, ma anche di comprenderne le possibili cause agronomiche, fornendo informazioni utili alla definizione di strategie di intervento differenziate e all'ottimizzazione dell'impiego dei fattori produttivi.

Nel presente lavoro questa applicazione assume un ruolo centrale. Gli indici vegetativi ottenuti dall'elaborazione delle immagini multispettrali acquisite da PlanetScope saranno infatti confrontati con le mappe di resa georeferenziate, al fine di valutarne la capacità di descrivere la variabilità spaziale della produzione del frumento e di individuare le aree a differente potenziale produttivo.

4.4.3 *Irrigazione*

La gestione dell'irrigazione rappresenta uno degli ambiti nei quali il telerilevamento offre un importante supporto alle strategie di AdP. La possibilità di monitorare la variabilità spaziale delle condizioni idriche all'interno dell'appezzamento consente infatti di programmare interventi irrigui sito-specifici, migliorando l'efficienza nell'utilizzo della risorsa idrica.

Le immagini acquisite nel corso della stagione produttiva permettono di stimare diversi indicatori correlati allo stato idrico della coltura, quali l'evapotraspirazione (ET), l'umidità del suolo e gli indici di stress idrico della vegetazione. L'integrazione di tali informazioni consente

di individuare le aree caratterizzate da differenti fabbisogni irrigui e di pianificare interventi mirati, anche mediante sistemi di irrigazione a rateo variabile, quali i pivot centrali di ultima generazione (Sishodia et al., 2020).

L'adozione di strategie irrigue sito-specifiche permette di ridurre gli sprechi d'acqua, limitare le perdite di nutrienti per lisciviazione e mitigare gli effetti di condizioni di deficit o eccesso idrico, contribuendo al mantenimento di livelli produttivi più uniformi all'interno dell'appezzamento. Oltre ai benefici agronomici, tali approcci consentono una gestione più sostenibile della risorsa idrica, con ricadute positive sia dal punto di vista economico sia ambientale (Sishodia et al., 2020).

L'efficacia di queste applicazioni dipende tuttavia dalla disponibilità di dati acquisiti con adeguata risoluzione spaziale e temporale, in grado di descrivere l'evoluzione dello stato idrico della coltura durante il ciclo vegetativo. In questo contesto, l'integrazione tra dati satellitari, sensori prossimali e modelli agrometeorologici rappresenta oggi uno degli approcci più promettenti per supportare la gestione irrigua di precisione.

4.4.4 *Gestione dei nutrienti*

La gestione della fertilizzazione rappresenta uno degli ambiti nei quali l'AdP ha trovato le prime e più importanti applicazioni. Il fabbisogno di nutrienti delle colture presenta infatti una marcata variabilità sia spaziale sia temporale, influenzata dalle caratteristiche del suolo, dalla topografia, dalle condizioni climatiche, dalle pratiche colturali e dai processi idrologici. Nonostante tale eterogeneità, nella pratica agronomica vengono ancora frequentemente adottate distribuzioni uniformi dei fertilizzanti, che non riflettono le reali esigenze nutrizionali delle diverse aree dell'appezzamento.

Il telerilevamento consente di superare tale limite attraverso il monitoraggio dello stato nutrizionale della coltura e la successiva individuazione della variabilità presente all'interno del campo. In particolare, numerosi indici vegetativi hanno dimostrato una buona capacità di descrivere parametri strettamente correlati allo stato nutrizionale delle piante, quali il contenuto di clorofilla, l'attività fotosintetica, il vigore vegetativo e, più in generale, il potenziale produttivo della coltura. La rappresentazione cartografica di tali parametri costituisce una base informativa fondamentale per la definizione di strategie di fertilizzazione sito-specifiche (Sishodia et al., 2020).

Accanto al telerilevamento satellitare e aereo, sono oggi disponibili sensori prossimali installati sulle macchine agricole in grado di rilevare in tempo reale il vigore vegetativo della

coltura e stimarne il fabbisogno nutrizionale. Integrati con sistemi VRT, tali sensori consentono l'applicazione a rateo variabile dei fertilizzanti durante l'avanzamento della macchina, adeguando la dose distribuita alle esigenze delle diverse aree dell'appezzamento.

Sebbene le principali applicazioni riguardino la gestione dell'azoto, le tecnologie di telerilevamento trovano impiego anche nella valutazione di altre proprietà del suolo, quali il contenuto di sostanza organica e la disponibilità di fosforo. L'integrazione di tali informazioni con altri dati agronomici contribuisce all'individuazione delle management zones e alla pianificazione di strategie di gestione sempre più efficienti e sostenibili (Sishodia et al., 2020).

L'impiego combinato del telerilevamento, della sensoristica prossimale e delle tecnologie di distribuzione a rateo variabile consente quindi di migliorare l'efficienza d'uso dei fertilizzanti, incrementare la produttività e ridurre le perdite di nutrienti verso le acque superficiali e sotterranee, con evidenti benefici sia economici sia ambientali.

4.4.5 *Monitoraggio delle fitopatie*

Il telerilevamento rappresenta uno strumento di crescente interesse per il monitoraggio delle fitopatie, poiché consente di individuare alterazioni morfologiche e fisiologiche della vegetazione senza la necessità di un contatto diretto con la coltura. Le modificazioni indotte dagli agenti patogeni, infatti, determinano variazioni della risposta spettrale delle piante che possono essere rilevate mediante sensori remoti, consentendo di individuare precocemente situazioni di stress rispetto ai tradizionali rilievi visivi in campo (Phang et al., 2023; Sishodia et al., 2020).

Per il monitoraggio fitosanitario sono stati sviluppati sistemi basati su immagini RGB, multispettrali, iperspettrali, termiche e sulla fluorescenza, ciascuno dei quali consente di evidenziare differenti aspetti dello stato fisiologico della coltura. Tuttavia, uno dei principali limiti del telerilevamento consiste nella difficoltà di distinguere gli effetti prodotti dagli stress biotici da quelli causati da stress abiotici, poiché condizioni differenti possono determinare firme spettrali molto simili. Per questo motivo, accanto ai più comuni indici vegetativi, quali il NDVI, vengono sempre più frequentemente impiegati indici spettrali specifici e metodologie di analisi avanzate, in grado di migliorare l'accuratezza della diagnosi, soprattutto nelle fasi più critiche dello sviluppo della coltura (Phang et al., 2023; Sishodia et al., 2020).

Dal punto di vista operativo, le immagini satellitari garantiscono un monitoraggio continuo di ampie superfici agricole, mentre le piattaforme aeree, in particolare gli UAV, consentono acquisizioni ad elevata risoluzione spaziale e temporale, offrendo una maggiore flessibilità

operativa e la possibilità di effettuare rilievi on-demand in funzione delle esigenze colturali (Sishodia et al., 2020).

È opportuno sottolineare che, nella maggior parte dei casi, le alterazioni rilevabili mediante telerilevamento compaiono quando il processo patologico è già iniziato. Nonostante ciò, le mappe di distribuzione delle fitopatie ottenute durante la stagione rappresentano un'importante base informativa per la gestione delle annate successive, soprattutto nel caso di patologie che tendono a manifestarsi con una distribuzione spaziale ricorrente all'interno dell'appezzamento.

In relazione alle strategie di difesa, l'applicazione uniforme dei prodotti fitosanitari continua a rappresentare la soluzione più appropriata nel caso di patologie caratterizzate da rapida diffusione. Al contrario, quando l'infestazione risulta localizzata e presenta una distribuzione spaziale stabile nel tempo, il telerilevamento consente di realizzare mappe di prescrizione utilizzabili nelle applicazioni VRT. L'integrazione delle informazioni storiche con i dati acquisiti durante la stagione permette così di ridurre l'impiego di prodotti fitosanitari, contenere i costi di trattamento e migliorare la sostenibilità ambientale ed economica degli interventi (Phang et al., 2023; Sishodia et al., 2020; Yang, 2020).

4.4.6 *Gestione delle infestanti*

La gestione delle infestanti rappresenta uno degli ambiti nei quali il telerilevamento può fornire un importante supporto alle strategie di AdP. Il controllo tempestivo delle specie infestanti è infatti fondamentale per ridurre la competizione con la coltura per acqua, luce e nutrienti, limitando le perdite produttive e migliorando l'efficienza nell'impiego delle risorse. Una gestione sito-specifica delle infestanti consente inoltre di ridurre i costi di trattamento e di limitare la contaminazione delle acque superficiali e sotterranee dovuta all'impiego di erbicidi (Phang et al., 2023).

Il telerilevamento trova un'ampia applicazione nella mappatura delle infestazioni grazie alla possibilità di distinguere le infestanti dalla coltura sulla base della loro firma spettrale, che riflette differenze morfologiche, fenologiche e fisiologiche tra le diverse specie vegetali (Sishodia et al., 2020). Durante le prime fasi di sviluppo, inoltre, il contrasto tra la vegetazione e il suolo nudo, determinato dall'incremento della riflettanza nella banda del NIR, consente di individuare precocemente le aree infestate, fase particolarmente importante per la pianificazione degli interventi di diserbo post-emergenza (Adamchuk et al., 2007).

Tra le diverse piattaforme disponibili, gli UAV rappresentano oggi una delle soluzioni più efficaci per il monitoraggio delle infestanti, grazie alla possibilità di acquisire immagini ad

elevatissima risoluzione spaziale. Tale caratteristica consente di identificare con precisione le aree infestate e di realizzare mappe dettagliate utilizzabili per la distribuzione sito-specifica degli erbicidi. Al contrario, la risoluzione spaziale della maggior parte dei sistemi satellitari risulta spesso insufficiente per discriminare infestazioni di limitata estensione o distribuite in modo discontinuo all'interno dell'appezzamento (Sishodia et al., 2020).

L'integrazione delle informazioni ottenute mediante telerilevamento con le VRT consente infine di effettuare trattamenti localizzati, distribuendo i prodotti erbicidi esclusivamente nelle aree interessate dall'infestazione. Tale approccio permette di ridurre il consumo di prodotti fitosanitari, contenere i costi di gestione e diminuire l'impatto ambientale degli interventi, contribuendo a una gestione delle infestanti più sostenibile ed efficiente.

4.4.7 *Caratterizzazione del suolo*

Il telerilevamento rappresenta uno strumento utile anche per la caratterizzazione delle proprietà del suolo, contribuendo all'individuazione della variabilità spaziale degli appezzamenti e alla definizione delle management zones. Le acquisizioni vengono generalmente effettuate quando la copertura vegetale è ridotta o assente, così da consentire l'osservazione diretta della superficie del terreno (Adamchuk et al., 2007).

Tradizionalmente, la valutazione delle proprietà del suolo si basava su campagne di campionamento a griglia, caratterizzate da costi elevati e tempi di esecuzione relativamente lunghi. Il telerilevamento costituisce oggi una valida integrazione a tali metodologie, permettendo di acquisire informazioni in modo più rapido ed economico, soprattutto per analisi su vaste superfici. Le osservazioni possono essere effettuate mediante immagini satellitari, rilievi aerei o sensori prossimali; tuttavia, nel caso delle piattaforme satellitari, le informazioni spettrali da sole non risultano generalmente sufficienti per una caratterizzazione quantitativa completa delle proprietà del suolo (Ge et al., 2011).

Tra le caratteristiche maggiormente investigate rientrano la tessitura, il contenuto di sostanza organica, l'azoto, il pH, i macro e micronutrienti (quali fosforo, potassio, calcio, magnesio, zinco e sodio) e alcune proprietà idrologiche, tra cui contenuto idrico, conducibilità elettrica apparente e capacità di scambio cationico (CSC). In particolare, i sensori iperspettrali, grazie all'elevato numero di bande acquisite, consentono una caratterizzazione più dettagliata delle proprietà del suolo rispetto ai tradizionali sensori multispettrali (Ge et al., 2011).

Le principali firme spettrali delle componenti del suolo si concentrano nelle regioni del medio infrarosso (SWIR) e dell'infrarosso termico, sebbene anche le bande del visibile e del

vicino infrarosso possano fornire informazioni utili. L'interpretazione della risposta spettrale risulta tuttavia particolarmente complessa, poiché essa è influenzata contemporaneamente da numerosi fattori, quali il contenuto idrico del terreno, la sostanza organica, la rugosità superficiale, la presenza di residui colturali, le condizioni atmosferiche e, nel caso delle acquisizioni satellitari, anche dalla geometria di illuminazione e osservazione (Adamchuk et al., 2007; Ge et al., 2011).

Tuttavia, uno dei maggiori limiti del telerilevamento per la valutazione delle proprietà del suolo è la complessità delle componenti e dei relativi comportamenti spettrali; in **Fig. 4.6** si può notare, per esempio, il cambiamento dello spettro di riflettanza al variare del contenuto idrico. Alcuni degli elementi del suolo presentano una evidente e caratteristica firma spettrale (es. la montmorillonite), mentre altri presentano firme deboli o assenti (es. i feldspati). Inoltre, le stesse pratiche agronomiche possono accentuare tale complessità, influenzando il contenuto idrico e la dimensione degli aggregati. Per questi motivi, i suoli agricoli mostrano uno spettro di riflettanza molto complesso, aumentando la difficoltà nel caratterizzarne le proprietà (Ge et al., 2011).

Per tali motivi, il telerilevamento non rappresenta generalmente una tecnica sostitutiva delle analisi dirette del suolo, ma costituisce uno strumento complementare, particolarmente efficace per individuare la variabilità spaziale dell'appezzamento e supportare la pianificazione dei campionamenti e delle successive analisi di laboratorio.

Numerosi studi hanno inoltre evidenziato come l'analisi quantitativa delle firme spettrali del suolo costituisca la base per lo sviluppo di sensori prossimali sempre più avanzati. Rimangono tuttavia alcune criticità legate all'elevata eterogeneità dei suoli, alla complessità delle elaborazioni richieste dai dati iperspettrali e alla difficoltà di sviluppare modelli predittivi universalmente applicabili a differenti contesti pedologici (Ge et al., 2011).

4.5 **Potenzialità e limiti**

Il telerilevamento rappresenta oggi una delle tecnologie più promettenti per lo sviluppo dell'AdP, trovando applicazione in quasi tutte le fasi del ciclo colturale, dalla caratterizzazione del suolo fino alla raccolta. Lo sviluppo di sensori sempre più avanzati, l'aumento della disponibilità di immagini satellitari ad elevata risoluzione e la continua evoluzione degli indici vegetativi hanno ampliato significativamente le possibilità di monitoraggio e gestione sito-specifica delle colture. Nonostante tali progressi, permangono ancora alcune limitazioni che ne

condizionano la diffusione su larga scala, sia nelle produzioni commerciali sia in quelle di minori dimensioni.

Uno dei principali ostacoli riguarda le caratteristiche delle piattaforme di acquisizione. Sebbene numerosi programmi satellitari mettano oggi gratuitamente a disposizione immagini utili per il monitoraggio delle colture, la loro risoluzione spaziale, temporale o spettrale non risulta sempre sufficiente per applicazioni quali il riconoscimento delle infestanti o la diagnosi precoce delle fitopatie, che richiedono dati ad elevatissimo dettaglio. In questi casi è spesso necessario ricorrere a costellazioni satellitari commerciali o a rilievi mediante UAV, con un conseguente incremento dei costi di acquisizione. A tali aspetti si aggiunge la necessità di disporre di personale qualificato e di software dedicati per l'elaborazione e l'interpretazione dei dati telerilevati (Sishodia et al., 2020).

Il costo delle tecnologie rappresenta ancora oggi una barriera significativa, soprattutto per le aziende agricole di piccole dimensioni. Sebbene gli UAV siano frequentemente indicati in letteratura come una soluzione relativamente economica rispetto ai rilievi aerei convenzionali, il loro impiego richiede comunque investimenti iniziali, competenze tecniche e adeguate infrastrutture informatiche. Inoltre, secondo quanto riportato dalla Banca Mondiale, una quota significativa degli operatori agricoli a livello mondiale dispone di risorse economiche limitate, condizione che rappresenta un ulteriore ostacolo all'adozione diffusa delle tecnologie di AdP (Phang et al., 2023).

Accanto agli aspetti economici e tecnologici, permangono importanti criticità di natura metodologica. Nonostante il grande numero di studi pubblicati negli ultimi anni, risultano ancora limitati i protocolli standardizzati in grado di garantire elevata accuratezza, riproducibilità e trasferibilità dei risultati in contesti caratterizzati da differenti condizioni climatiche, pedologiche, colturali e gestionali. Le prestazioni delle applicazioni basate sul telerilevamento sono infatti influenzate da molteplici fattori, tra cui la risoluzione spaziale, spettrale e temporale delle immagini, le condizioni atmosferiche durante l'acquisizione, lo stadio fenologico della coltura, le caratteristiche dell'appezzamento e gli algoritmi utilizzati per l'elaborazione dei dati (Sishodia et al., 2020).

Nonostante tali limitazioni, il telerilevamento ha ormai raggiunto un livello di maturità tecnologica tale da rappresentare uno strumento indispensabile per il monitoraggio delle risorse agricole e il supporto ai processi decisionali. Le informazioni derivate dalle immagini satellitari e dai sensori remoti sono oggi sempre più integrate nella pianificazione delle pratiche agronomiche e nella definizione di strategie finalizzate alla sicurezza alimentare (food

security), alla riduzione della povertà e alla promozione di modelli di sviluppo sostenibile. In un contesto caratterizzato dalla crescente domanda mondiale di alimenti e dalla necessità di utilizzare in modo sempre più efficiente le risorse naturali, il telerilevamento è destinato ad assumere un ruolo sempre più centrale, fornendo informazioni affidabili non solo sulla distribuzione delle risorse agricole, ma anche sulla loro qualità, quantità e dinamica nel tempo (Liaghat, 2010).

Capitolo 5
DIFFUSIONE DELL'ADP IN ARGENTINA

5.1 **Innovazione tecnologica nel settore agricolo argentino**

Il settore agricolo argentino è stato interessato, a partire dagli ultimi decenni del XX secolo, da un processo di profonda trasformazione tecnologica e organizzativa. L'introduzione di nuove tecniche colturali, macchine agricole più avanzate, materiali genetici migliorati e strumenti digitali ha contribuito ad accrescere la produttività e a modificare le modalità di gestione delle aziende agricole.

In tale contesto, l'Argentina è stata uno dei Paesi pionieri dell'America Latina nell'adozione delle tecnologie di AdP e si sta progressivamente affermando come un importante centro regionale per l'innovazione nell'agricoltura digitale (Kemerer et al., 2020). Tale processo è risultato particolarmente evidente nella regione pampeana, caratterizzata dalla diffusione di sistemi produttivi estensivi destinati prevalentemente alla coltivazione di cereali e colture oleaginose, nei quali la meccanizzazione e le tecnologie digitali hanno assunto un ruolo sempre più rilevante (Munoz et al., 2021).

Lo sviluppo dell'AdP in Argentina è stato favorito sia dalla struttura produttiva delle aziende agricole della Pampa, generalmente caratterizzate da superfici elevate, sia dalla presenza di operatori relativamente giovani e con un livello di istruzione mediamente alto. A tali condizioni si è aggiunto il contributo di istituzioni pubbliche, associazioni di produttori, imprese private e startup, che hanno sostenuto la ricerca, il trasferimento tecnologico e la diffusione delle innovazioni.

L'evoluzione non si è tuttavia manifestata in modo uniforme in tutto il territorio nazionale. Al di fuori della regione pampeana, infatti, numerosi sistemi produttivi basati su colture industriali o ad alto valore aggiunto presentano ancora una disponibilità limitata di tecnologie avanzate e di sistemi di supporto alle decisioni, con conseguenti differenze territoriali nell'adozione delle soluzioni digitali (Munoz et al., 2021).

Nei paragrafi successivi saranno analizzati l'evoluzione storica dell'innovazione agricola argentina, il ruolo dei principali attori pubblici e privati e lo sviluppo dell'ecosistema nazionale delle imprese AgTech.

5.1.1 *Evoluzione del sistema dell'innovazione agricola*

In Argentina, la produttività dei fattori impiegati nel settore agricolo è aumentata, a partire dal 1995, con un tasso medio annuo pari a circa l'1,4%. Le evidenze disponibili indicano che una parte significativa di tale incremento è riconducibile all'introduzione di innovazioni tecnologiche e organizzative (OECD, 2019).

Una fase determinante di tale processo ebbe inizio nei primi anni Novanta con la rapida diffusione della semina su sodo (no-tillage). Questa tecnica si inserì all'interno di un più ampio pacchetto tecnologico comprendente sementi migliorate, comprese varietà geneticamente modificate, nuove macchine agricole, agrofarmaci, tecniche produttive più efficienti e innovazioni nei modelli organizzativi delle aziende.

L'impiego di macchine agricole specificamente progettate per la semina su sodo, spesso sviluppate e prodotte direttamente in Argentina, ha registrato una rapida diffusione. Tali attrezzature sono state progressivamente integrate con sistemi elettronici e dispositivi di controllo computerizzato, ponendo le basi per la successiva diffusione delle tecnologie di AdP (OECD, 2019).

Nel campo degli studi economici dedicati alla produzione agraria, il tema del cambiamento tecnologico ha rappresentato storicamente un asse centrale di analisi. Le prospettive critiche lo hanno collocato all'interno dei dibattiti sulla cosiddetta questione agraria e sui limiti strutturali allo sviluppo capitalistico del settore. In Argentina, tali discussioni hanno trovato eco nel dibattito sulla presunta stagnazione del settore agricolo. Tuttavia, alla luce delle trasformazioni profonde che il settore agricolo argentino ha mostrato a partire dalla metà degli anni Novanta, queste interpretazioni sono state progressivamente superate, lasciando spazio a un consenso più ampio riguardo alla rimozione degli ostacoli che avrebbero frenato l'adozione di innovazioni (Guaglianone, 2025).

Su queste basi, l'Argentina è divenuta uno dei primi Paesi latinoamericani a incorporare le tecnologie di AdP nei sistemi agricoli estensivi (Kemerer et al., 2020). La regione pampeana ha rappresentato il principale ambito di diffusione, grazie alla presenza di aziende di grandi dimensioni, colture altamente meccanizzate e filiere orientate alla produzione di commodities destinate sia al mercato interno sia all'esportazione.

Negli anni successivi, l'innovazione si è progressivamente estesa dalla meccanizzazione e dalla gestione delle operazioni colturali alla raccolta, elaborazione e trasmissione dei dati. Sistemi di guida automatica, monitor di resa, sensori, immagini satellitari, piattaforme digitali, sistemi di telemetria e tecnologie per l'applicazione a rateo variabile sono così entrati gradualmente nella gestione delle aziende agricole argentine.

Più recentemente, il settore si è ulteriormente evoluto attraverso l'integrazione di reti di sensori, infrastrutture Internet of Things (IoT), sistemi di analisi delle immagini, modelli climatici, algoritmi di elaborazione dei dati, robotica agricola e piattaforme digitali per la gestione aziendale. Tale sviluppo ha contribuito a rafforzare il ruolo dell'Argentina quale polo regionale dell'agricoltura digitale, pur permanendo significative differenze tra le aziende più strutturate della regione pampeana e i sistemi produttivi localizzati nelle altre aree del Paese (Munoz et al., 2021).

5.1.2 *Ruolo degli attori pubblici e privati nello sviluppo dell'innovazione*

Lo sviluppo dell'innovazione agricola in Argentina è stato sostenuto dalla stretta collaborazione tra istituzioni pubbliche, organizzazioni di produttori e imprese private. Tale modello ha favorito il rapido trasferimento delle innovazioni tecnologiche verso il sistema produttivo, contribuendo alla diffusione delle tecnologie di AdP, in particolare nella regione pampeana.

L'innovazione risulta infatti prevalentemente guidata dal settore privato, nel quale un ruolo di primo piano è svolto dall'*Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola* (AACREA) e dall'*Asociación Argentina de Productores de Siembra Directa* (AAPRESID). Attraverso attività di sperimentazione, trasferimento tecnologico e divulgazione, entrambe le organizzazioni hanno contribuito in maniera determinante alla diffusione di nuove tecniche agronomiche e delle soluzioni di AdP (Munoz et al., 2021).

Accanto al settore privato, il comparto pubblico svolge un ruolo fondamentale nello sviluppo della ricerca di base, nella produzione di conoscenze scientifiche e nella loro diffusione presso il sistema agricolo nazionale. L'istituzione di riferimento è l'INTA, ente autonomo fondato nel 1956 con l'obiettivo di sostenere la modernizzazione dell'agricoltura argentina (Quiroga et al., 2026).

Nel corso della propria attività l'INTA ha contribuito allo sviluppo di numerose innovazioni riguardanti il miglioramento genetico delle colture, la gestione della fertilità del suolo, il controllo delle infestanti e l'adattamento delle produzioni agricole alla variabilità

climatica. Negli ultimi anni, particolare attenzione è stata dedicata allo sviluppo delle tecnologie digitali applicate all'agricoltura, attraverso la realizzazione di piattaforme web, sistemi di elaborazione delle immagini, applicazioni mobili e servizi di assistenza digitale, con particolare riferimento ai sistemi produttivi della regione pampeana (Munoz et al., 2021).

L'interesse delle istituzioni argentine verso l'innovazione è stato ulteriormente rafforzato con l'approvazione della *Ley de Emprendedores* nel 2017, inserita all'interno della strategia nazionale di sviluppo economico. Tale provvedimento ha introdotto misure finalizzate a favorire la nascita di nuove imprese innovative, semplificando le procedure amministrative, agevolando l'accesso ai finanziamenti e incentivando lo sviluppo di startup operanti nel settore dell'AdP e dell'agricoltura digitale (Munoz et al., 2021).

La collaborazione tra istituzioni di ricerca, organizzazioni di produttori e imprese private ha quindi favorito la creazione di un contesto particolarmente dinamico, nel quale ricerca scientifica, sperimentazione e trasferimento tecnologico hanno contribuito alla progressiva diffusione delle innovazioni lungo l'intera filiera agricola argentina.

5.1.3 *Ecosistema AgTech e utilizzatori finali*

Negli ultimi anni l'Argentina si è progressivamente affermata come uno dei principali poli dell'innovazione agricola in America Latina, grazie allo sviluppo di un ecosistema AgTech in rapida espansione composto da diverse startup attualmente operative. Queste realtà imprenditoriali sviluppano soluzioni avanzate per la gestione delle aziende agricole basate su dati, sistemi di agri-finance digitalizzati, piattaforme di tracciabilità e logistica, reti di sensori e infrastrutture IoT, marketplace agroalimentari, applicazioni biotecnologiche, servizi di modellazione climatica, tecnologie per l'irrigazione di precisione e la gestione idrica, sistemi di coltivazione innovativi, robotica agricola, algoritmi di elaborazione e analisi delle immagini.

Nella regione della Pampa la produzione agricola è fortemente meccanizzata e caratterizzata da un'elevata diffusione delle tecnologie digitali, soprattutto nei sistemi colturali estensivi destinati alla produzione di cereali e colture oleaginose (Munoz et al., 2021). In quest'area, circa il 48,9% degli imprenditori agricoli ha un titolo di studio universitario e l'età media oscilla intorno ai 44 anni a seconda della dimensione aziendale (da circa 44 anni in aziende con superficie compresa tra 300 e 600 ha, a circa 45 in aziende da 601 a 1.840 ha, a circa 41 dove le superfici superano i 1.841 ha) (Piazzardi, 2022).

Tali caratteristiche strutturali hanno probabilmente favorito una più rapida diffusione delle tecnologie di AdP nella regione pampeana.

Al di fuori della regione pampeana, invece, la diffusione delle tecnologie risulta più limitata. Le produzioni industriali e le colture ad elevato valore aggiunto presentano infatti una minore disponibilità di strumenti digitali avanzati e di sistemi di supporto alle decisioni (Decision Support Systems, DSS), evidenziando come il processo di innovazione proceda con velocità differenti nelle diverse aree del Paese (Munoz et al., 2021).

Gli utilizzatori finali delle soluzioni di AdP possono essere suddivisi in quattro gruppi o hub, ciascuno dei quali ha requisiti e problematiche specifici cui le innovazioni dell'agricoltura digitale possono rispondere (Munoz et al., 2021):

- Hub Input, che include tutti i fornitori di sementi, mangimi, prodotti agrochimici, macchine agricole, risorse finanziarie e altri fattori di produzione.
- Hub Produzione, del quale fanno parte gli agricoltori. Le stime indicano che circa il 10% delle grandi aziende agricole argentine faccia uso di tecnologie avanzate, quali il telerilevamento e il machine learning, e abbia le capacità di elaborare i dati raccolti; tali aziende occupano il 78% della terra coltivabile in Argentina. Un altro 10% degli agricoltori possiede competenze di medio livello, mentre il restante 80% è caratterizzato dall'avere competenze digitali di base, limitate all'utilizzo di feature phone, ossia dispositivi mobili progettati in via prioritaria per la comunicazione telefonica e la messaggistica.
- Hub Distribuzione, composto da tutti gli attori della catena del valore compresi tra gli agricoltori e i consumatori, come commercianti, trasportatori e i trasformatori. Circa il 50% degli utenti del gruppo non utilizza tecnologie digitali, mentre il 10% circa possiede competenze avanzate (impiego di piattaforme online di mercato) e il restante 40% fa uso solo di informazioni di mercato.
- Hub Consumatori, che consiste nei consumatori dei prodotti agricoli sia grezzi sia trasformati. In Argentina, la maggioranza dei consumatori non utilizza tecnologie digitali per accedere alle informazioni di mercato. Tuttavia, si stima che circa il 30% utilizzi soluzioni tecnologiche per tracciare i prodotti, le pratiche agronomiche adottate e i processi di trasformazione, mentre il 5% ne faccia uso per l'acquisto delle derrate agricole.

Nei paragrafi successivi, si riporta lo stato di adozione delle tecnologie di AdP in Argentina a livello nazionale e territoriale, nonché il confronto con il contesto internazionale. Tuttavia, per i dati argentini occorre premettere che le diverse fonti disponibili presentano limiti

metodologici significativi, poiché si basano su criteri di rilevazione eterogenei (inventari di macchinari, vendite cumulative, sondaggi volontari, censimenti per azienda). Questa eterogeneità rende complesso costruire confronti solidi e coerenti tra dati raccolti con approcci differenti e, di conseguenza, valutare con precisione il reale livello di diffusione dei sistemi di AdP nel Paese (Guaglianone, 2025).

5.2 **Evoluzione storica e diffusione dell'AdP in Argentina**

L'adozione delle tecnologie di AdP in Argentina è avvenuta con modalità e tempi differenti in funzione delle caratteristiche strutturali delle aziende agricole, delle colture praticate e del contesto territoriale. Sebbene il Paese sia considerato uno dei pionieri dell'AdP in America Latina, la diffusione delle diverse tecnologie risulta ancora oggi eterogenea e caratterizzata da notevoli differenze tra le regioni agricole e tra aziende di diversa dimensione (Puntel et al., 2023).

L'analisi del livello di adozione delle tecnologie di AdP risulta inoltre complessa, poiché le informazioni disponibili derivano da fonti differenti, basate su metodologie di rilevazione non sempre omogenee. I dati pubblicati derivano infatti da censimenti nazionali, indagini campionarie, sondaggi volontari, inventari delle macchine agricole e statistiche sulle vendite cumulative delle attrezzature. Tale eterogeneità metodologica rende difficoltoso il confronto diretto tra le diverse fonti e richiede una lettura critica dei risultati disponibili (Guaglianone, 2025).

Nel presente lavoro, la ricostruzione dell'evoluzione dell'AdP in Argentina è stata effettuata integrando le informazioni provenienti dai Censimenti Nazionali Agropecuari (*Censo Nacional Agropecuario*, CNA) del 2002 e del 2018, realizzati dall'*Instituto Nacional de Estadística y Censos* (INDEC), con i dati dei sondaggi condotti dall'INTA nel 2013 e nel 2018, nonché con le più recenti analisi disponibili nella letteratura scientifica.

Nei paragrafi successivi saranno analizzati il livello di diffusione delle tecnologie di AdP a scala nazionale e territoriale, il confronto con gli altri Paesi sudamericani, l'evoluzione delle principali tecnologie adottate e le principali criticità che ancora ne limitano una diffusione omogenea sul territorio argentino.

5.2.1 *Diffusione a livello nazionale e territoriale*

Il processo di adozione delle tecnologie di AdP in Argentina si è sviluppato in maniera progressiva e non uniforme, evidenziando marcate differenze tra le diverse aree del Paese e tra le differenti tipologie aziendali (Puntel et al., 2023).

L'analisi dei dati provenienti dai CNA del 2002 e del 2018 evidenzia un progressivo incremento del numero di aziende agricole che adottano tecnologie di AdP. A livello nazionale, la percentuale di aziende che dichiarano di utilizzare strumenti di AdP è passata da circa 1% nel 2002 al 4% nel 2018. La crescita risulta ancora più evidente nella Pampa umida, dove l'adozione è aumentata dall'1% all'8%, confermando il ruolo di questa regione quale principale area di diffusione dell'innovazione agricola nel Paese (**Fig. 5.1**) (Guaglianone, 2025).

L'analisi a scala provinciale evidenzia differenze ancora più marcate. Gli incrementi più consistenti sono stati registrati nelle province di Córdoba, dove l'adozione è passata dal 2% al 13%, e di Santa Fe, dall'1% all'11%. Considerando esclusivamente le aziende dedicate alle colture annuali, i dati del censimento del 2018 mostrano livelli di diffusione ancora più elevati, pari al 13% a livello nazionale, al 18% nella Pampa umida, al 21% nella provincia di Córdoba, al 18% in Santa Fe, al 16% in Entre Ríos e al 15% nella provincia di Buenos Aires (**Fig. 5.1**) (Guaglianone, 2025).

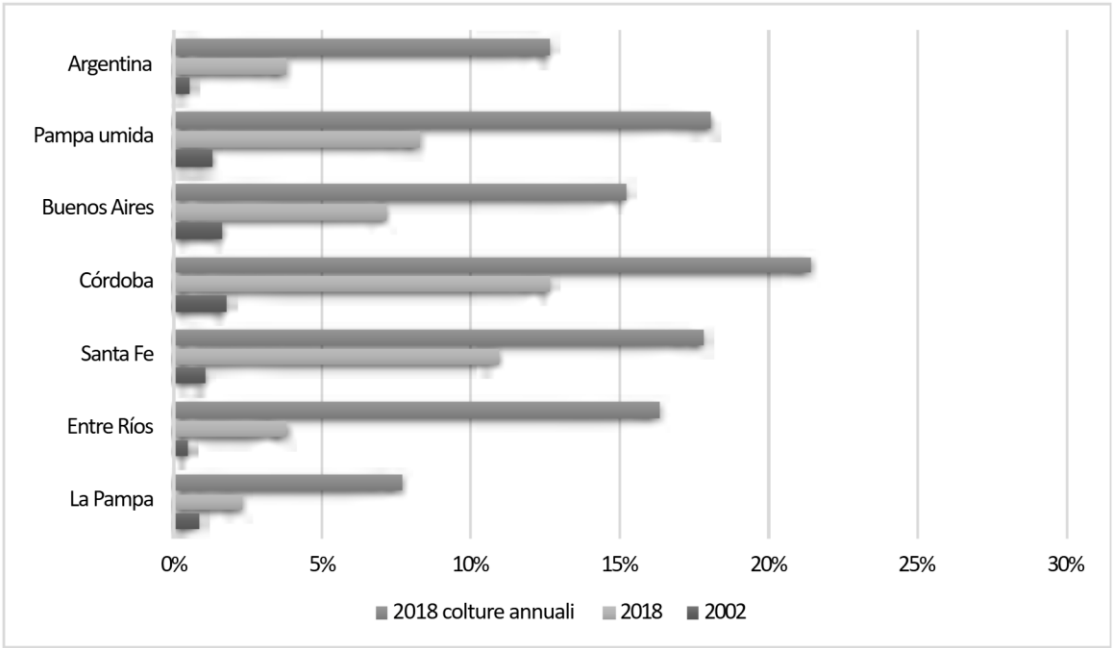


Fig. 5.1 – Diffusione delle tecnologie di AdP in Argentina nel 2002 e nel 2018 a livello nazionale, regionale e provinciale (Guaglianone, 2025).

La provincia di Buenos Aires, nella quale è localizzato il *partido* di Junín, rappresenta una delle aree più dinamiche per l'adozione delle tecnologie di AdP, collocandosi tra le province

leader della regione pampeana. L'analisi a livello di partido evidenzia tuttavia una notevole variabilità territoriale: nel *partido* di Pergamino, storicamente considerato uno dei principali poli cerealicoli argentini, la percentuale di aziende che adottano tecnologie di AdP è aumentata dal 3% nel 2002 al 9% nel 2018, raggiungendo l'11% considerando esclusivamente le aziende dedite alle colture annuali. Incrementi ancora più consistenti sono stati registrati in altri *partidos* della provincia, come Pellegrini, dove il tasso di adozione è passato dall'1% al 26% nello stesso periodo (**Fig. 5.2**) (Guaglianone, 2025).

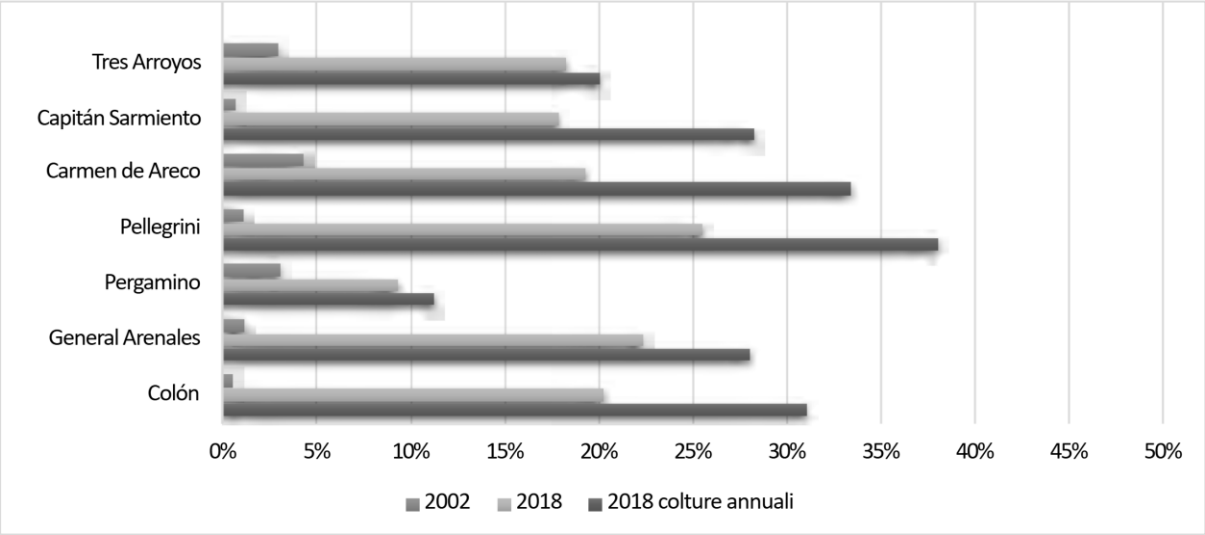


Fig. 5.2 – Diffusione delle tecnologie di AdP nei principali partidos della provincia di Buenos Aires nel 2002 e nel 2018 (Guaglianone, 2025).

Nel complesso, i dati censuari evidenziano come la diffusione dell'AdP in Argentina sia stata trainata principalmente dalle aziende cerealicole di grandi dimensioni localizzate nella regione pampeana, mentre nelle altre aree del Paese il processo di adozione risulta ancora più limitato.

5.2.2 *Confronto con il contesto sudamericano*

Per comprendere il livello di diffusione dell'AdP in Argentina risulta utile confrontare il contesto nazionale con quello degli altri principali Paesi agricoli del Sud America. A tale scopo, Puntel et al. (2023) hanno analizzato l'adozione delle principali tecnologie di AdP in Argentina, Brasile, Cile e Uruguay, utilizzando, per il caso argentino, i dati dei sondaggi web condotti dall'INTA nel 2013 e nel 2018.

I questionari, ai quali hanno risposto 306 operatori nel 2018, risultano rappresentativi soprattutto della regione pampeana, dalla quale proviene circa l'86% delle risposte, pur

includendo aziende localizzate anche in altre aree del Paese. I risultati mostrano un progressivo incremento dell'adozione delle principali tecnologie di AdP tra il 2013 e il 2018, evidenziando differenze significative tra le diverse soluzioni tecnologiche (**Fig. 5.3**) (Puntel et al., 2023).

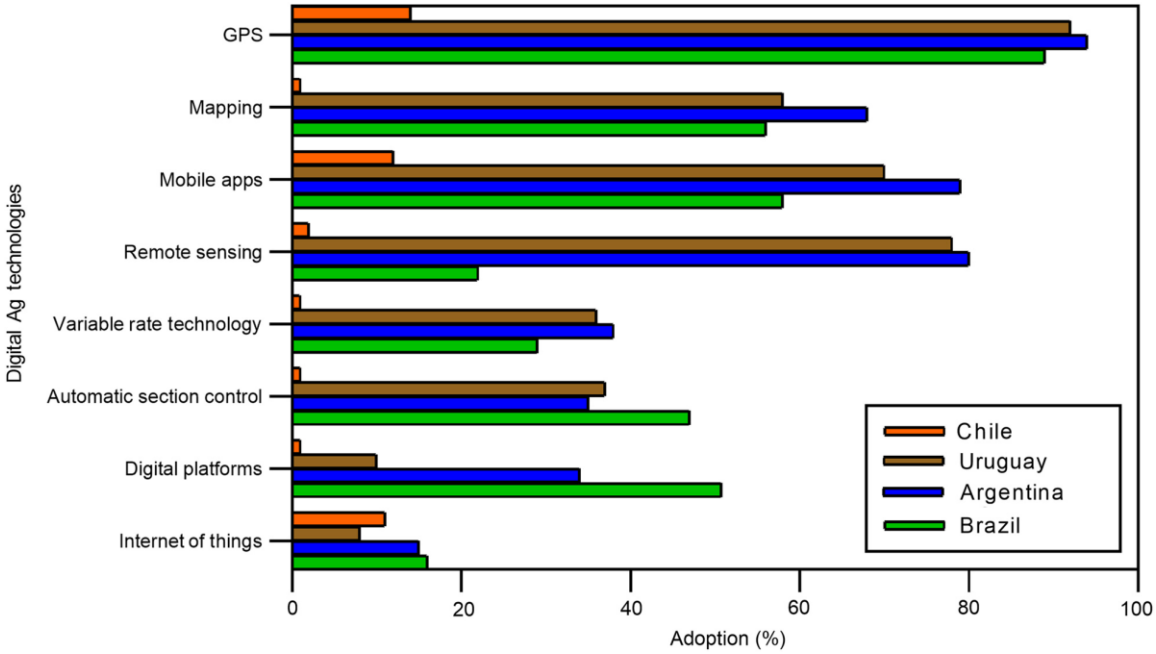


Fig. 5.3 – Livello di adozione delle principali tecnologie di AdP in Argentina, Brasile, Cile e Uruguay (Puntel et al., 2023).

Nel contesto sudamericano considerato, l'Argentina rappresenta il secondo Paese per estensione agricola, comprendendo circa il 28% della superficie coltivabile complessiva e circa il 5% delle aziende agricole. Una caratteristica distintiva del sistema produttivo argentino è rappresentata dalla forte concentrazione fondiaria: il 43% delle aziende possiede infatti superfici inferiori a 50 ha, occupando tuttavia soltanto circa l'1% della superficie agricola nazionale (**Tab. 5.1**) (Puntel et al., 2023).

L'analisi comparativa evidenzia inoltre come lo sviluppo dell'AdP sia strettamente correlato alla disponibilità di infrastrutture digitali e alla presenza di un ecosistema innovativo. In particolare, l'accesso a Internet nelle aree rurali e il numero di startup operanti nel settore AgTech risultano tra i principali indicatori della capacità di innovazione dei diversi Paesi. Sotto questo profilo, l'Argentina presenta valori intermedi rispetto agli altri Paesi analizzati, confermando una buona capacità di sviluppo tecnologico, pur evidenziando margini di miglioramento nell'accessibilità delle infrastrutture digitali (Puntel et al., 2023).

Nel complesso, il confronto con Brasile, Cile e Uruguay evidenzia come l'Argentina occupi una posizione di rilievo nel panorama sudamericano dell'AdP, sia per la precoce adozione di

numerose tecnologie sia per il dinamismo dell'ecosistema AgTech sviluppatosi negli ultimi anni.

Tab. 5.1 – Principali indicatori strutturali e di digitalizzazione del settore agricolo nei principali Paesi sudamericani (Brasile, Argentina, Uruguay, Cile) (Puntel et al., 2023). *n.d.*: non disponibile.

	Brasile	**Argentina**	**Uruguay**	**Cile**
Numero di aziende agricole	5 073 324	220 060	44 781	278 660
Estensione (mln di ha)	351,3	157,4	16,36	29,78
Aziende con meno di 50 ha (%)	81	43	42	88
Estensione delle aziende con meno di 50 ha (%)	12	1	2	7
Telefono mobile (%)	85	82	92	90
Stato connettività rurale (%)	40,3	35	34,5	46,8
Computer in azienda (%)	29	34	n.d.	31
Uso di app mobile (%)	84	79	70	95
Numero di start-up in AdP	233	104	19	45
Principali prodotti agricoli esportati	Soia, zucchero, mais, pasta di cellulosa, carne bovina	Soia, olio di soia, mais, frumento, carne bovina	Carne bovina, pasta di cellulosa, soia, prodotti lattiero-caseari	Uva, piccoli frutti, susine, ciliegie, mele disidratate, noci, vino
Principali mercati	Cina, USA, Europa	Cina, Brasile, USA	Cina, UE, Brasile, USA	USA, Cina, Giappone, UK, Brasile

5.2.3 *Evoluzione delle principali tecnologie di AdP*

L'evoluzione dell'AdP in Argentina è stata caratterizzata da una progressiva diffusione delle principali tecnologie digitali, con livelli di adozione differenti in funzione della tipologia di soluzione considerata. Le indagini condotte dall'INTA nel 2013 e nel 2018 evidenziano una crescita costante dell'impiego delle tecnologie di AdP, soprattutto per quanto riguarda i sistemi

di guida automatica, il controllo automatico delle sezioni e le applicazioni a rateo variabile (Puntel et al., 2023).

Tra il 2013 e il 2018 l'impiego della guida automatica è aumentato dal 40% al 61%, mentre il controllo automatico delle sezioni sulle seminatrici è passato dal 7% al 21%. Nello stesso periodo anche le applicazioni a rateo variabile hanno registrato una crescita significativa, passando dal 27% al 35% nella semina e dal 29% al 41% nella fertilizzazione (Puntel et al., 2023).

L'utilizzo delle tecnologie digitali non riguarda soltanto la raccolta dei dati, ma anche la loro elaborazione. Circa l'85% degli utilizzatori di questi strumenti ha dichiarato di importare e visualizzare i dati raccolti, mentre l'80% realizza management zones. Di questi ultimi, il 56% utilizza tali informazioni per il campionamento del suolo, il 45% per la semina a rateo variabile e il 50% per la fertilizzazione sito-specifica. Secondo Puntel et al. (2023), l'ulteriore sviluppo delle piattaforme digitali, della connettività, dell'interoperabilità dei dati e dei nuovi componenti elettronici installati sulle macchine agricole favorirà una più ampia diffusione delle applicazioni a rateo variabile.

L'Argentina è stata inoltre uno dei Paesi pionieri nell'impiego dei monitor di resa (yield monitor). Come evidenziato da Lowenberg-DeBoer e Erickson (2019), già negli anni Novanta le grandi aziende agricole argentine utilizzavano diffusamente le mappe di resa quale principale strumento per analizzare la variabilità produttiva degli appezzamenti.

I dati dell'INDEC pubblicati nel 2019 consentono di analizzare nel dettaglio l'evoluzione delle principali categorie di applicazione delle tecnologie di AdP (Villarroel et al., 2020) (**Tab. 5.2**).

Per quanto riguarda la raccolta, il parco macchine argentino comprendeva 24.258 mietitrebbie, con un'età media di circa 11 anni; di queste, 16.140 (circa il 70%) risultavano equipaggiate con monitor di resa, consentendo la georeferenziazione della produzione raccolta (**Fig. 5.4a**). Tali macchine erano responsabili della trebbiatura di circa l'85% della produzione cerealicola nazionale. Inoltre, circa il 38% delle mietitrebbie censite aveva meno di cinque anni di età e risultava già predisposto per l'impiego delle più recenti tecnologie di AdP. I principali sviluppi tecnologici hanno riguardato l'introduzione di algoritmi di autoregolazione, sistemi di visione artificiale per il monitoraggio della qualità della granella e celle di carico multiple che consentono la calibrazione automatica dei sensori di resa. Nonostante tali innovazioni, la regolazione ottimale della trebbiatura continua a richiedere l'esperienza dell'operatore.

In merito alla semina, si è osservata una progressiva diffusione dei motori elettrici per il controllo del dosaggio del seme, con una conseguente riduzione delle trasmissioni meccaniche tradizionali, quali ruote motrici, ingranaggi e catene, migliorando affidabilità e durata delle seminatrici (**Fig. 5.4b**). Alla fine del 2020 è stato inoltre registrato un incremento del 22% nelle vendite di nuove seminatrici, accompagnato da una crescente diffusione dei sistemi di distribuzione a dosaggio variabile, sia installati di serie sia mediante soluzioni after-market.

Nel settore della distribuzione di fertilizzanti e prodotti fitosanitari è aumentata significativamente l'adozione delle VRT. In particolare, le irroratrici hanno beneficiato dell'introduzione della guida automatica, di nuovi computer di bordo, stazioni meteorologiche, elettrovalvole e sistemi di modulazione a impulsi per l'applicazione a rateo variabile (**Fig. 5.4c**). Nello stesso periodo le tecnologie dedicate al controllo sito-specifico delle infestanti hanno registrato una crescita media annua di circa 20% (**Fig. 5.4d**), mentre la telemetria ha favorito una maggiore tracciabilità delle operazioni e la certificazione delle buone pratiche agricole (**Fig. 5.4e**).

Anche la guida automatica ha registrato una rapida diffusione. Tra il 2015 e il 2019 il numero di sistemi installati su trattrici, macchine semoventi e mietitrebbie è aumentato mediamente del 20% annuo, confermando il ruolo sempre più importante di tali tecnologie in tutte le principali operazioni agricole (**Fig. 5.4f**).

Infine, i sistemi di telemetria hanno trovato applicazione trasversale nei diversi comparti della meccanizzazione agricola. Sebbene la copertura della rete dati non sia ancora completa in alcune aree del Paese (**Tab. 5.1**), tali sistemi consentono di raccogliere, trasmettere e visualizzare i dati operativi mediante piattaforme web e applicazioni mobili. Nel 2019 il numero di sistemi di telemetria installati risultava circa dieci volte superiore rispetto a quello registrato nel 2015.

Negli ultimi anni, un ulteriore impulso alla digitalizzazione è stato determinato dalla diffusione delle applicazioni mobili e delle piattaforme web dedicate alla gestione aziendale. Puntel et al. (2023) hanno censito 231 applicazioni, delle quali il 41% è classificabile come descrittiva, il 27% come diagnostica, il 19% come predittiva e il 13% come prescrittiva. Secondo un'indagine dell'INTA, il 79% degli agricoltori e dei consulenti utilizza applicazioni o piattaforme web per la gestione aziendale, mentre il 67% ritiene che tali strumenti contribuiscano ad aumentare la redditività dell'impresa agricola.

Più recentemente, il settore agricolo argentino ha mostrato un crescente interesse verso la robotica agricola, che rappresenta una delle principali evoluzioni dell'Agricoltura 4.0. Le più

recenti stime indicano un progressivo incremento del numero di robot agricoli impiegati nel Paese, destinati principalmente al controllo delle infestanti, alla gestione della fertilizzazione e dell'irrigazione e al miglioramento della sostenibilità delle produzioni agricole (**Fig. 5.5**) (Ayesta, 2025).

Tab. 5.2 – Evoluzione delle principali tecnologie di AdP in Argentina tra il 2010 e il 2019 (Villarroel et al., 2020).

	2010	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**
Yield monitor	7.400	8.365	8.865	9.643	10.544	11.540	12.456	13.815	14.767	16.140
Semina VRA	1.801	2.076	2.346	2.679	2.975	3.263	3.515	3.978	4.138	4.608
Monitor di semina	12.160	14.705	16.905	19.784	21.426	22.854	24.882	27.100	27.100	30.800
Ricevitore GNSS su irroratrice	12.298	13.270	14.589	15.797	17.087	18.342	19.158	20.347	20.647	21.018
Guida autonoma	1.150	2.710	3.610	4.120	5.530	6.708	9.035	12.308	14.430	17.174
Sezionamento automatico irroratrici	640	1.081	1.481	2.121	2.410	2.738	3.375	4.256	4.309	4.351
Sezionamento automatico seminatrici	25	45	55	79	103	119	189	263	288	319
Sistemi di correzione (< 10 cm)	50	110	200	210	360	823	2.290	3.566	4.831	5.953
Sistemi di correzione (> 10 cm)					157	431	1.130	3.184	5.415	8.426
Telemetria				37	120	196	409	839	1.358	1.877
Controllo infestanti VRA					21	64	160	233	278	328
Sensore manuale real-time per azoto						80	101	104	116	120

Nel complesso, l'evoluzione osservata negli ultimi due decenni evidenzia come l'AdP in Argentina sia passata dall'adozione delle prime tecnologie di monitoraggio della resa a un

sistema integrato basato su sensoristica, telemetria, piattaforme digitali, sistemi di supporto alle decisioni e automazione avanzata.

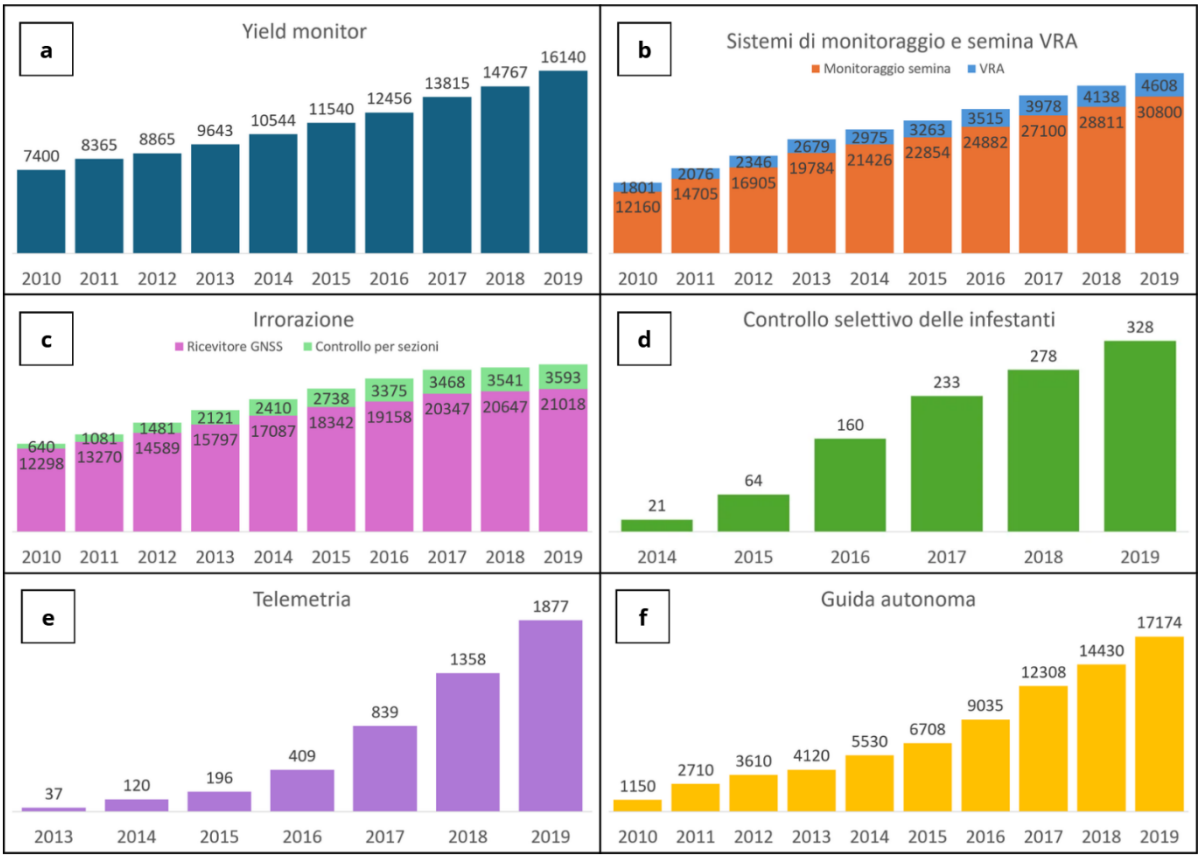


Fig. 5.4 – Stime dell'evoluzione annuale di varie tecnologie di AdP, 2010-2019 (numero di unità, espresse come numero cumulato di unità installate): (**a**) sistemi di misurazione della quantità raccolta di prodotti agricoli; (**b**) sistemi per il monitoraggio della semina e per la semina a dose variabile (o VRA); (**c**) ricevitori GNSS e sistemi per il controllo delle sezioni sulle irroratrici; (**d**) attrezzature per il controllo selettivo delle erbe infestanti; (**e**) sistemi di guida autonoma; (**f**) sistemi di telemetria nelle macchine agricole (Villarroel et al., 2020).



Fig. 5.5 – Esempi di robot agricoli (Ayesta, 2025).

5.2.4 *Barriere alla diffusione*

Nonostante la significativa crescita registrata negli ultimi decenni la diffusione delle tecnologie di AdP in Argentina incontra ancora numerosi ostacoli di natura economica, strutturale e organizzativa.

Una delle principali criticità riguarda il quadro delle politiche di sostegno al settore agricolo. A differenza della maggior parte dei Paesi appartenenti all'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD), il supporto pubblico ai produttori agricoli argentini risulta limitato, determinando un elevato carico economico sulle aziende e riducendo la capacità di investimento nelle innovazioni tecnologiche (Munoz et al., 2021).

Le difficoltà risultano particolarmente evidenti nelle aree al di fuori della regione pampeana, dove predominano aziende agricole di piccole e medie dimensioni, generalmente meno competitive sui mercati internazionali e maggiormente esposte agli effetti della variabilità climatica. In questi contesti la limitata disponibilità di infrastrutture digitali, il ridotto livello di alfabetizzazione tecnologica e la difficoltà di accesso al credito rallentano l'adozione delle tecnologie di AdP. Per tali aziende risultano maggiormente accessibili strumenti digitali relativamente semplici, come applicazioni mobili e sistemi di allerta meteorologica, mentre il sostegno alle startup AgTech e lo sviluppo di strumenti finanziari dedicati potrebbero contribuire a ridurre le barriere economiche all'innovazione (Munoz et al., 2021).

Nelle grandi aziende della regione pampeana, invece, le limitazioni non riguardano tanto l'accesso alle tecnologie quanto la gestione delle informazioni generate dai diversi sistemi digitali. In particolare, la presenza di piattaforme e software sviluppati da differenti produttori determina frequentemente problemi di interoperabilità, limitando la condivisione dei dati lungo la filiera agroalimentare e riducendo l'efficacia dei processi decisionali (Munoz et al., 2021).

Le indagini condotte dall'INTA evidenziano inoltre che gli operatori agricoli individuano tra i principali ostacoli all'adozione delle tecnologie di AdP gli elevati costi di investimento, la limitata disponibilità di personale specializzato, le ridotte opportunità di formazione rivolte ad agronomi e contoterzisti, il numero ancora contenuto di fornitori di servizi e la non sempre evidente percezione dei benefici economici derivanti dall'adozione delle tecnologie digitali (Puntel et al., 2023).

Una volta implementati i sistemi di AdP, emergono ulteriori criticità legate alla gestione dei dati e all'integrazione delle diverse tecnologie. Tra queste assumono particolare rilievo la complessità delle procedure di elaborazione dei dati raccolti, la limitata compatibilità tra

software e hardware di differenti produttori, la carenza di servizi di assistenza post-vendita e la necessità di competenze agronomiche specifiche per la corretta interpretazione delle informazioni e la definizione delle mappe di prescrizione per le applicazioni a rateo variabile (Puntel et al., 2023).

Nel complesso, la diffusione dell'AdP in Argentina appare quindi fortemente influenzata sia da fattori economici e infrastrutturali sia dalla disponibilità di competenze tecniche e dalla capacità di integrare efficacemente le numerose tecnologie digitali oggi disponibili. Il superamento di tali criticità rappresenta una delle principali sfide per favorire un'adozione più omogenea dell'AdP sull'intero territorio nazionale.

5.3 **Confronto con l'AdP in Italia**

Il percorso di diffusione dell'AdP in Italia presenta caratteristiche differenti rispetto a quello osservato in Argentina. Se nel contesto argentino l'adozione delle tecnologie è stata favorita dalla presenza di aziende di grandi dimensioni, fortemente orientate alla produzione cerealicola e supportate da una consolidata rete di ricerca e trasferimento tecnologico, il sistema agricolo italiano è caratterizzato da una maggiore frammentazione fondiaria e da una prevalenza di aziende di piccole e medie dimensioni, fattori che influenzano significativamente la velocità di diffusione delle innovazioni.

La disponibilità di dati statistici sull'adozione dell'AdP risulta inoltre più ampia rispetto al contesto argentino. Un'indagine nazionale condotta nel 2024 su 1.248 aziende agricole evidenzia come la conoscenza delle principali tecnologie di Agricoltura 4.0 sia ormai diffusa tra gli operatori italiani, sebbene i livelli di adozione risultino ancora molto differenziati in funzione delle caratteristiche strutturali delle aziende (Pacciani et al., 2025).

Come osservato anche in Argentina, la dimensione aziendale rappresenta uno dei principali fattori che influenzano l'adozione delle tecnologie digitali. In Italia soltanto il 23% delle aziende con superficie inferiore a 10 ha utilizza strumenti di Agricoltura 4.0, mentre tale percentuale sale al 66% nelle aziende comprese tra 100 e 199,9 ha e raggiunge l'82% nelle aziende con oltre 200 ha. Analogamente, i livelli di adozione risultano più elevati nei comparti caratterizzati da produzioni estensive, quali cerealicoltura e foraggicoltura, e nella viticoltura, dove i maggiori margini economici favoriscono gli investimenti in innovazione (Pacciani et al., 2025).

Per quanto riguarda le motivazioni all'adozione, l'indagine di Pacciani et al. (2025) evidenzia come, tra le aziende italiane del campione che utilizzano soluzioni di Agricoltura 4.0,

i principali driver siano riconducibili soprattutto al miglioramento della gestione aziendale, del controllo dei processi e dell'efficienza produttiva. In particolare, gli autori rilevano una maggiore importanza attribuita ai benefici connessi alla gestione complessiva dell'azienda, quali il miglioramento delle capacità previsionali e dei processi di controllo e gestione, rispetto ai vantaggi direttamente riferibili all'efficienza delle operazioni in campo, quali l'ottimizzazione degli input tecnici e dell'impiego delle macchine. Tale risultato descrive le motivazioni dichiarate dalle aziende intervistate e non deve pertanto essere interpretato come una misura della diffusione delle singole applicazioni tecnologiche

Tra le tecnologie maggiormente adottate figurano i sistemi di monitoraggio (26%) e i veicoli connessi (26%), seguiti dalle soluzioni di mappatura (20%) e dai sistemi di telemetria (19%). Rimane invece più contenuta la diffusione dei DSS (7%), delle applicazioni a rateo variabile (6%), dei droni (3%) e della robotica (3%), probabilmente a causa degli elevati costi di investimento, delle competenze tecniche richieste e della limitata percezione della necessità di tali tecnologie (**Fig. 5.6**) (Pacciani et al., 2025).

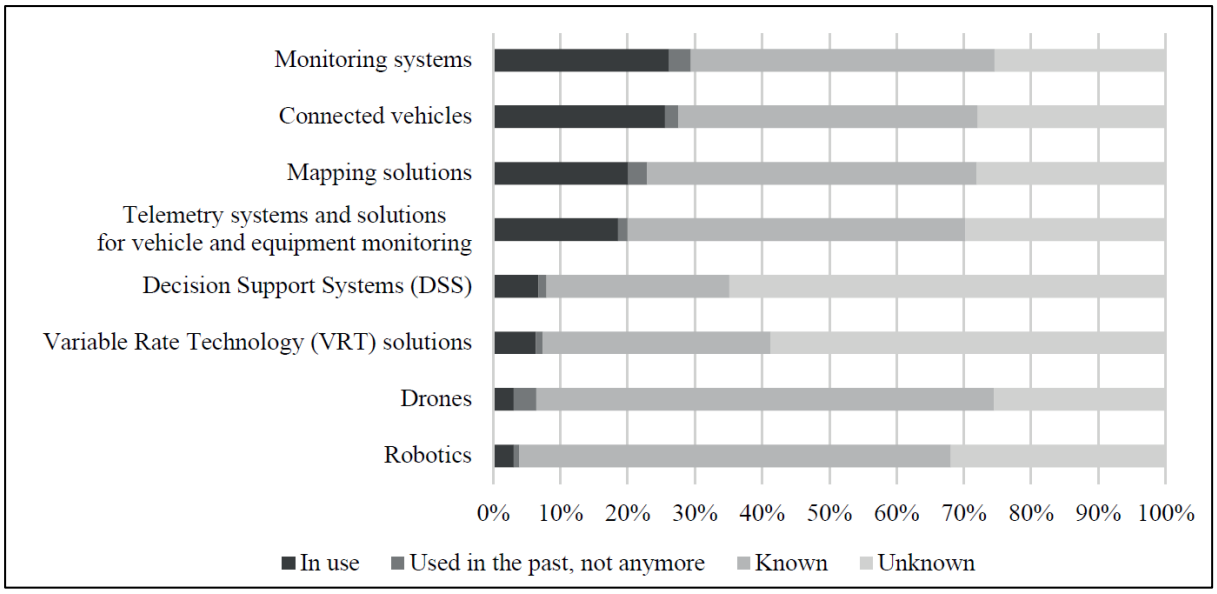


Fig. 5.6 – Livello conoscitivo delle varie tecnologie di Agricoltura 4.0 tra gli intervistati del sondaggio. Sono presi in considerazione quattro diversi livelli: (a) *Unknown*: nessuna conoscenza dell'esistenza degli strumenti; (b) *Known*: limitata familiarità, con una conoscenza solo approssimativa delle soluzioni tecnologiche; (c) *Used in the past, not anymore*: l'intervistato ha familiarità con la tecnologia, nonostante non la stesse più utilizzando al momento del sondaggio; (d) *In use*: l'intervistato ha familiarità con il sistema e lo utilizza (Pacciani et al., 2025).

Pur sulla base di un campione e di un'impostazione metodologica differenti, anche Troiano et al. (2023) evidenziano una diffusione ancora parziale delle tecnologie di AdP in Italia. Nel

loro studio esplorativo, il 35,9% degli intervistati ha dichiarato di utilizzare almeno una tecnologia di AdP, con i sistemi di guida automatica o assistita tra le soluzioni maggiormente diffuse.

Le criticità che limitano l'adozione delle tecnologie risultano in parte analoghe a quelle osservate in Argentina. Tra le aziende italiane che già utilizzano strumenti di Agricoltura 4.0, i principali problemi riguardano la limitata interoperabilità tra le diverse piattaforme (36%), la carenza di competenze specifiche (30%), l'incertezza sul ritorno economico degli investimenti (26%) e la qualità dell'assistenza tecnica (26%), oltre alle difficoltà operative (20%) e alla limitata disponibilità di connessioni adeguate nelle aree rurali (16%) (Pacciani et al., 2025).

Per le aziende che non hanno ancora adottato tali tecnologie, la barriera principale è rappresentata dalla ridotta dimensione aziendale, indicata dal 68% degli intervistati. Tale risultato appare coerente con la struttura del sistema agricolo italiano, nel quale circa il 77% delle aziende è costituito da piccole o medie imprese. A questo si aggiungono la convinzione che le tecniche tradizionali siano ancora sufficienti (50%), la percezione di non poter sfruttare pienamente le potenzialità delle tecnologie digitali (59%), gli elevati costi di investimento (45%) e le difficoltà di accesso agli incentivi (36%) e al credito (22%) (Pacciani et al., 2025).

Nel complesso, il confronto evidenzia come in entrambi i Paesi sia in corso un processo di progressiva diffusione delle tecnologie di AdP, sebbene con caratteristiche differenti legate alla struttura dei rispettivi sistemi agricoli.

In Argentina, soprattutto nella regione della Pampa, la diffusione è stata favorita dalla presenza di grandi aziende cerealicole, da una forte meccanizzazione e dal ruolo svolto dall'INTA, dai contoterzisti e dalle organizzazioni dei produttori. In Italia, invece, la diffusione procede con maggiore gradualità, principalmente a causa della frammentazione fondiaria, della minore dimensione aziendale e delle difficoltà economiche e organizzative che ancora limitano gli investimenti nelle tecnologie digitali (OECD, 2019; Pacciani et al., 2025).

Capitolo 6
CASO STUDIO

6.1 **Obiettivo della ricerca**

L'interesse verso l'impiego delle tecniche di AdP e di telerilevamento in ambito agricolo è in costante crescita, poiché tali strumenti consentono di monitorare in modo rapido, non distruttivo e spazialmente dettagliato lo stato delle colture. In particolare, le immagini satellitari multispettrali permettono di derivare indici vegetativi in grado di descrivere il vigore della vegetazione, lo stato nutrizionale e le condizioni di sviluppo delle colture durante il ciclo produttivo.

Nel caso del frumento, numerosi studi hanno evidenziato come gli indici vegetativi possano essere utilizzati per monitorare la crescita della coltura e per stimarne il potenziale produttivo (Cheng et al., 2022; Saad El Imanni et al., 2022; Wu et al., 2024; Zhu et al., 2024). Tuttavia, l'efficacia di tali strumenti dipende sia dalla scelta degli indici utilizzati sia dal momento del ciclo colturale in cui vengono acquisiti i dati satellitari. Inoltre, la forte variabilità spaziale che caratterizza gli appezzamenti agricoli rende necessario integrare le informazioni provenienti dal telerilevamento con dati produttivi georeferenziati, quali le mappe di resa ottenute durante la raccolta.

Le mappe di resa rappresentano infatti uno degli strumenti più importanti dell'AdP, in quanto consentono di quantificare la variabilità produttiva all'interno dei campi e di individuare zone caratterizzate da differenti livelli di produttività. L'integrazione tra dati satellitari e mappe di resa permette quindi di analizzare le relazioni tra sviluppo vegetativo e produzione, fornendo informazioni utili per la gestione sito-specifica delle colture e per la definizione di strategie agronomiche più efficienti e sostenibili.

In questo contesto si inserisce il presente lavoro, che ha come obiettivo l'analisi di un caso studio di AdP applicato a un appezzamento di frumento situato nel *partido di Junín*, nella provincia di Buenos Aires (Argentina). Lo studio si basa sull'utilizzo di mappe di resa georeferenziate e di immagini satellitari, dalle quali sono stati estratti diversi indici vegetativi durante il ciclo colturale.

L'elaborazione congiunta di tali dati ha consentito di analizzare la variabilità spaziale della produzione e di valutare la capacità degli indici vegetativi di descrivere e prevedere le differenze produttive osservate all'interno dell'appezzamento.

Gli obiettivi specifici del lavoro sono:

- Analizzare la variabilità spaziale della resa all'interno dell'appezzamento oggetto di studio mediante l'elaborazione delle mappe di produzione.
- Calcolare e confrontare diversi indici vegetativi derivati da immagini estratte dalla piattaforma PlanetExplorer nelle principali fasi fenologiche del frumento.
- Analizzare l'evoluzione temporale degli indici vegetativi nel corso del ciclo colturale.
- Valutare la relazione tra indici vegetativi e resa, individuando gli indicatori maggiormente correlati alla produttività della coltura.
- Individuare le fasi fenologiche nelle quali gli indici vegetativi mostrano la maggiore associazione con la resa finale e la maggiore capacità di discriminare differenti livelli di produttività.
- Valutare le potenzialità dell'integrazione tra mappe di resa e dati satellitari per applicazioni di AdP nei sistemi cerealicoli della Pampa argentina.

Capitolo 7
MATERIALI E METODI

7.1 **Area di studio**

L'appezzamento oggetto di studio, di seguito denominato Junín 01, ha una superficie di circa 100 ha ed è situato nel partido di Junín, nella provincia di Buenos Aires (Argentina) (latitudine 34.63796° S; longitudine 60.88682° W; WGS84) (**Fig. 7.1**).

L'appezzamento presenta una morfologia irregolare, assimilabile ad un rettangolo di circa 830 m × 1.400 m. Nella porzione centrale è presente un'area non coltivata e in parte boscata edificata, di estensione pari a circa 3,4 ha, che interrompe la continuità della superficie coltivata, più altre aree relativamente di ridotta estensione lungo il bordo di sud-ovest.

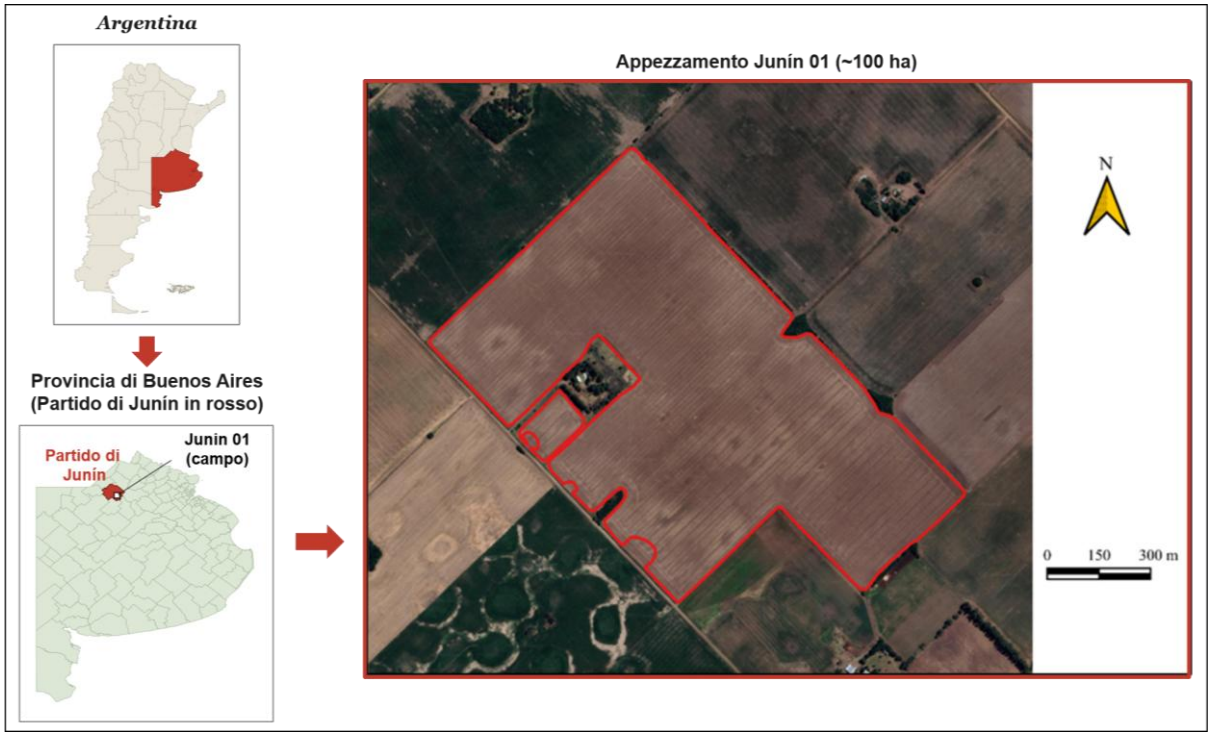


Fig. 7.1 – Localizzazione dell'appezzamento oggetto di studio nel partido di Junín (Buenos Aires, Argentina) (latitudine 34.63796° S; longitudine 60.88682° W; WGS84).

Le attività sperimentali sono state condotte nel corso dell'annata agraria 2025/2026 su una coltura di frumento tenero (*Triticum aestivum* L.), varietà Don Mario Catalpa, gestita secondo le pratiche dell'agricoltura conservativa adottate dall'azienda agricola. Il frumento è stato

seminato il 24/06/2025 con il sistema della semina diretta (no-till) e la raccolta è stata effettuata in data 16/12/2025.

Sulla base della Mappa dei Suoli della Provincia di Buenos Aires (scala 1:50.000), nell'appezzamento sono presenti due principali associazioni di suoli, differenti per estensione e composizione (**Fig. 7.2**). La prima, identificata come **Ju2** e distribuita su circa 78 ha, è costituita prevalentemente da suoli *Junín* (80%), con inclusioni di *La Oriental* (20%). La seconda, identificata come **FT6** e presente su circa 23 ha, è caratterizzata prevalentemente da suoli *Fortín Tiburcio* (90%), con inclusioni di *Las Nutrias* (10%). L'appezzamento presenta una morfologia sostanzialmente pianeggiante e suoli riconducibili prevalentemente agli Hapludol tipici, mentre nelle aree più depresse sono presenti Argiudol acquici.

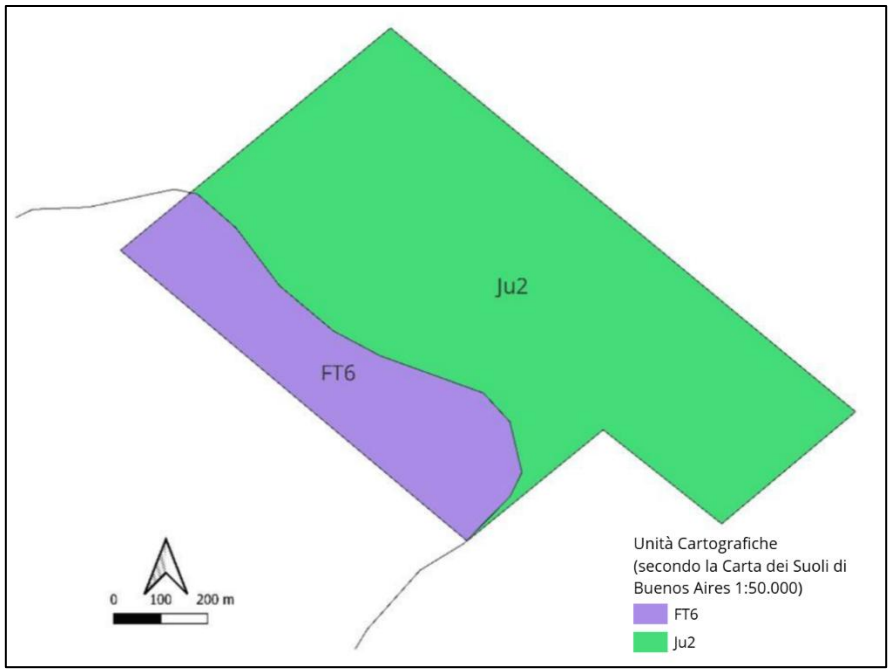


Fig. 7.2 – Distribuzione delle unità cartografiche dei suoli nell'appezzamento Junín 01, sulla base della Mappa dei Suoli della Provincia di Buenos Aires (scala 1:50.000).

Il suolo presenta una tessitura franca, sostanzialmente uniforme lungo lo strato considerato (0–30 cm), con un contenuto medio di argilla, limo e sabbia pari rispettivamente al 18,3%, 38,6% e 43,2%. Nello stesso strato, il contenuto medio di carbonio organico del suolo (Soil Organic Carbon, SOC) è pari all'1,87%, con valori più elevati nello strato superficiale (0–5 cm), dove raggiunge il 2,87% (fonte: SoilGrids - Global gridded soil information, https://soilgrids.org/). Tale maggiore concentrazione superficiale è compatibile con la gestione in semina diretta e con l'accumulo dei residui colturali sulla superficie del suolo. L'appezzamento presenta inoltre una modesta variabilità microtopografica, con alternanza di

aree leggermente rilevate e depresse, potenzialmente in grado di determinare differenze locali nelle condizioni di drenaggio e nella disponibilità idrica.

Per la caratterizzazione morfologica dell'appezzamento è stato generato ed elaborato un Modello Digitale di Elevazione (DEM), integrato con il tracciamento delle relative curve di livello (**Fig. 7.3**). All'interno del campo si registra una lieve variabilità micro-topografica, con quote comprese tra un minimo di 76,0 m e un massimo di 83,5 m s.l.m., determinando un dislivello complessivo di circa 7,5 m. Tale configurazione consente di riconoscere la presenza di settori relativamente più elevati e di aree più depresse che possono influenzare il comportamento idrico del suolo a scala intra-appezzamento. Le depressioni morfologiche sono localizzate prevalentemente lungo il margine sud-occidentale dell'appezzamento, con nuclei rilevati anche nelle aree centro-nord e centro-orientale, mentre le zone a maggiore elevazione si trovano perlopiù in piccoli nuclei isolati nei settori occidentale e centrale. Prevalgono le classi intermedie (77,6 – 80,5 m), che descrivono un rilievo nel complesso privo di gradienti marcati. La sovrapposizione delle curve di livello permette di apprezzare l'andamento delle pendenze e la direzione dei deflussi idrici superficiali.

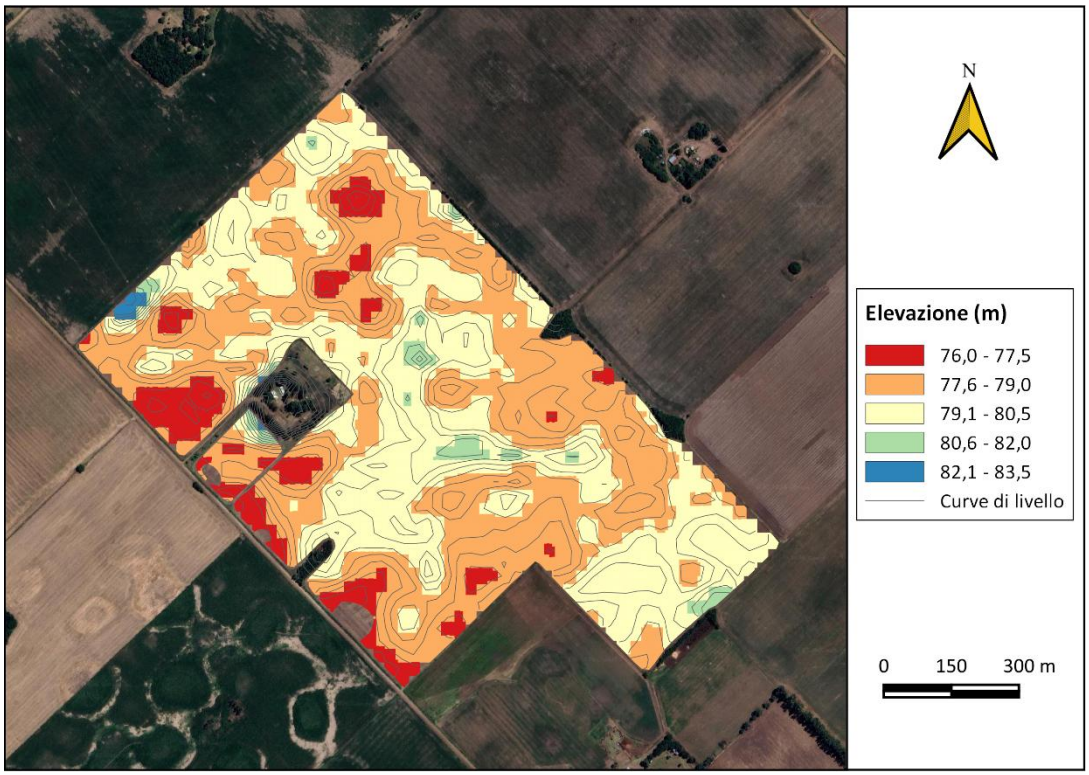


Fig. 7.3 – Elevazione (m s.l.m.) e curve di livello dell'appezzamento Junín 01.

7.2 **Gestione agronomica**

La gestione agronomica del campo oggetto di studio è stata condotta seguendo un protocollo specifico per la coltura del frumento, articolato nelle fasi di concimazione, avvicendamento colturale, semina e difesa fitosanitaria.

La strategia nutrizionale ha previsto un apporto frazionato di elementi nutritivi. In presemina è stata effettuata una concimazione di fondo con urea incorporata nel terreno alla dose di 130 kg ha^{-1}. Successivamente, in concomitanza con la semina, è stato distribuito MAP (fosfato monoammonico) in ragione di 100 kg ha^{-1}. Infine, la concimazione di copertura è stata effettuata mediante un intervento alla dose di 170 kg ha^{-1} di un fertilizzante composto da urea e azufertil in rapporto 80:20.

Il terreno ospitava come coltura precedente la soia di prima raccolta e la semina del frumento è stata poi realizzata ad una densità di 367 semi/m^2.

Il diserbo è stato pianificato combinando interventi di pre-emergenza, mediante trattamento a base di Finesse ad effetto residuale, e di post-emergenza, in quest'ultimo caso con il prodotto commerciale Curtail M. Inoltre, è stato previsto un intervento localizzato a base di Bromoxinil, specificamente destinato al controllo delle specie crucifere.

La difesa fungicida è stata eseguita tramite due trattamenti, il primo alla fase fenologica di primo nodo con il fungicida Stinger, mentre il secondo allo stadio di foglia bandiera con il prodotto Elatus Ace.

7.3 **Dati meteorologici**

Durante il ciclo colturale sono stati analizzati i principali dati meteorologici relativi all'annata agraria 2025/2026 e confrontati con i valori medi storici disponibili per l'area di Junín. In particolare, è stato considerato l'andamento delle precipitazioni mensili nel periodo compreso tra luglio e dicembre 2025 (**Tab. 7.1**).

Nel periodo luglio-ottobre le precipitazioni sono risultate superiori ai corrispondenti valori medi storici. Gli apporti pluviometrici più elevati sono stati registrati in agosto (190,0 mm) e ottobre (157,8 mm), rispetto a valori medi storici pari rispettivamente a 34,3 e 110,7 mm. Nei mesi di novembre e dicembre, al contrario, le precipitazioni sono risultate inferiori alle rispettive medie storiche.

Tab. 7.1 – Precipitazioni mensili registrate durante l'annata agraria 2025/2026 nel *partido* di Junín e confronto con i valori medi storici. Fonte: stazione meteorologica Junín Aero (SMN).

Mese	Precipitazioni (mm)	
	2025	Media storica
Luglio	*58,0*	*34,0*
Agosto	*190,0*	*34,3*
Settembre	*70,5*	*53,4*
Ottobre	*157,8*	*110,7*
Novembre	*69,2*	*106,8*
Dicembre	*90,0*	*103,0*

Le temperature medie mensili, invece, si sono mantenute prossime o leggermente superiori ai valori storici della regione (**Tab. 7.2**).

Tab. 7.2 – Temperature medie mensili registrate durante l'annata agraria 2025/2026 nel *partido* di Junín e confronto con i valori medi storici del periodo 1991-2020. Fonte: stazione meteorologica Junín Aero (SMN).

Mese	Temperatura (°C)	
	Media 2025	Media storica 1991-2020
Luglio	*10,9*	*8,7*
Agosto	*12,0*	*10,7*
Settembre	*14,0*	*13,2*
Ottobre	*17,5*	*16,3*
Novembre	*19,3*	*19,6*
Dicembre	*23,5*	*22,1*

7.4 **Acquisizione ed elaborazione delle immagini satellitari**

Per il monitoraggio della coltura sono state utilizzate immagini multispettrali acquisite dalla costellazione PlanetScope, mediante sensori PSB.SD (SuperDove). Le immagini utilizzate appartenevano al prodotto Analytic 8-band Surface Reflectance + UDM2, già ortorettificato e corretto atmosfericamente a livello di riflettanza superficiale. I raster multispettrali erano costituiti da otto bande (**Tab. 7.3**) e presentavano una risoluzione di 3 m.

Tab. 7.3 – Bande spettrali PlanetScope SuperDove (PSB.SD).

Banda	Nome	λ centrale (nm)	Intervallo (nm)
B1	Coastal Blue	*442*	*431–452*
B2	Blue	*490*	*465–515*
B3	Green I	*531*	*513–549*
B4	Green	*565*	*547–583*
B5	Yellow	*610*	*600–620*
B6	Red	*665*	*650–680*
B7	Red Edge	*705*	*697–713*
B8	Near Infrared	*865*	*845–885*

Le immagini PlanetScope sono state selezionate in corrispondenza delle principali fasi fenologiche del frumento, privilegiando le scene temporalmente più prossime alle fasi di interesse e caratterizzate dalle migliori condizioni di acquisizione, con particolare riferimento alla copertura nuvolosa (**Tab. 7.4**).

Tab. 7.4 – Date di acquisizione delle immagini PlanetScope SuperDove relative alle fasi fenologiche del frumento e percentuale di copertura nuvolosa delle scene selezionate.

Fase fenologica	Data di acquisizione	Copertura nuvolosa (%)
Emergenza/inizio sviluppo	*17/07/2025*	*0,0*
Accestimento	*15/08/2025*	*0,0*
Levata	*11/09/2025*	*0,0*
Massimo sviluppo vegetativo/foglia bandiera	*01/10/2025*	*0,0*
Inizio riempimento della granella	*14/10/2025*	*0,0*

Per ciascuna acquisizione sono stati calcolati quattro indici vegetativi: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Red Edge Index (NDRE), Enhanced Vegetation Index (EVI) e Ratio Vegetation Index (RVI) (**Tab. 7.5**)

Tab. 7.5 – Indici vegetativi calcolati dalle immagini PlanetScope SuperDove, formule di calcolo, bande spettrali utilizzate e principali applicazioni agronomiche.

Indice	Formula	Bande PlanetScope	Principale significato
NDVI	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$	B8, B6	Vigore vegetativo, biomassa
NDRE	$\frac{NIR - RedEdge}{NIR + RedEdge}$	B8, B7	Clorofilla, stato nutrizionale
EVI	$2{,}5 \times \frac{NIR - Red}{(NIR + 6Red - 7{,}5Blue + 1)}$	B8, B6, B2	Struttura della chioma, LAI, con correzione degli effetti atmosferici
RVI	$\frac{NIR}{Red}$	B8, B6	Vigore vegetativo e biomassa

Per il calcolo di NDVI, NDRE e RVI, i valori delle bande *Surface Reflectance* sono stati utilizzati direttamente, poiché il fattore di scala, essendo comune alle bande considerate, si annulla nel calcolo dei rapporti. Per l'EVI, invece, la presenza di una costante additiva nella formula richiede l'impiego dei valori espressi come riflettanza; pertanto, i valori delle bande sono stati preliminarmente convertiti applicando il fattore di scala 0,0001 previsto per il prodotto PlanetScope Surface Reflectance.

7.5 **Acquisizione e mappatura dei dati di resa**

I dati di resa sono stati acquisiti durante le operazioni di raccolta, effettuate il 16/12/2025 mediante una mietitrebbia John Deere S670, equipaggiata con sistema integrato di monitoraggio della resa (**Fig. 7.4**). La macchina era dotata di una barra di taglio della larghezza di 12 m e di un sistema di acquisizione operante con una frequenza di circa 1,1 Hz, corrispondente a una registrazione ogni 0,9 s. La distanza media tra due acquisizioni consecutive lungo la direzione di avanzamento è risultata pari a circa 1,2 m.

Durante la raccolta, il sistema di monitoraggio ha acquisito in continuo i parametri necessari alla determinazione della resa (tra i quali la produzione lorda, l'umidità della granella e la velocità di avanzamento). Il flusso di granella è stato rilevato mediante un sensore di massa basato sul principio dell'impatto, installato in corrispondenza dell'elevatore della granella pulita, mentre un apposito sensore ha misurato il contenuto di umidità della granella.

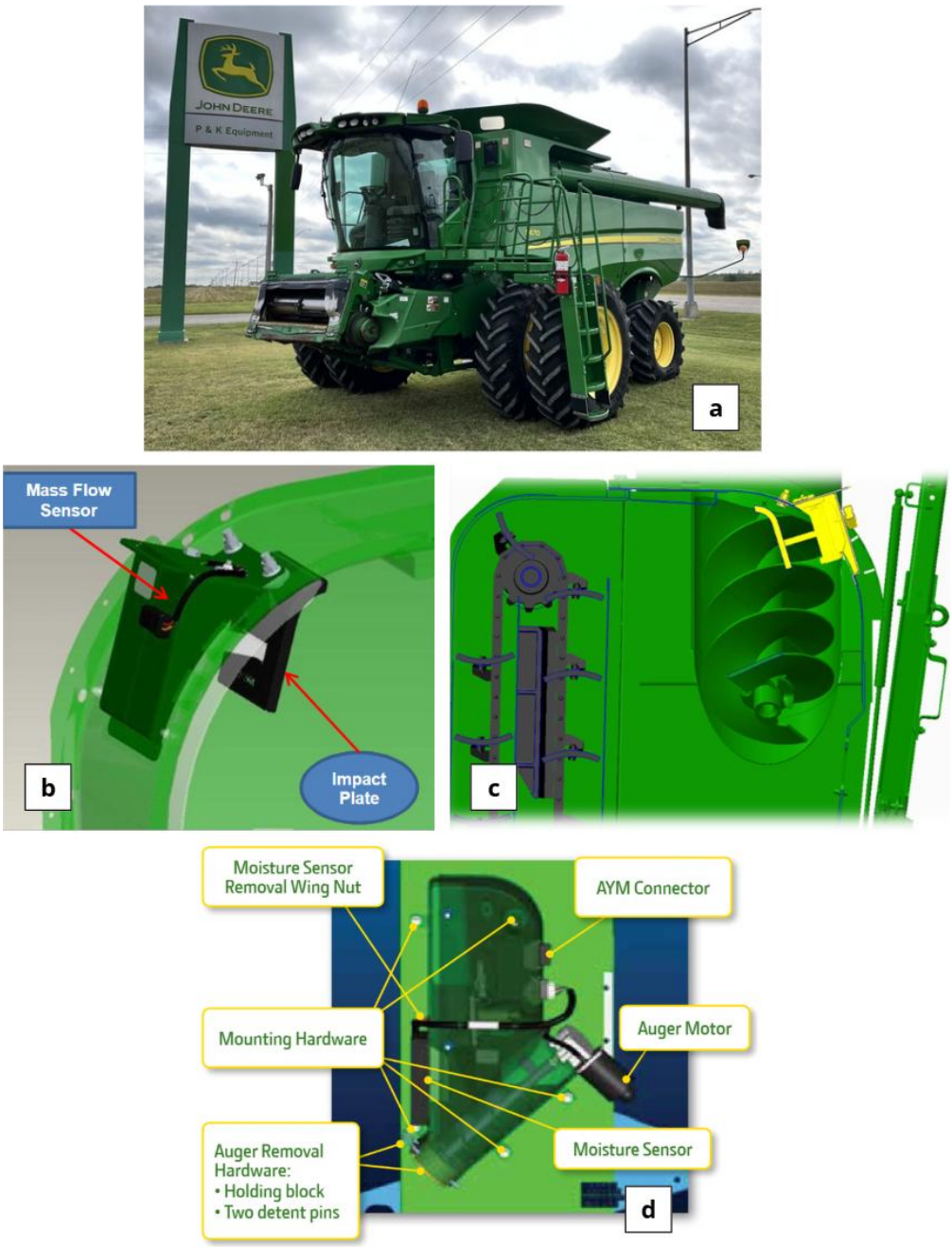


Fig. 7.4 – Mietitrebbia John Deere S670 (a) e i sistemi integrati di acquisizione della resa (b, c) e dell'umidità (d) delle mietitrebbie della serie S (John Deere).
Fonti: https://ar.inspiredpencil.com/pictures-2023/john-deere-s670-combine (a), deere.com/assets/pdfs/common/parts-and-service/manuals-training/Ready to Harvest Yield Accuracy.pdf (b, c), deere.com/assets/pdfs/region-1/parts-and-service/quick-reference-guides/YieldCalibration-English.pdf (d).

Queste informazioni sono state integrate con la velocità di avanzamento della mietitrebbia, la larghezza di raccolta impostata nel sistema e la posizione rilevata mediante GNSS, consentendo di determinare la resa per unità di superficie e di associare ciascuna registrazione alla corrispondente posizione all'interno dell'appezzamento. I dati acquisiti durante la raccolta,

comprendenti i valori georeferenziati di resa, umidità della granella e i principali parametri operativi associati, sono stati registrati e successivamente esportati attraverso la piattaforma Climate FieldView per le successive operazioni di controllo, filtraggio ed elaborazione spaziale.

Prima delle elaborazioni spaziali, i dati puntuali di resa sono stati sottoposti a una procedura di controllo, pulizia e filtraggio, finalizzata all'eliminazione delle osservazioni anomale o non rappresentative delle effettive condizioni produttive dell'appezzamento. Sono stati preliminarmente esclusi i punti esterni ai confini dell'area di studio, nonché le registrazioni riconducibili ad anomalie verificatesi durante le operazioni di raccolta.

Successivamente, i valori anomali di resa (outlier) sono stati individuati sulla base della media e della deviazione standard della distribuzione. In particolare, sono state escluse le osservazioni con valori di resa inferiori a $\mu - 2\sigma$ o superiori a $\mu + 2\sigma$, dove μ rappresenta la media e σ la deviazione standard. Il dataset così ottenuto è stato utilizzato per le successive operazioni di interpolazione e mappatura della resa. I dati di resa sono stati riproiettati nel sistema metrico WGS84/UTM zona 20S (EPSG:32720), al fine di consentire le successive elaborazioni spaziali e l'integrazione con i dati derivati dalle immagini PlanetScope.

La distribuzione continua della resa all'interno degli appezzamenti è stata quindi ottenuta mediante interpolazione dei dati puntuali utilizzando il metodo Inverse Distance Weighting (IDW). L'interpolazione è stata eseguita generando un raster con risoluzione spaziale di 6 × 6 m. La scelta di tale risoluzione è stata effettuata tenendo conto delle caratteristiche del sistema di raccolta e della frequenza di acquisizione. In particolare, a fronte di una distanza media di circa 1,2 m tra registrazioni consecutive lungo la direzione di avanzamento, ciascuna osservazione era riferita a una fascia di raccolta larga fino a 12 m. L'adozione di una risoluzione di 6 × 6 m è stata pertanto considerata un compromesso tra la necessità di rappresentare la variabilità produttiva intra-appezzamento e quella di evitare un eccessivo sovra campionamento trasversale e la conseguente generazione di un dettaglio spaziale non supportato dall'effettiva risoluzione del sistema di acquisizione.

7.6 **Integrazione ed estrazione dei dati georeferenziati**

Tutti i dati georeferenziati sono stati visualizzati ed elaborati mediante il software QGIS 3.28.10 (QGIS Geographic Information System, QGIS Association; http://www.qgis.org), riferiti al sistema metrico WGS84/UTM zona 20S (EPSG:32720) e ritagliati sui confini degli appezzamenti oggetto di studio.

Gli strati informativi utilizzati comprendevano: (i) i raster degli indici vegetativi NDVI, NDRE, EVI e RVI, derivati dalle immagini PlanetScope per ciascuna data di acquisizione, e (ii) il raster della resa, ottenuto mediante interpolazione dei dati puntuali di raccolta.

Per integrare le informazioni provenienti dai diversi strati raster è stato generato un reticolo poligonale regolare con celle di 6 × 6 m, adottato come unità spaziale comune per le successive elaborazioni. La dimensione delle celle è stata definita in coerenza con la risoluzione adottata per la mappa di resa. I raster degli indici vegetativi sono stati invece mantenuti alla risoluzione spaziale originale di PlanetScope (3 × 3 m), evitando operazioni preliminari di ricampionamento.

Mediante lo strumento Zonal Statistics di QGIS sono stati calcolati, per ciascuna cella del reticolo, i valori medi degli indici vegetativi e della resa. Per gli indici PlanetScope, ciascuna cella di 6 × 6 m può comprendere teoricamente fino a quattro pixel originari di 3 × 3 m; il valore medio ottenuto mediante statistiche zonali è stato pertanto assunto quale valore rappresentativo dell'unità spaziale.

A ciascuna cella è stato assegnato un codice identificativo univoco. Al termine delle operazioni di estrazione sono stati determinati i centroidi delle celle, utilizzati come riferimento geografico delle unità spaziali di 6 × 6 m.

Il dataset finale conteneva pertanto, per ciascuna unità spaziale di 36 m², il codice identificativo, le coordinate del centroide, il valore della resa e i valori medi dei quattro indici vegetativi per tutte le date considerate. Il dataset è stato infine esportato in formato Microsoft Excel per le successive elaborazioni statistiche.

7.7 **Analisi statistica e spaziale dei dati**

Prima delle analisi statistiche, il dataset integrato è stato sottoposto a un controllo di completezza. Considerata la ridotta incidenza delle osservazioni mancanti rispetto alla numerosità complessiva del dataset, le unità spaziali caratterizzate dalla presenza di uno o più valori mancanti sono state escluse dalle successive elaborazioni. Tale procedura ha consentito di utilizzare, per tutte le analisi, un insieme comune di celle di 6 × 6 m caratterizzate dalla disponibilità completa dei valori di resa e degli indici vegetativi relativi alle diverse date di acquisizione.

I dati sono stati inizialmente sottoposti ad analisi statistica descrittiva, mediante il calcolo della numerosità campionaria, della media, della mediana, dei valori minimo e massimo, della

deviazione standard, del coefficiente di variazione e degli indici di asimmetria (skewness) e curtosi (kurtosis), al fine di caratterizzare la distribuzione e la variabilità della resa e degli indici vegetativi.

La normalità delle distribuzioni è stata valutata mediante il test di Kolmogorov–Smirnov. Considerata l'elevata numerosità del dataset e la conseguente sensibilità del test anche a deviazioni di modesta entità dalla distribuzione normale, i relativi risultati sono stati valutati congiuntamente alle caratteristiche descrittive delle distribuzioni, con particolare riferimento agli indici di asimmetria e curtosi.

L'andamento temporale degli indici vegetativi è stato analizzato mediante un approccio descrittivo, considerando per ciascuna data di acquisizione i valori medi e la relativa deviazione standard. Le dinamiche temporali dei diversi indici sono state rappresentate graficamente mantenendo le rispettive scale originali, al fine di preservarne il significato quantitativo e consentire il confronto con i valori riportati in letteratura.

La variabilità spaziale della resa e degli indici vegetativi è stata analizzata mediante rappresentazioni cartografiche della resa interpolata e dei quattro indici vegetativi relativi all'acquisizione del 1° ottobre 2025, corrispondente alla fase di massimo sviluppo vegetativo

La relazione tra gli indici vegetativi e la resa è stata analizzata, per ciascuna data di acquisizione e per ciascun indice, utilizzando i valori riferiti alle medesime celle di 6 × 6 m. L'intensità e la direzione delle associazioni tra resa e indici vegetativi sono state valutate mediante il coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman (ρ), calcolato separatamente per ciascun indice e data di acquisizione.

Al fine di caratterizzare la variabilità produttiva intra-appezzamento e individuare aree caratterizzate da differenti livelli di resa, è stata eseguita un'analisi di clustering mediante il plugin Attribute Based Clustering implementato in QGIS. L'analisi è stata condotta sul layer puntuale costituito dai centroidi delle celle di 6 × 6 m utilizzate come unità spaziali di riferimento, impiegando come variabile di classificazione esclusivamente il valore medio della resa associato a ciascuna cella.

Il raggruppamento delle osservazioni è stato effettuato mediante algoritmo K-means. Al fine di valutare il numero di cluster più appropriato sono state considerate soluzioni caratterizzate da un diverso numero di gruppi e applicato l'Elbow Method, analizzando la variazione della somma degli errori quadratici (Sum of Squared Errors, SSE) all'aumentare del numero di cluster. La scelta definitiva del numero di gruppi è stata effettuata considerando

congiuntamente l'andamento della curva dell'Elbow Method, il grado di separazione dei valori medi di resa e la distribuzione spaziale delle classi ottenute.

I cluster individuati sono stati successivamente ordinati sulla base della rispettiva resa media e classificati come classi a bassa (Low), media (Medium) e alta (High) produttività. Per ciascuna classe sono stati calcolati numerosità, resa media, deviazione standard e coefficiente di variazione.

Al fine di verificare la capacità degli indici vegetativi di discriminare le zone caratterizzate da differenti livelli di produttività, i valori di NDVI, NDRE, EVI e RVI rilevati nelle diverse date di acquisizione sono stati confrontati tra le classi Low, Medium e High. Considerata la distribuzione non normale degli indici vegetativi, i confronti sono stati effettuati separatamente per ciascun indice e data mediante test di Kruskal–Wallis.

Considerata l'elevata numerosità del dataset e la conseguente possibilità di rilevare come statisticamente significative anche differenze di modesta entità, alla significatività statistica è stata affiancata la stima della dimensione dell'effetto mediante epsilon squared (**Eq. 2**), calcolata a partire dalla statistica H del test di Kruskal–Wallis secondo la relazione:

$$\varepsilon^2 = \frac{H - k + 1}{N - k} \qquad \textbf{Eq. 2}$$

dove:

H = statistica H del test di Kruskal–Wallis;

k = numero di gruppi confrontati;

N = numero totale di osservazioni.

I valori medi degli indici e la relativa deviazione standard sono stati inoltre utilizzati per rappresentare graficamente la dinamica temporale delle tre classi di produttività.

Al fine di approfondire la relazione quantitativa tra gli indici vegetativi e la resa, sono stati sviluppati modelli di regressione lineare semplice, assumendo la resa come variabile dipendente e l'indice vegetativo come variabile indipendente. Sulla base dei risultati delle analisi di correlazione e della capacità degli indici di discriminare le classi di produttività, l'analisi è stata condotta per NDRE ed EVI nelle acquisizioni dell'11 settembre e del 1° ottobre. Per ciascuna combinazione indice × data sono stati determinati il coefficiente di determinazione (R^2), lo Standard Error of Estimate (SEE), l'intercetta (β_0), il coefficiente di regressione (β_1) e la significatività statistica del modello. L'adeguatezza dei modelli lineari è stata inoltre valutata mediante l'esame grafico degli scatterplot e dei residui rispetto ai valori predetti.

Capitolo 8
RISULTATI

8.1 **Statistica descrittiva**

L'esclusione delle osservazioni incomplete ha determinato una riduzione del dataset da 27.165 a 26.900 celle, corrispondente allo 0,9% dei dati iniziali. Le celle caratterizzate dalla presenza di dati mancanti risultavano prevalentemente localizzate lungo i margini dell'appezzamento (**Fig. 8.1**).



Fig. 8.1 – Localizzazione delle celle con dati mancanti nell'appezzamento Junín 01. Sono rappresentati i centroidi delle celle del reticolo 6 × 6 m, con evidenziate le unità caratterizzate da dati mancanti, successivamente escluse dalle analisi.

I risultati dell'analisi statistica descrittiva della resa e degli indici vegetativi e sono riportati, rispettivamente, nelle **Tab. 8.1** e **Tab. 8.2**.

I dati di resa hanno mostrato una variabilità complessivamente contenuta, con una resa media pari a 7,08 t ha^{-1} e un coefficiente di variazione del 3,78%**.** Il confronto tra le risoluzioni

spaziali di 3 × 3 m e 6 × 6 m ha evidenziato valori sostanzialmente sovrapponibili per i principali parametri descrittivi, in particolare media, mediana, deviazione standard e coefficiente di variazione; le principali differenze hanno riguardato i valori estremi della distribuzione, con un intervallo leggermente più ampio nel raster a 6 × 6 m. La prossimità tra media e mediana e i ridotti valori di *skewness* indicano inoltre una distribuzione della resa sostanzialmente simmetrica. Considerando tali risultati e le caratteristiche del sistema di acquisizione della resa, con particolare riferimento alla larghezza della barra di taglio e alla distanza tra registrazioni consecutive lungo la direzione di avanzamento, per le successive elaborazioni è stata adottata la risoluzione spaziale di 6 × 6 m.

Tab. 8.1 – Statistiche descrittive dei dati di resa ottenuti mediante interpolazione a risoluzione spaziale di 3 × 3 m e 6 × 6 m nell'appezzamento Junín 01.

Resa (ton/ha)	n	Media	Mediana	Min.	Max.	SD	CV (%)	Skewness	Kurtosis
Resa 3x3	*26841*	*7,08*	*7,09*	*5,26*	*8,66*	*0,27*	*3,78*	*0,00*	*2,90*
Resa 6x6	*26900*	*7,08*	*7,09*	*5,04*	*8,95*	*0,27*	*3,78*	*-0,10*	*3,15*

Min., valore minimo; Max., valore massimo; SD, deviazione standard; CV, coefficiente di variazione; Skewness, indice di asimmetria; Kurtosis, indice di curtosi.

Tab. 8.2 – Statistica descrittiva degli indici vegetativi dell'appezzamento Junín 01.

VI	Data	Media	Mediana	Min.	Max.	SD	CV (%)	Skewness	Kurtosis
NDVI	17.07	*0,31*	*0,30*	*0,23*	*0,55*	*0,03*	*8,26*	*2,81*	*14,04*
	15.08	*0,52*	*0,52*	*0,36*	*0,71*	*0,04*	*7,83*	*0,75*	*1,23*
	11.09	*0,84*	*0,85*	*0,46*	*0,92*	*0,03*	*4,14*	*-1,39*	*5,92*
	01.10	*0,89*	*0,90*	*0,56*	*0,93*	*0,02*	*2,06*	*-4,76*	*47,27*
	14.10	*0,89*	*0,89*	*0,51*	*0,92*	*0,02*	*1,89*	*-5,56*	*62,08*
NDRE	17.07	*0,23*	*0,23*	*0,18*	*0,40*	*0,02*	*7,81*	*2,35*	*11,86*
	15.08	*0,36*	*0,35*	*0,28*	*0,49*	*0,03*	*7,84*	*0,72*	*1,20*
	11.09	*0,64*	*0,64*	*0,34*	*0,76*	*0,04*	*5,91*	*-0,68*	*2,74*
	01.10	*0,70*	*0,70*	*0,39*	*0,76*	*0,02*	*3,00*	*-2,28*	*16,23*
	14.10	*0,71*	*0,71*	*0,43*	*0,76*	*0,02*	*2,94*	*-3,18*	*22,32*
EVI	17.07	*0,13*	*0,13*	*0,07*	*0,29*	*0,01*	*10,81*	*4,43*	*32,48*
	15.08	*0,31*	*0,31*	*0,16*	*0,47*	*0,03*	*9,87*	*1.01*	*2,05*
	11.09	*0,60*	*0,60*	*0,23*	*0,77*	*0,05*	*8,40*	*-0,44*	*2,33*
	01.10	*0,80*	*0,80*	*0,24*	*0,97*	*0,05*	*6,40*	*-1,42*	*7,41*
	14.10	*0,77*	*0,78*	*0,24*	*0,88*	*0,04*	*5,56*	*-1,96*	*11,85*
RVI	17.07	*1,89*	*1,86*	*1,60*	*3,40*	*0,12*	*6,36*	*4,02*	*27,29*
	15.08	*3,21*	*3,14*	*2,13*	*5,88*	*0,40*	*12,41*	*1,61*	*4,48*
	11.09	*12,39*	*12,17*	*2,72*	*25,01*	*2,79*	*22,50*	*0,42*	*0,31*
	01.10	*18,28*	*18,50*	*3,53*	*26,77*	*2,45*	*13,40*	*-0,88*	*2,37*
	14.10	*16,95*	*17,17*	*3,11*	*23,19*	*1,91*	*11,26*	*-1,22*	*4,27*

VI, Vegetation index; NDVI, Normalized Difference Vegetation Index; NDRE, Normalized Difference Red Edge Index; EVI, Enhanced Vegetation Index; RVI, Ratio Vegetation Index; Min., minimo; Max., massimo; SD, standard deviation; CV, coefficiente di variazione; Skewness, indice di asimmetria; Kurtosis, indice di curtosi.

L'andamento del coefficiente di variazione ha evidenziato differenze nella variabilità relativa degli indici vegetativi durante il ciclo colturale. Per NDVI e NDRE il CV ha mostrato una progressiva riduzione con l'avanzare dello sviluppo della coltura, passando rispettivamente dall'8,26% e 7,81% nella prima acquisizione all'1,89% e 2,94% nell'ultima. Una tendenza complessivamente decrescente è stata osservata anche per l'EVI, con valori più elevati nelle prime acquisizioni e progressivamente inferiori nelle fasi successive. L'RVI ha mostrato invece un andamento differente, con un aumento della variabilità relativa fino all'11 settembre (CV = 22,50%), seguito da una progressiva riduzione nelle acquisizioni di ottobre.

8.2 **Andamento temporale degli indici vegetativi**

I valori medi degli indici vegetativi e le relative deviazioni standard sono sintetizzati nella **Tab. 8.3** e rappresentati graficamente nella **Fig. 8.2**, al fine di evidenziarne l'andamento

temporale nel corso del ciclo colturale. Per consentire la rappresentazione congiunta dei quattro indici mantenendone i valori originali, NDVI, NDRE ed EVI sono riportati sull'asse verticale principale, mentre l'RVI, caratterizzato da un diverso intervallo di valori, è rappresentato su un asse verticale secondario

Tab. 8.3 – Valori degli Indici Vegetativi (media ± SD) estratti nelle date di indagine.

Fase fenologica	**Data**	**Indici vegetativi**			
		NDVI	NDRE	EVI	RVI
Emergenza	17.07	*0,31±0,03*	*0,23±0,02*	*0,13±0,01*	*1,89±0,12*
Accestimento	15.08	*0,52±0,04*	*0,36±0,03*	*0,31±0,03*	*3,21±0,40*
Levata	11.09	*0,84±0,03*	*0,64±0,04*	*0,60±0,05*	*12,39±2,79*
Max sviluppo	01.10	*0,89±0,02*	*0,70±0,02*	*0,80±0,05*	*18,28±2,45*
Riempimento granella	14.10	*0,89±0,02*	*0,71±0,02*	*0,77±0,04*	*16,95±1,91*

NDVI, Normalized Difference Vegetation Index; NDRE, Normalized Difference Red Edge Index; EVI, Enhanced Vegetation Index; RVI, Ratio Vegetation Index;

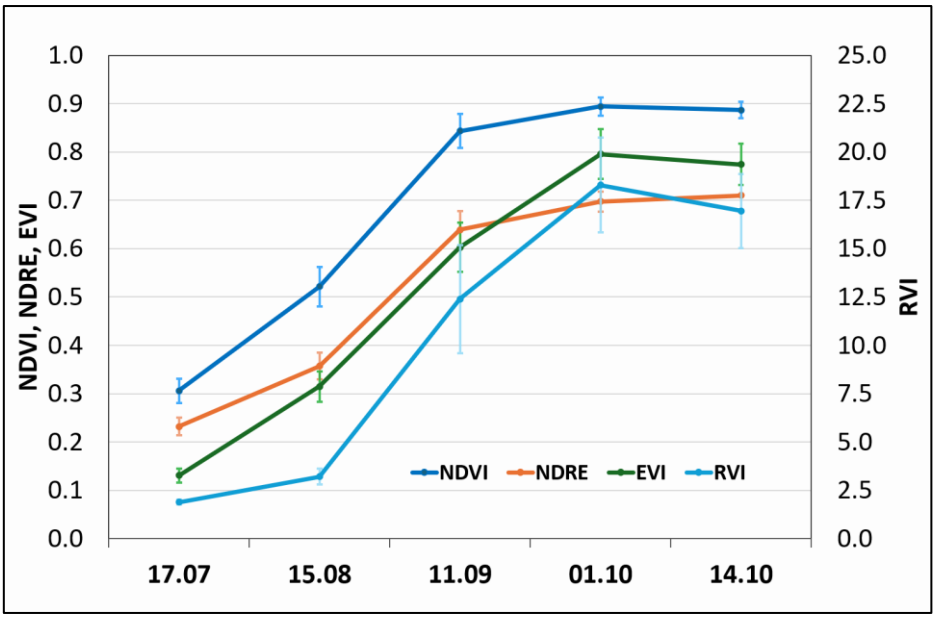


Fig. 8.2 – Andamento temporale dei valori medi degli indici NDVI, NDRE, EVI e RVI nell'appezzamento Junín 01. NDVI, NDRE ed EVI sono rappresentati sull'asse verticale sinistro, mentre RVI è riportato sull'asse verticale destro. Le barre rappresentano ± una deviazione standard (SD) e descrivono la variabilità spaziale dei valori all'interno dell'appezzamento.

Nel complesso, i quattro indici vegetativi hanno evidenziato un marcato incremento dei valori medi durante le prime fasi del ciclo colturale, seguito da una differenziazione degli andamenti nelle acquisizioni più tardive (**Tab. 8.3**; **Fig. 8.2**). Nella prima acquisizione, effettuata il 17 luglio in corrispondenza dell'emergenza e dell'inizio dello sviluppo della

coltura, sono stati registrati valori medi pari a 0,31 per NDVI, 0,23 per NDRE, 0,13 per EVI e 1,89 per RVI. Al successivo rilievo del 15 agosto, corrispondente alla fase di accestimento, tutti gli indici hanno mostrato un incremento, raggiungendo valori medi rispettivamente pari a 0,52, 0,36, 0,31 e 3,21.

L'incremento è risultato particolarmente evidente tra agosto e settembre. Alla data dell'11 settembre, durante la fase di levata, NDVI e NDRE hanno raggiunto valori medi rispettivamente pari a 0,84 e 0,64, mentre EVI è aumentato fino a 0,60 e RVI fino a 12,39. La fase di massimo sviluppo vegetativo, rilevata il 1° ottobre, è stata caratterizzata dai valori medi più elevati di NDVI (0,89), EVI (0,80) e RVI (18,28). Nella stessa data NDRE ha raggiunto un valore medio di 0,70.

Nell'ultima acquisizione, effettuata il 14 ottobre in corrispondenza dell'inizio del riempimento della granella, gli indici hanno mostrato andamenti parzialmente differenti. NDVI è rimasto sostanzialmente stabile, passando da 0,89 a 0,89, mentre EVI e RVI hanno mostrato una moderata riduzione, rispettivamente da 0,80 a 0,77 e da 18,28 a 16,95. L'NDRE, al contrario, ha mantenuto un andamento crescente, seppure di modesta entità, raggiungendo nell'ultima acquisizione il valore medio massimo di 0,71.

Anche la dispersione dei valori intorno alla media ha mostrato variazioni nel corso del ciclo. Per NDVI e NDRE la deviazione standard si è generalmente ridotta nelle acquisizioni più tardive, risultando pari a circa 0,02 per entrambi gli indici nelle fasi di massimo sviluppo vegetativo e inizio del riempimento della granella. L'EVI ha mantenuto una maggiore dispersione, con SD pari a 0,05 l'11 settembre e il 1° ottobre e a 0,04 il 14 ottobre. L'RVI ha invece mostrato la maggiore variabilità assoluta nella fase di levata (SD = 2,79), seguita da una progressiva riduzione nelle due acquisizioni successive (2,45 e 1,91).

Nel complesso, l'andamento temporale evidenzia quindi una fase di rapido incremento di tutti gli indici tra luglio e settembre, seguita dal raggiungimento dei valori massimi o prossimi al massimo all'inizio di ottobre. Nelle fasi successive, NDVI, EVI e RVI tendono a stabilizzarsi o diminuire, mentre NDRE mantiene un lieve incremento fino all'ultima acquisizione.

8.3 **Distribuzione spaziale della resa e degli indici vegetativi**

La rappresentazione cartografica della resa interpolata ha evidenziato una distribuzione spaziale strutturata della produttività all'interno dell'appezzamento Junín 01 (**Fig. 8.3**). Pur in

presenza di una variabilità complessiva relativamente contenuta (CV = 3,78%), la mappa mostra la presenza di aree contigue caratterizzate da differenti livelli di resa.

I valori relativamente più bassi risultano concentrati soprattutto nella porzione sud-orientale dell'appezzamento, dove è riconoscibile un'area estesa e sostanzialmente continua a minore produttività. Ulteriori nuclei caratterizzati da rese inferiori sono presenti nella porzione centro-occidentale e nord-occidentale, in particolare in prossimità e a nord-ovest dell'area non coltivata situata all'interno dell'appezzamento. Le rese relativamente più elevate risultano invece maggiormente rappresentate nella porzione centrale e centro-orientale, oltre che in alcuni settori della parte settentrionale del campo.

Al fine di confrontare visivamente la distribuzione spaziale della resa con la risposta spettrale della coltura, nella **Fig. 8.4** sono riportate le mappe di NDVI, NDRE, EVI e RVI relative all'acquisizione del 1° ottobre 2025, corrispondente alla fase di massimo sviluppo vegetativo e a una delle date nelle quali è stata successivamente osservata la maggiore associazione tra gli indici vegetativi e la resa.

Le mappe dei quattro indici evidenziano una marcata variabilità spaziale all'interno dell'appezzamento e mostrano, pur con differenze tra gli indici, una parziale corrispondenza con la distribuzione spaziale della resa. Tale corrispondenza risulta particolarmente evidente nella porzione sud-orientale, dove i valori relativamente più bassi degli indici coincidono con l'ampia area caratterizzata da minore produttività. Analoghe corrispondenze, sebbene maggiormente frammentate, sono osservabili nella porzione occidentale e nord-occidentale del campo. Le aree caratterizzate da valori relativamente più elevati degli indici risultano invece prevalentemente localizzate nei settori centrali dell'appezzamento, nei quali sono presenti anche valori di resa generalmente superiori.

Il confronto cartografico evidenzia pertanto la presenza di una struttura spaziale parzialmente comune tra la risposta spettrale della coltura rilevata durante il ciclo e la distribuzione della resa finale. Tale confronto ha carattere descrittivo; l'intensità e la significatività dell'associazione tra gli indici vegetativi e la resa sono state successivamente valutate mediante l'analisi di correlazione.

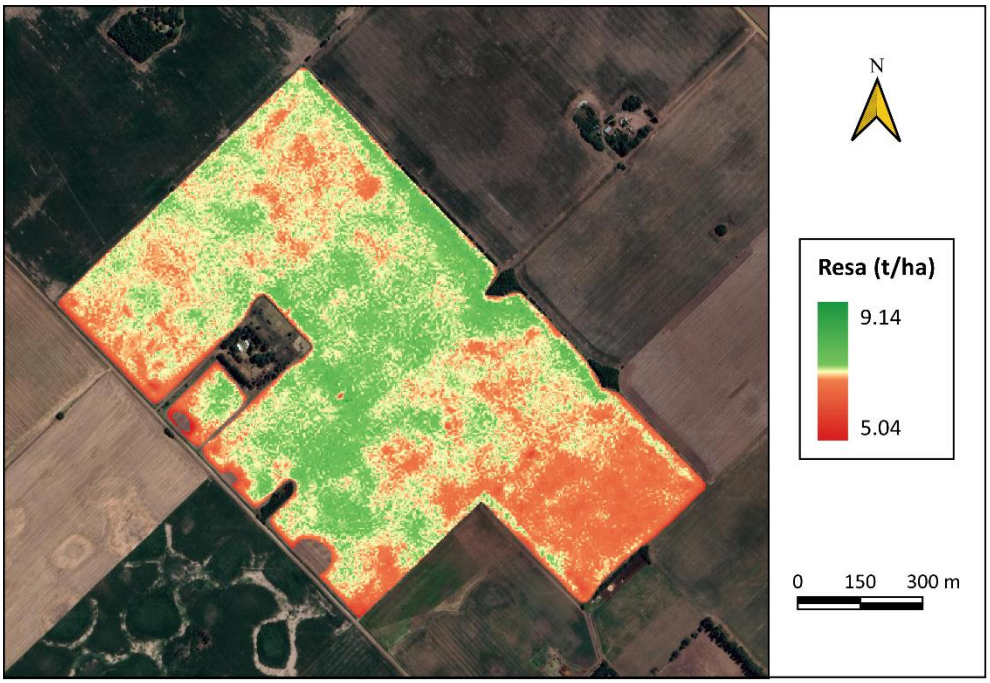


Fig. 8.3 – Distribuzione spaziale della resa interpolata nell'appezzamento Junín 01. I valori di resa sono espressi in t ha^{-1}.



Fig. 8.4 – Distribuzione spaziale degli indici vegetativi NDVI (a), NDRE (b), EVI (c) e RVI (d) nell'appezzamento Junín 01 in corrispondenza dell'acquisizione del 1° ottobre 2025 (fase di massimo sviluppo vegetativo).

8.4 **Relazione tra indici vegetativi e resa**

La relazione tra la resa e gli indici vegetativi nelle diverse date di acquisizione è stata valutata mediante il coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman (ρ). I risultati evidenziano una marcata variazione temporale dell'intensità dell'associazione tra gli indici vegetativi e la resa (**Tab. 8.4**).

Nella prima acquisizione, effettuata il 17 luglio, le correlazioni sono risultate di entità trascurabile per tutti gli indici, con valori di ρ compresi tra −0,029 per EVI e 0,059 per NDVI e RVI. Il 15 agosto è stato osservato un incremento dell'associazione con la resa, con coefficienti molto simili tra i quattro indici e compresi tra 0,440 e 0,449. Un ulteriore aumento dell'intensità delle correlazioni è emerso nell'acquisizione dell'11 settembre, con valori di ρ compresi tra 0,580 e 0,605. In questa data l'EVI ha mostrato il coefficiente più elevato (ρ = 0,605), seguito da NDRE (ρ = 0,590). Le associazioni più elevate sono state osservate nelle acquisizioni di ottobre. Il 1° ottobre tutti gli indici hanno mostrato coefficienti superiori a 0,60, con il valore massimo registrato per NDRE (ρ = 0,667), seguito da EVI (ρ = 0,637), mentre NDVI e RVI hanno mostrato valori pressoché coincidenti (ρ = 0,624). Anche il 14 ottobre le correlazioni sono rimaste di entità analoga, con valori più elevati per NDRE (ρ = 0,654) ed EVI (ρ = 0,652) rispetto a NDVI e RVI (ρ = 0,617).

Tab. 8.4 – Coefficienti di correlazione di Spearman (ρ) tra la resa e gli indici vegetativi NDVI, NDRE, EVI e RVI nelle diverse date di acquisizione nell'appezzamento Junín 01.

Data	NDVI	NDRE	EVI	RVI
17.07	*0,059*	*0,046*	*−0,029*	*0,059*
15.08	*0,441*	*0,449*	*0,44*	*0,44*
11.09	*0,58*	*0,59*	*0,605*	*0,58*
01.10	*0,624*	*0,667*	*0,637*	*0,624*
14.10	*0,617*	*0,654*	*0,652*	*0,617*

ρ, coefficiente di correlazione per ranghi di Spearman. Tutte le correlazioni sono risultate statisticamente significative ($p < 0,05$).

Sebbene tutte le correlazioni siano risultate statisticamente significative ($p < 0,05$), l'entità dei coefficienti è risultata fortemente variabile tra le date. In particolare, i valori prossimi allo zero osservati il 17 luglio indicano associazioni di entità trascurabile, evidenziando come, in presenza dell'elevata numerosità del dataset, la significatività statistica non coincida necessariamente con la rilevanza dell'associazione.

Nel complesso, i risultati mostrano comunque un progressivo rafforzamento dell'associazione tra gli indici vegetativi e la resa nel corso del ciclo colturale, con relazioni molto deboli nella prima acquisizione, di maggiore entità a partire da agosto-settembre e massime nelle acquisizioni di ottobre. Tra gli indici considerati, NDRE ed EVI hanno mostrato i coefficienti di correlazione più elevati nelle fasi più avanzate del ciclo colturale.

8.5 **Individuazione e caratterizzazione delle classi di produttività**

L'analisi di clustering applicata ai dati di resa ha consentito di classificare le unità spaziali dell'appezzamento Junín 01 in gruppi caratterizzati da differenti livelli di produttività. In una prima fase sono state confrontate le soluzioni ottenute considerando due e tre cluster, al fine di valutarne la capacità di rappresentare la variabilità produttiva dell'appezzamento.

La soluzione con k = 2 ha individuato una classe a bassa produttività (Low), costituita da 11.058 celle e caratterizzata da una resa media di 6,848 t ha^{-1}, e una classe ad alta produttività (High), comprendente 15.842 celle, con una resa media di 7,248 t ha^{-1} (**Tab. 8.5**). La variabilità interna alle due classi è risultata contenuta e comparabile, con coefficienti di variazione rispettivamente pari al 2,66 e al 2,49%.

Tab. 8.5 – Statistiche descrittive delle classi di produttività ottenute mediante clustering K-means della resa con k = 2.

Classe di produttività	n	Resa media (t ha^{-1})	SD (t ha^{-1})	CV (%)
Low	*11.058*	*6,848*	*0,182*	*2,66*
High	*15.842*	*7,248*	*0,180*	*2,49*

n, numero di celle; SD, deviazione standard; CV, coefficiente di variazione.

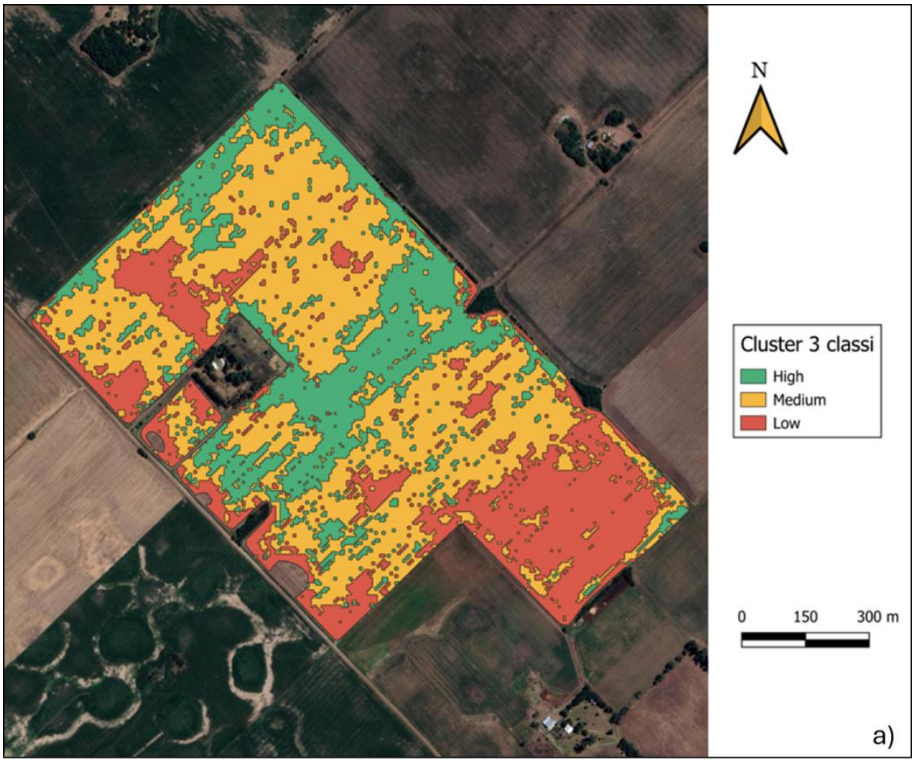
L'adozione di k = 3 ha consentito una maggiore articolazione della variabilità produttiva, distinguendo tre classi caratterizzate da livelli crescenti di resa (**Tab. 8.6**). La classe Low comprendeva 6.631 celle, con una resa media di 6,752 t ha^{-1}; la classe Medium, numericamente prevalente, comprendeva 14.358 celle e presentava una resa media di 7,097 t ha^{-1}; infine, la classe High comprendeva 5.911 celle, con una resa media di 7,422 t ha^{-1}. Le differenze tra le rese medie delle classi Low–Medium e Medium–High erano rispettivamente pari a circa 0,35 e 0,32 t ha^{-1}, mentre tra le due classi estreme la differenza raggiungeva circa 0,67 t ha^{-1}. La classe Medium presentava inoltre la minore variabilità interna (SD = 0,089 t ha^{-1}; CV = 1,25%), rispetto alle classi Low e High, caratterizzate da CV rispettivamente pari al 2,65 e 2,45%.

Tab. 8.6 – Statistiche descrittive delle classi di produttività ottenute mediante clustering K-means della resa con k = 3.

Classe di produttività	n	Resa media (t ha^{-1})	SD (t ha^{-1})	CV (%)
Low	*6.631*	*6,752*	*0,179*	*2,65*
Medium	*14.358*	*7,097*	*0,089*	*1,25*
High	*5.911*	*7,422*	*0,182*	*2,45*

n, numero di celle; SD, deviazione standard; CV, coefficiente di variazione.

La rappresentazione cartografica delle due soluzioni ha evidenziato, in entrambi i casi, una distribuzione spaziale strutturata delle classi di produttività (**Fig. 8.5**). La soluzione con tre cluster ha consentito tuttavia di distinguere, oltre alle aree caratterizzate dai livelli produttivi estremi, una classe intermedia ampiamente rappresentata nell'appezzamento, mantenendo una riconoscibile organizzazione spaziale delle classi.



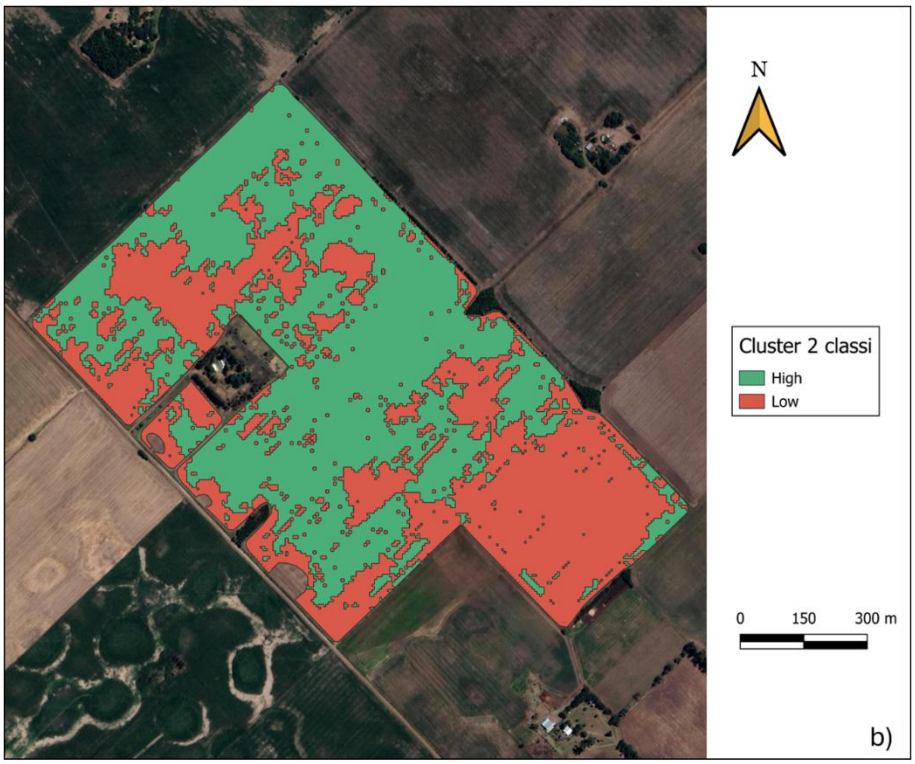


Fig. 8.5 – Distribuzione spaziale delle classi di produttività individuate mediante clustering K-means della resa nell'appezzamento Junín 01, considerando tre (a) e due (b) cluster.

La scelta del numero di cluster è stata ulteriormente supportata dall'Elbow Method. La curva della Sum of Squared Errors (SSE) ha mostrato una marcata riduzione dell'errore nei primi incrementi del numero di cluster, seguita da una progressiva attenuazione del miglioramento, con un punto di flessione individuabile nell'intervallo compreso tra tre e quattro gruppi (**Fig. 8.6**). Considerando congiuntamente l'andamento della SSE, la separazione delle rese medie, la variabilità interna delle classi e la relativa distribuzione spaziale, per le successive analisi è stata adottata la soluzione con k = 3. Le tre classi sono state pertanto identificate come bassa (Low), media (Medium) e alta (High) produttività.

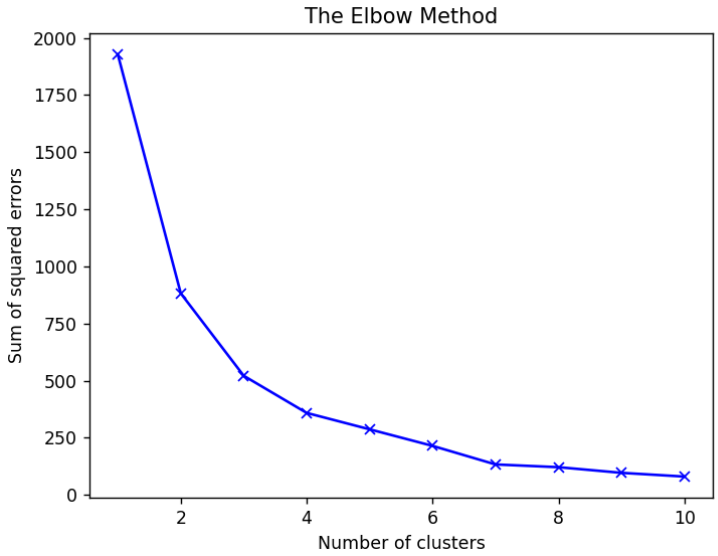


Fig. 8.6 – Andamento della Sum of Squared Errors (SSE) in funzione del numero di cluster secondo l'Elbow Method utilizzato per la selezione del numero di classi di produttività.

L'analisi dell'andamento temporale degli indici vegetativi nelle tre classi di produttività ha evidenziato una progressiva differenziazione della risposta spettrale della coltura nel corso del ciclo (**Fig. 8.7**; **Tab. 8.7**). Nella prima acquisizione, effettuata il 17 luglio, i valori medi di tutti gli indici risultavano molto simili tra le classi Low, Medium e High e non mostravano un gradiente coerente con il livello di produttività finale. Ad esempio, l'NDVI presentava valori medi compresi tra 0,304 e 0,310 e l'NDRE tra 0,231 e 0,235. Anche EVI e RVI mostravano differenze di entità limitata tra le tre classi.

A partire dal 15 agosto è emersa una progressiva differenziazione, con valori generalmente crescenti secondo l'ordine Low < Medium < High. Tale gradiente è diventato più evidente nell'acquisizione dell'11 settembre: l'NDVI aumentava da 0,814 nella classe Low a 0,848 nella Medium e 0,867 nella High; l'NDRE da 0,608 a 0,642 e 0,667; l'EVI da 0,561 a 0,606 e 0,642; l'RVI da 10,229 a 12,501 e 14,550.

La separazione tra le classi produttive è rimasta chiaramente riconoscibile nelle acquisizioni di ottobre. Il 1° ottobre, in corrispondenza della fase di massimo sviluppo vegetativo, i valori medi dell'NDRE erano pari a 0,678, 0,700 e 0,712 rispettivamente nelle classi Low, Medium e High; quelli dell'EVI a 0,749, 0,803 e 0,832, mentre l'RVI aumentava da 16,052 nella classe Low a 18,628 nella Medium e 19,950 nella High. Anche nell'acquisizione del 14 ottobre è stato mantenuto, per tutti gli indici, il gradiente Low < Medium < High.

Nel complesso, i risultati evidenziano quindi che le differenze nella risposta degli indici vegetativi tra le aree caratterizzate da diversa produttività finale, scarsamente riconoscibili nella prima acquisizione, diventano riconoscibili a partire dalla metà del ciclo colturale e si mantengono tali nelle acquisizioni successive.

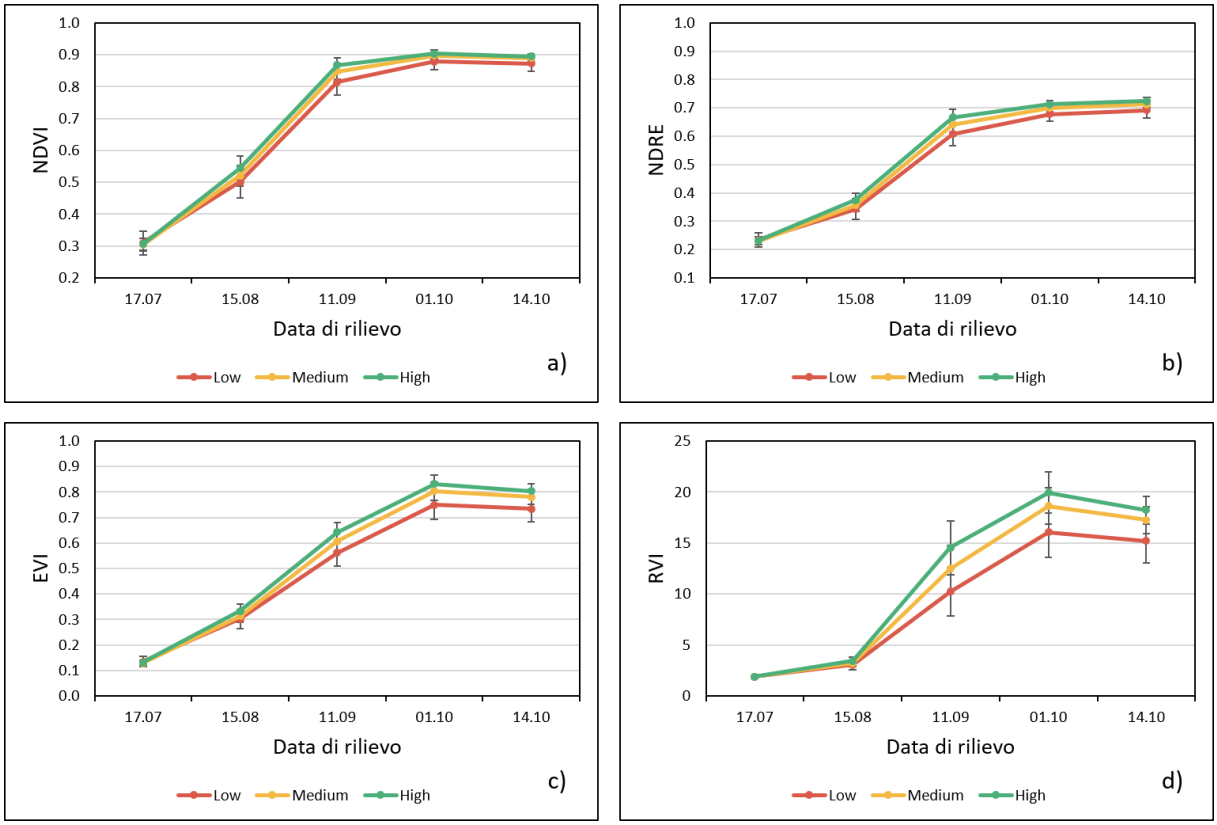


Fig. 8.7 – Andamento temporale dei valori medi degli indici NDVI (a), NDRE (b), EVI (c) e RVI (d) nelle zone a bassa (Low), media (Medium) e alta (High) produttività individuate nell'appezzamento Junín 01. Le barre rappresentano ± deviazione standard.

Tab. 8.7 – Valori medi (± deviazione standard) degli indici NDVI, NDRE, EVI e RVI nelle classi a bassa (Low), media (Medium) e alta (High) produttività dell'appezzamento Junín 01 nelle diverse date di acquisizione.

VI	Zona produttiva	Data				
		17.07	15.08	11.09	01.10	14.10
NDVI	Low	*0,310 ± 0,037*	*0,501 ± 0,049*	*0,814 ± 0,040*	*0,879 ± 0,025*	*0,873 ± 0,025*
	Medium	*0,304 ± 0,020*	*0,521 ± 0,032*	*0,848 ± 0,025*	*0,897 ± 0,012*	*0,890 ± 0,009*
	High	*0,306 ± 0,019*	*0,545 ± 0,037*	*0,867 ± 0,024*	*0,903 ± 0,012*	*0,895 ± 0,008*
NDRE	Low	*0,235 ± 0,025*	*0,343 ± 0,035*	*0,608 ± 0,041*	*0,678 ± 0,025*	*0,692 ± 0,028*
	Medium	*0,231 ± 0,015*	*0,357 ± 0,022*	*0,642 ± 0,028*	*0,700 ± 0,014*	*0,713 ± 0,012*
	High	*0,232 ± 0,014*	*0,374 ± 0,025*	*0,667 ± 0,027*	*0,712 ± 0,014*	*0,724 ± 0,012*
EVI	Low	*0,135 ± 0,020*	*0,302 ± 0,037*	*0,561 ± 0,051*	*0,749 ± 0,056*	*0,734 ± 0,051*
	Medium	*0,129 ± 0,012*	*0,313 ± 0,025*	*0,606 ± 0,039*	*0,803 ± 0,036*	*0,781 ± 0,029*
	High	*0,131 ± 0,010*	*0,333 ± 0,028*	*0,642 ± 0,039*	*0,832 ± 0,035*	*0,804 ± 0,027*
RVI	Low	*1,910 ± 0,178*	*3,059 ± 0,479*	*10,229 ± 2,376*	*16,052 ± 2,434*	*15,191 ± 2,109*
	Medium	*1,877 ± 0,096*	*3,195 ± 0,308*	*12,501 ± 2,238*	*18,628 ± 1,805*	*17,243 ± 1,353*
	High	*1,885 ± 0,084*	*3,433 ± 0,401*	*14,546 ± 2,636*	*19,949 ± 2,023*	*18,215 ± 1,370*

Il test di Kruskal–Wallis ha evidenziato differenze statisticamente significative tra le tre classi produttive per tutti gli indici e in tutte le date considerate ($p < 0,001$). Tuttavia, considerata l'elevata numerosità del dataset, la sola significatività statistica non consente di valutare l'effettiva entità delle differenze osservate. Per tale motivo, i risultati sono stati interpretati congiuntamente alla dimensione dell'effetto (ε^2), che ha mostrato una marcata variazione nel corso del ciclo colturale (**Tab. 8.8**).

Nella prima acquisizione del 17 luglio, ε^2 è risultato molto contenuto per tutti gli indici, con valori pari a 0,005 per NDVI e RVI, 0,003 per NDRE e 0,021 per EVI. Pertanto, nonostante la significatività statistica del test, l'entità delle differenze tra le tre classi produttive era molto limitata, in accordo con la sostanziale sovrapposizione dei valori osservata nella **Fig. 8.7**.

Il 15 agosto la dimensione dell'effetto è aumentata sensibilmente e in modo analogo per tutti gli indici, raggiungendo valori compresi tra 0,172 e 0,180. Un ulteriore incremento è stato osservato l'11 settembre, quando ε^2 variava da 0,289 per NDVI e RVI a 0,311 per EVI, evidenziando una maggiore differenziazione degli indici tra le tre classi di produttività.

I valori più elevati sono stati registrati nelle acquisizioni di ottobre. Il 1° ottobre l'NDRE ha presentato la maggiore dimensione dell'effetto ($\varepsilon^2 = 0,383$), seguito da EVI (0,344) e da NDVI e RVI (entrambi 0,337). Il 14 ottobre la capacità discriminante è rimasta elevata, con ε^2 pari a 0,368 per NDRE, 0,362 per EVI e 0,331 per NDVI e RVI.

Tab. 8.8 – Dimensione dell'effetto (ε^2) associata al test di Kruskal–Wallis per il confronto dei valori di NDVI, NDRE, EVI e RVI tra le zone a bassa, media e alta produttività dell'appezzamento Junín 01 nelle diverse date di acquisizione.

Data	NDVI ε^2	NDRE ε^2	EVI ε^2	RVI ε^2
17-lug	*0,005*	*0,003*	*0,021*	*0,005*
15-ago	*0,174*	*0,180*	*0,172*	*0,174*
11-set	*0,289*	*0,297*	*0,311*	*0,289*
01-ott	*0,337*	***0,383***	*0,344*	*0,337*
14-ott	*0,331*	***0,368***	*0,362*	*0,331*

Nel complesso, l'analisi evidenzia un progressivo aumento della capacità degli indici vegetativi di discriminare le classi caratterizzate da differente produttività finale, con differenze di entità trascurabile nella prima acquisizione e progressivamente maggiori a partire da agosto-settembre. La maggiore separazione tra le classi è stata osservata nelle acquisizioni di ottobre, con NDRE ed EVI caratterizzati dai valori più elevati di ε^2.

8.6 **Stima della resa mediante gli indici vegetativi**

Sulla base dei risultati ottenuti nelle precedenti analisi di correlazione e nella valutazione della capacità degli indici vegetativi di discriminare le classi di produttività, l'analisi della relazione quantitativa con la resa è stata approfondita per gli indici NDRE ed EVI, considerando le acquisizioni dell'11 settembre e del 1° ottobre. Tali combinazioni sono state selezionate in quanto caratterizzate da coefficienti di correlazione relativamente elevati con la resa e da una marcata capacità di differenziare le classi Low, Medium e High.

Per ciascuna combinazione indice × data è stato sviluppato un modello di regressione lineare semplice, assumendo la resa come variabile dipendente e il valore dell'indice vegetativo come variabile indipendente. Tutti i modelli sono risultati statisticamente significativi ($p < 0,001$), con coefficienti di determinazione compresi tra 0,331 e 0,373 (**Tab. 8.9**). Tali valori indicano che i singoli indici considerati erano in grado di spiegare circa il 33–37% della variabilità osservata della resa.

Il modello basato sull'NDRE dell'11 settembre ha mostrato un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0,331$ e un errore standard della stima (SEE) di 0,219 t ha^{-1}. Nella stessa data, l'EVI ha fornito una capacità esplicativa leggermente superiore, con $R^2 = 0,345$ e SEE pari a 0,217 t ha^{-1}.

Nell'acquisizione del 1° ottobre entrambi gli indici hanno mostrato prestazioni migliori rispetto all'11 settembre. L'EVI ha raggiunto $R^2 = 0{,}363$, con SEE pari a 0,214 t ha^{-1}, mentre il modello basato sull'NDRE ha presentato il valore di R^2 più elevato tra quelli analizzati ($R^2 = 0{,}373$) e il SEE più contenuto (0,212 t ha^{-1}).

Tab. 8.9 – Parametri dei modelli di regressione lineare semplice tra resa e indici vegetativi NDRE ed EVI nelle date selezionate nell'appezzamento Junín 01.

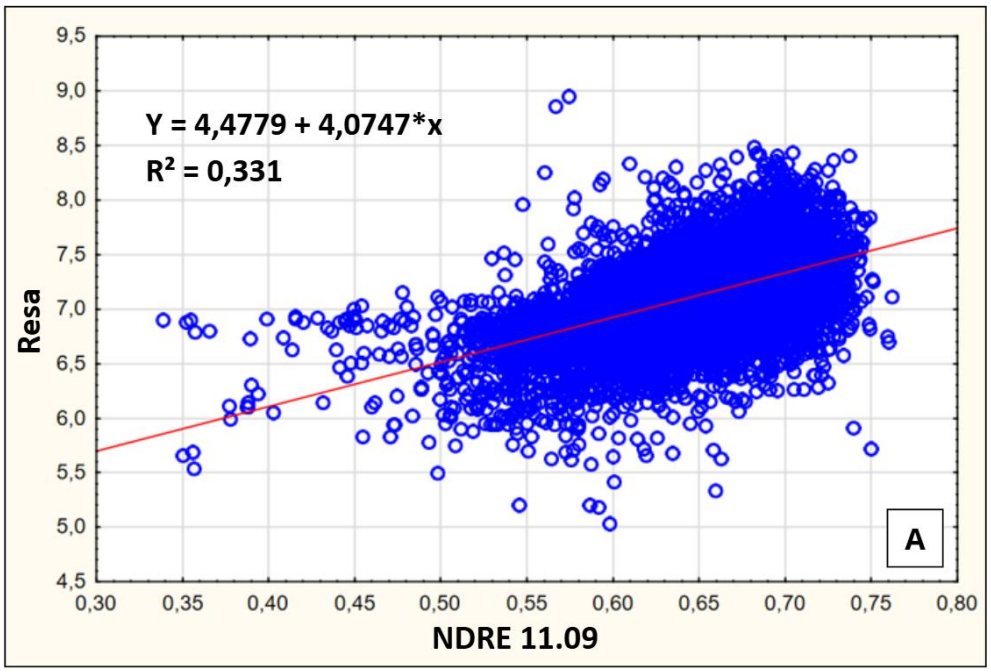
Indice	Data	R^2	SEE (t ha^{-1})	Intercetta (β_0)	Coefficiente (β_1)	p
NDRE	11-set	*0,331*	*0,219*	*4,478*	*4,075*	*<0,001*
	01-ott	*0,373*	*0,212*	*1,631*	*7,819*	*<0,001*
EVI	11-set	*0,345*	*0,217*	*5,211*	*3,106*	*<0,001*
	01-ott	*0,363*	*0,214*	*4,563*	*3,166*	*<0,001*

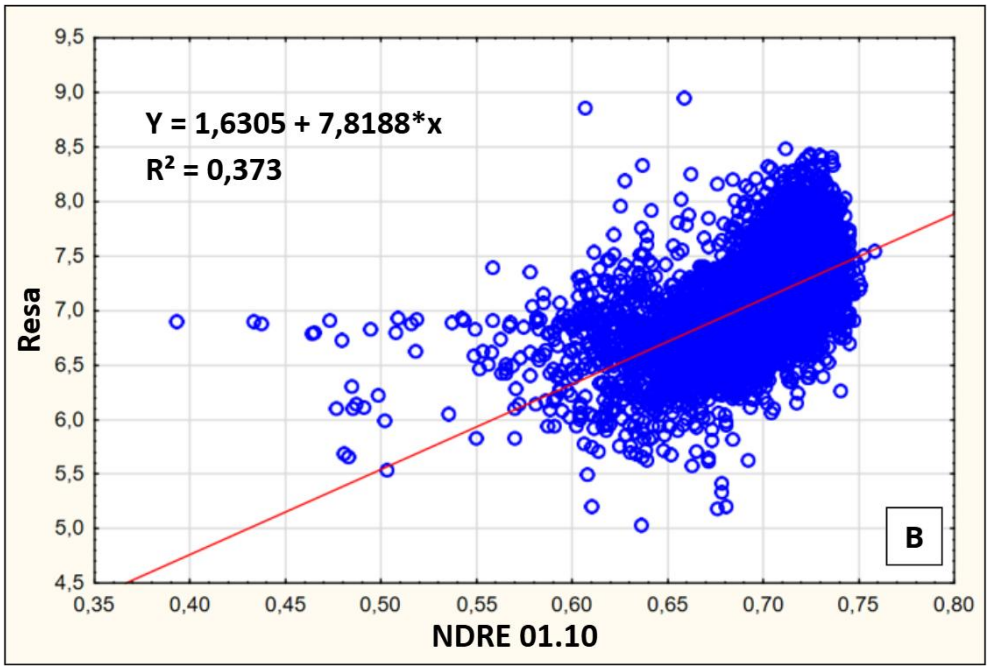
R^2, coefficiente di determinazione; SEE, errore standard della stima (*Standard Error of Estimate*); β_0, intercetta; β_1, coefficiente di regressione. La resa è espressa in t ha^{-1}.

Tra i modelli considerati, quello basato sull'NDRE del 1° ottobre ha quindi fornito la migliore capacità di descrivere la variabilità della resa, secondo la relazione:

$$Resa = 1{,}631 + 7{,}819 \times NDRE$$

La rappresentazione degli scatterplot e delle rispettive rette di regressione conferma, per tutte le combinazioni considerate, una relazione positiva tra gli indici vegetativi e la resa (**Fig. 8.8**). La dispersione dei punti attorno alle rette evidenzia tuttavia una variabilità residua non trascurabile, coerente con i valori moderati di R^2 ottenuti.


Y = 4,4779 + 4,0747*x
R² = 0,331
Resa
NDRE 11.09
A
9,5
9,0
8,5
8,0
7,5
7,0
6,5
6,0
5,5
5,0
4,5
0,30
0,35
0,40
0,45
0,50
0,55
0,60
0,65
0,70
0,75
0,80


Y = 1,6305 + 7,8188*x
R² = 0,373
Resa
NDRE 01.10
B
9,5
9,0
8,5
8,0
7,5
7,0
6,5
6,0
5,5
5,0
4,5
0,35
0,40
0,45
0,50
0,55
0,60
0,65
0,70
0,75
0,80

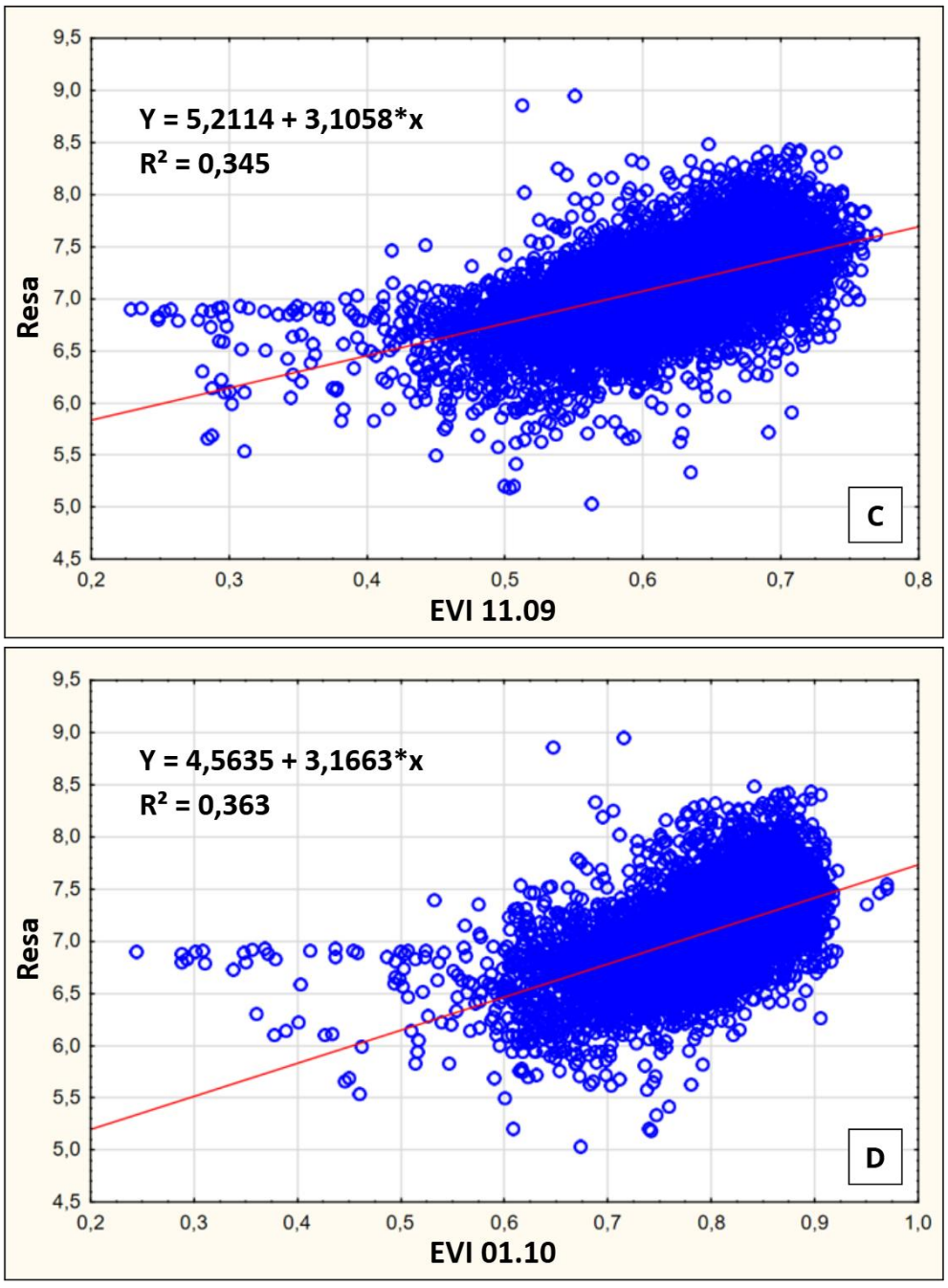


Fig. 8.8 – Relazione tra la resa e gli indici vegetativi NDRE ed EVI nelle acquisizioni dell'11 settembre e del 1° ottobre nell'appezzamento Junín 01. Sono riportati gli scatterplot relativi a NDRE dell'11 settembre (A), NDRE del 1° ottobre (B), EVI dell'11 settembre (C) ed EVI del 1° ottobre (D). Le linee indicano i modelli di regressione lineare semplice utilizzati per la stima della resa. Per ciascun modello sono riportati l'equazione di regressione e il coefficiente di determinazione (R^2). La resa è espressa in t ha^{-1}.

Nel complesso, i risultati indicano che NDRE ed EVI, in particolare nell'acquisizione del 1° ottobre, presentano una significativa capacità di descrivere una parte della variabilità spaziale della resa, pur lasciando una quota rilevante della variabilità non spiegata dai modelli univariati.

Capitolo 9
DISCUSSIONE

Il presente studio ha analizzato la relazione tra la risposta spettrale della coltura, descritta mediante gli indici vegetativi NDVI, NDRE, EVI e RVI derivati da immagini PlanetScope SuperDove, e la variabilità spaziale della resa di frumento nell'appezzamento Junín 01. L'analisi multitemporale ha consentito di valutare come tale relazione si modifichi durante il ciclo colturale e di verificare la capacità dei diversi indici di discriminare aree caratterizzate da differenti livelli di produttività finale.

9.1 **Andamento meteorologico e sviluppo della coltura**

L'annata agraria 2025/2026 è stata caratterizzata da una buona disponibilità idrica durante gran parte del ciclo colturale. In particolare, tra luglio e ottobre le precipitazioni sono risultate generalmente superiori alle corrispondenti medie storiche, mentre le temperature medie mensili si sono mantenute prossime o leggermente superiori ai valori di riferimento. Tali condizioni possono avere favorito lo sviluppo vegetativo della coltura e contribuito al raggiungimento di livelli produttivi complessivamente elevati.

La disponibilità idrica assume particolare rilevanza nel frumento poiché influenza lo sviluppo della superficie fogliare, l'accumulo di biomassa e, in generale le componenti della resa. Nel caso in esame, l'elevata disponibilità idrica durante le fasi di accestimento e levata può avere favorito il progressivo sviluppo della copertura vegetale osservato attraverso gli indici satellitari. Tale interpretazione deve tuttavia essere considerata con cautela, poiché nello studio non sono state effettuate misure dirette dello stato idrico della coltura o della biomassa.

Le frequenti precipitazioni potrebbero avere determinato anche condizioni di elevata umidità favorevoli allo sviluppo di patologie fungine, rendendo particolarmente importante la gestione fitosanitaria. Questo aspetto assume rilievo nell'interpretazione dei risultati poiché lo stato sanitario della vegetazione rappresenta uno dei fattori in grado di modificare sia la risposta spettrale della coltura sia la resa finale.

9.2 **Dinamica temporale degli indici vegetativi**

I quattro indici hanno mostrato un andamento temporale complessivamente coerente con il progressivo sviluppo della coltura. Nelle prime acquisizioni i valori erano relativamente contenuti, mentre un marcato incremento è stato osservato tra agosto e settembre, fino al raggiungimento dei valori massimi o prossimi al massimo nelle acquisizioni di ottobre.

NDVI, EVI e RVI hanno raggiunto i valori medi più elevati il 1° ottobre, corrispondente alla fase di massimo sviluppo vegetativo/foglia bandiera, mostrando successivamente una lieve riduzione nell'acquisizione del 14 ottobre. L'NDRE ha presentato invece un andamento leggermente differente, mantenendo un incremento fino all'ultima acquisizione. Tali differenze sono riconducibili alle diverse regioni spettrali utilizzate nella formulazione degli indici e alla loro differente risposta all'aumento della copertura vegetale.

L'NDVI è uno degli indici maggiormente utilizzati per il monitoraggio della vegetazione, ma la sua risposta tende a ridursi in sensibilità in presenza di coperture dense e valori elevati di LAI. Gli indici che utilizzano la regione Red Edge, tra cui NDRE, mantengono invece una maggiore sensibilità alle variazioni del contenuto di clorofilla e della struttura della vegetazione in condizioni di elevata copertura. Tale comportamento è coerente con quanto riportato da Dong et al. (2019) e Li et al. (2025), che evidenziano le potenzialità degli indici Red Edge nella caratterizzazione delle colture ad elevato sviluppo vegetativo. La letteratura citata identifica infatti la Red Edge come particolarmente sensibile a clorofilla, LAI e biomassa in condizioni nelle quali l'NDVI presenta maggiori problemi di saturazione.

L'EVI presenta caratteristiche differenti: la sua formulazione comprende termini correttivi finalizzati a ridurre l'influenza del background del suolo e degli effetti atmosferici e a mantenere una maggiore sensibilità alle variazioni della vegetazione in condizioni di elevata biomassa (Huete et al., 2002). Il comportamento osservato nel presente studio, con un incremento marcato fino al 1° ottobre e una lieve diminuzione successiva, risulta pertanto coerente con la capacità dell'indice di descrivere le variazioni della struttura della chioma durante le fasi di maggiore sviluppo.

L'RVI ha mostrato un andamento analogo a quello dell'NDVI, ma una maggiore variabilità relativa in alcune fasi del ciclo. Questo comportamento non deve essere interpretato come una minore precisione dell'indice. L'RVI è infatti espresso come rapporto diretto tra la riflettanza nel vicino infrarosso e quella nella banda del rosso e, diversamente dagli indici normalizzati, non presenta un intervallo di variazione limitato. Con l'aumento della copertura vegetale e la conseguente diminuzione della riflettanza nel rosso, variazioni relativamente

contenute della risposta spettrale possono pertanto tradursi in differenze numeriche più ampie dell'indice (Jackson & Huete, 1991; Tucker, 1979).

9.3 **Variabilità spaziale e relazione tra indici vegetativi e resa**

La mappa di resa ha evidenziato, nonostante una variabilità complessiva relativamente contenuta, una struttura spaziale riconoscibile della produttività all'interno dell'appezzamento. La distribuzione spaziale della resa sembra presentare una certa corrispondenza con la variabilità micro-topografica dell'appezzamento. Dall'analisi del DEM emerge infatti la presenza di settori relativamente più depressi, potenzialmente caratterizzati da una minore capacità di drenaggio e da una maggiore predisposizione alla formazione di ristagni idrici temporanei. Considerando le precipitazioni superiori alla media registrate nell'annata agraria 2025/2026, soprattutto nei mesi di agosto e ottobre, è possibile che le differenze nel drenaggio e nella disponibilità di ossigeno nel profilo del suolo abbiano contribuito all'espressione della variabilità produttiva osservata. Tuttavia, la distribuzione della resa suggerisce che la topografia non rappresenti l'unico fattore esplicativo. È probabile che intervengano anche differenze legate alle caratteristiche pedologiche locali e al comportamento idrico dei diversi ambienti presenti all'interno dell'appezzamento. Il confronto con le mappe degli indici vegetativi del 1° ottobre ha mostrato una parziale corrispondenza tra i settori caratterizzati da valori inferiori degli indici e le aree nelle quali alla raccolta sono state osservate rese relativamente più basse.

Il confronto delle mappe, pur non consentendo da solo di quantificare la relazione tra le variabili, suggerisce quindi che parte della variabilità produttiva finale fosse già riconoscibile nella risposta spettrale della coltura prima della raccolta. Tale risultato è coerente con il principio alla base dell'impiego del telerilevamento per la caratterizzazione della variabilità intra-appezzamento: differenze nello sviluppo, nel vigore e nello stato fisiologico della vegetazione possono infatti riflettere condizioni ambientali e agronomiche che successivamente si traducono in differenti livelli produttivi.

Le analisi di correlazione hanno confermato quantitativamente questa relazione, evidenziando soprattutto una marcata componente temporale. Il 17 luglio i coefficienti di Spearman erano prossimi allo zero per tutti gli indici, mentre l'intensità dell'associazione è progressivamente aumentata nelle acquisizioni successive, raggiungendo i valori più elevati in ottobre. Il massimo coefficiente è stato osservato per NDRE il 1° ottobre ($\rho = 0{,}667$), seguito

da EVI ($\rho = 0{,}637$). Il 14 ottobre NDRE ed EVI hanno mantenuto le associazioni più elevate, con valori rispettivamente pari a 0,654 e 0,652.

Un aspetto metodologico importante riguarda la distinzione tra significatività statistica ed entità dell'associazione. Tutte le correlazioni sono risultate statisticamente significative, comprese quelle del 17 luglio, nonostante coefficienti compresi tra −0,029 e 0,059. La numerosità molto elevata del dataset aumenta infatti la potenza statistica dei test, rendendo possibile ottenere valori significativi anche in presenza di associazioni di entità trascurabile. Di conseguenza, nel presente studio l'interpretazione dei risultati deve essere basata soprattutto sull'entità del coefficiente ρ e sulla sua evoluzione temporale, più che sulla sola significatività statistica.

9.4 **Capacità degli indici vegetativi di discriminare le classi di produttività**

L'analisi delle classi Low, Medium e High, definite tramite cluster analysis applicata alla resa finale, fornisce un'ulteriore conferma della relazione tra risposta spettrale e produttività. Questo approccio presenta particolare interesse perché gli indici vegetativi non sono stati utilizzati per costruire le classi, ma sono stati successivamente confrontati tra aree caratterizzate da differenti livelli produttivi.

Nella prima acquisizione del 17 luglio i valori dei quattro indici risultavano molto simili nelle tre classi di resa e non presentavano un gradiente coerente con la produttività finale. A partire dal 15 agosto è invece emersa una progressiva separazione, divenuta particolarmente evidente dall'11 settembre, con valori generalmente ordinati secondo il gradiente Low < Medium < High. La differenziazione si è mantenuta e ulteriormente accentuata nelle acquisizioni di ottobre.

La dimensione dell'effetto associata al test di Kruskal–Wallis ha consentito di quantificare tale evoluzione. I valori di ε^2 erano prossimi allo zero il 17 luglio, aumentavano fino a circa 0,17–0,18 il 15 agosto e raggiungevano valori prossimi o superiori a 0,30 dall'11 settembre. I valori massimi sono stati osservati in ottobre, in particolare per NDRE ($\varepsilon^2 = 0{,}383$ il 1° ottobre e 0,368 il 14 ottobre) ed EVI (rispettivamente 0,344 e 0,362). Anche in questo caso, quindi, la sola significatività del test di Kruskal–Wallis, risultata sempre molto elevata, sarebbe stata poco informativa senza la valutazione della dimensione dell'effetto.

La convergenza dei risultati ottenuti mediante analisi differenti costituisce un elemento rilevante dello studio. Sia i coefficienti di Spearman sia ε^2 mostrano infatti una relazione molto

debole nelle prime fasi colturali e un progressivo rafforzamento con l'avanzare del ciclo. Ciò indica che la capacità degli indici vegetativi di identificare durante la stagione le aree destinate a differenti livelli di produttività finale aumenta progressivamente con lo sviluppo della coltura, risultando particolarmente evidente nelle fasi comprese tra levata e massimo sviluppo vegetativo.

9.5 **Differenze tra gli indici e ruolo di NDRE ed EVI**

Nel complesso, NDRE ed EVI sono risultati gli indici maggiormente associati alla variabilità produttiva nelle fasi più avanzate del ciclo, sebbene le differenze rispetto agli altri indici non siano sempre elevate.

Le migliori prestazioni dei due indici non devono tuttavia essere ricondotte allo stesso meccanismo. L'EVI è stato specificamente formulato introducendo termini correttivi finalizzati a ridurre l'influenza del suolo e dell'atmosfera e a migliorare la sensibilità in presenza di elevate quantità di biomassa (Huete et al., 2002). L'NDRE, invece, deriva dalla sostituzione della banda del rosso con quella Red Edge nella formulazione di un indice normalizzato. La regione Red Edge presenta una particolare sensibilità alle variazioni del contenuto di clorofilla e delle caratteristiche della chioma e può mantenere una maggiore capacità discriminante in condizioni nelle quali gli indici basati sul rosso tendono alla saturazione (Dong et al., 2019; Li et al., 2025).

I risultati ottenuti risultano pertanto coerenti con la letteratura disponibile e indicano un particolare interesse degli indici basati sulla Red Edge per il monitoraggio del frumento nelle fasi di elevata copertura vegetale. La disponibilità della banda Red Edge nei sensori SuperDove rappresenta, in questo senso, un elemento di particolare interesse della piattaforma PlanetScope, che associa tale informazione spettrale a una risoluzione spaziale elevata.

È tuttavia opportuno sottolineare che nel presente studio non sono state effettuate misure dirette di LAI, biomassa o contenuto di clorofilla. L'eventuale relazione tra il comportamento degli indici e tali parametri biofisici rappresenta quindi un'interpretazione supportata dalla letteratura e non una relazione direttamente verificata sperimentalmente.

9.6 **Relazione quantitativa tra indici vegetativi e resa**

Le regressioni lineari semplici sviluppate per NDRE ed EVI nelle acquisizioni dell'11 settembre e del 1° ottobre hanno consentito di approfondire quantitativamente la relazione tra risposta spettrale e produzione finale. Tutti i modelli hanno mostrato una relazione positiva e

statisticamente significativa con la resa, con coefficienti di determinazione compresi tra 0,331 e 0,373.

I modelli relativi al 1° ottobre hanno fornito risultati leggermente migliori rispetto a quelli dell'11 settembre. In particolare, il modello basato sull'NDRE ha raggiunto $R^2 = 0,373$, con SEE pari a 0,212 t ha^{-1}, mentre per EVI sono stati ottenuti $R^2 = 0,363$ e SEE = 0,214 t ha^{-1}.

Tali valori indicano che un singolo indice vegetativo è in grado di descrivere circa un terzo della variabilità osservata della resa. Si tratta di una relazione di interesse agronomico, ma al tempo stesso evidenzia come una quota maggioritaria della variabilità produttiva non sia spiegata dai modelli univariati. La resa è infatti il risultato dell'interazione di numerosi fattori, tra cui caratteristiche fisiche e chimiche del suolo, disponibilità idrica e nutrizionale, microtopografia, stato sanitario della coltura e condizioni meteorologiche durante il ciclo.

Un elemento applicativo di interesse è rappresentato dal fatto che le associazioni più elevate e i migliori risultati delle regressioni sono stati ottenuti nell'acquisizione del 1° ottobre, circa due mesi prima della raccolta del 16 dicembre. Ciò indica che in tale fase la risposta spettrale della coltura conteneva già informazioni associate alla successiva distribuzione spaziale della resa. Non è tuttavia possibile, sulla base del presente studio, affermare che i modelli sviluppati possiedano una capacità predittiva generalizzabile, poiché sono stati costruiti e valutati sul medesimo dataset e non sottoposti a validazione indipendente.

9.7 **Limiti dello studio e prospettive di approfondimento**

I risultati devono essere interpretati considerando alcuni limiti della sperimentazione. In primo luogo, l'analisi interessa un singolo appezzamento e una sola annata agraria. Non è pertanto possibile stabilire se le relazioni osservate tra indici vegetativi e resa siano stabili in condizioni meteorologiche differenti, in altri appezzamenti o in presenza di differenti caratteristiche pedologiche e gestionali.

Un secondo elemento riguarda la natura spaziale del dataset. Le 26.900 celle utilizzate nelle analisi non rappresentano osservazioni completamente indipendenti, poiché unità spazialmente contigue possono presentare caratteristiche simili. La possibile autocorrelazione spaziale, non quantificata specificamente, rappresenta pertanto un elemento da considerare nell'interpretazione dell'elevata significatività statistica dei test.

Anche la mappa di resa deriva dall'interpolazione delle acquisizioni puntuali effettuate durante la raccolta. Tale procedura, necessaria per ottenere una superficie continua e

confrontabile con i dati satellitari, introduce inevitabilmente una componente di generalizzazione spaziale.

Infine, l'impiego di regressioni univariate consente di valutare il contributo dei singoli indici, ma non considera l'effetto congiunto delle diverse informazioni disponibili. Studi recenti hanno evidenziato come l'integrazione di dati satellitari multitemporali con variabili meteorologiche, topografiche e ambientali possa migliorare la stima della resa del frumento. In particolare, Farmonov et al. (2023) hanno combinato immagini PlanetScope e Sentinel-2 con informazioni ambientali nell'ambito di modelli di stima della resa, evidenziando le potenzialità degli approcci multivariati. Tale studio è già presente nella bibliografia della tesi ed è direttamente pertinente a questo possibile sviluppo.

Una prima prosecuzione del presente lavoro potrebbe quindi riguardare l'estensione dell'analisi all'appezzamento Junín 02 e, successivamente, a più annate agrarie, verificando la stabilità delle relazioni individuate. L'integrazione dei dati PlanetScope con immagini Sentinel-2 consentirebbe inoltre di valutare il compromesso tra risoluzione spaziale, disponibilità temporale e costo dei dati. In una fase successiva, l'impiego di serie multitemporali, informazioni pedologiche, topografiche e meteorologiche e modelli multivariati o di machine learning potrebbe consentire di sviluppare strumenti di stima della resa più robusti e trasferibili.

Capitolo 10
CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha consentito di valutare le potenzialità dell'integrazione tra immagini satellitari multispettrali ad elevata risoluzione e dati di resa georeferenziati per la caratterizzazione della variabilità produttiva intra-appezzamento del frumento nell'area di Junín.

I risultati hanno evidenziato una forte componente temporale nella relazione tra indici vegetativi e resa. Nelle prime fasi del ciclo gli indici mostravano associazioni molto deboli con la produttività finale e una capacità pressoché trascurabile di discriminare le classi Low, Medium e High. Con l'avanzare dello sviluppo della coltura tali relazioni si sono progressivamente rafforzate, raggiungendo la maggiore intensità nelle acquisizioni di ottobre.

Tra gli indici analizzati, NDRE ed EVI hanno mostrato complessivamente le migliori prestazioni nelle fasi di maggiore sviluppo vegetativo. L'NDRE del 1° ottobre ha presentato il coefficiente di correlazione più elevato con la resa ($\rho = 0{,}667$), la maggiore dimensione dell'effetto nel confronto tra le classi produttive ($\varepsilon^2 = 0{,}383$) e il valore più elevato di R^2 tra i modelli di regressione considerati ($R^2 = 0{,}373$). Tali risultati evidenziano il particolare interesse della banda Red Edge per il monitoraggio del frumento in condizioni di elevata copertura vegetale.

La classificazione della resa in tre livelli di produttività ha inoltre mostrato come, con l'avanzamento del ciclo colturale, sia aumentata la capacità degli indici vegetativi di discriminare le classi caratterizzate da diversa produttività finale, come evidenziato dall'incremento di ε^2, che ha raggiunto i valori più elevati nelle acquisizioni di ottobre. Questo risultato conferma l'utilità delle informazioni satellitari non soltanto per descrivere lo stato medio della coltura, ma anche per caratterizzarne la variabilità spaziale intra-appezzamento, elemento fondamentale per le applicazioni di AdP.

Le regressioni lineari hanno tuttavia evidenziato una capacità esplicativa moderata. Gli indici vegetativi, considerati singolarmente, non possono quindi descrivere l'intera complessità dei fattori che determinano la resa. Inoltre, il carattere annuale e legato a un solo appezzamento

di studio, sebbene di elevate dimensioni, dello studio e l'assenza di una validazione indipendente non consentono di generalizzare i modelli ottenuti né di attribuire loro, allo stato attuale, una vera capacità predittiva.

Nel complesso, lo studio evidenzia quindi le potenzialità delle immagini PlanetScope SuperDove, e in particolare delle informazioni associate alla banda Red Edge, per il monitoraggio ad elevata risoluzione della variabilità produttiva del frumento. I risultati costituiscono una base per ulteriori approfondimenti che includano più appezzamenti e annate, serie satellitari multitemporali e informazioni pedologiche, topografiche e meteorologiche. L'estensione dell'analisi a Junín 02, il confronto tra PlanetScope e Sentinel-2 e lo sviluppo di modelli multivariati rappresentano, in particolare, le prosecuzioni più immediate del lavoro.

In una prospettiva più ampia, i risultati ottenuti assumono particolare interesse nel contesto dei sistemi cerealicoli estensivi della regione pampeana, caratterizzati da un elevato livello di meccanizzazione e da una progressiva diffusione delle tecnologie digitali e dell'AdP. In tali sistemi, la crescente disponibilità di informazioni georeferenziate acquisite durante le normali operazioni colturali, quali i dati registrati dai sistemi di monitoraggio della resa installati sulle mietitrebbie, può essere efficacemente integrata con le osservazioni satellitari, trasformando dati già disponibili a livello aziendale in informazioni utili per la caratterizzazione della variabilità intra-appezzamento e per il supporto alla gestione sito-specifica delle colture.

In questa direzione, il superamento delle relazioni basate su singoli indici e singole date di acquisizione rappresenta uno degli sviluppi più promettenti. L'integrazione di serie satellitari multitemporali con informazioni climatiche, pedologiche e topografiche, eventualmente mediante modelli multivariati e tecniche di machine learning, può consentire di rappresentare con maggiore completezza le interazioni che determinano la variabilità della resa. Tale prospettiva trova riscontro in studi recenti: Farmonov et al. (2023), combinando immagini PlanetScope e Sentinel-2 con variabili climatiche e topografiche, hanno evidenziato come l'integrazione di differenti fonti informative possa migliorare la stima della resa del frumento rispetto all'impiego delle sole informazioni satellitari.

Il presente lavoro si inserisce pertanto nel percorso di progressiva digitalizzazione dell'agricoltura argentina e conferma l'interesse dell'integrazione tra telerilevamento satellitare e sistemi di monitoraggio della resa quale componente conoscitiva dell'AdP. Pur non configurandosi come un modello predittivo definitivo, il caso studio Junín 01 individua un approccio metodologico promettente per trasformare dati spettrali e produttivi ad elevata risoluzione in informazioni utili alla caratterizzazione precoce della variabilità produttiva. La

validazione dell'approccio su più appezzamenti, annate e condizioni ambientali potrà contribuire allo sviluppo di strumenti sempre più robusti per il monitoraggio e la gestione sito-specifica del frumento e, più in generale, delle colture estensive della Pampa argentina.

BIBLIOGRAFIA

Abbate, P. E. (2004). *ECOFISIOLOGIA DE TRIGO: ASPECTOS PRACTICOS PARA EL MANEJO DEL CULTIVO.*

Abbate, P. E., Gutheim, F., Polidoro, O., Milisich, H. J., & Cuniberti, M. (2010). Fundamentos para la clasificación del trigo argentino por calidad: Efectos del cultivar, la localidad, el año y sus interacciones. *AgriScientia*, *27*(1), 1–9. https://doi.org/10.31047/1668.298x.v27.n1.2759

Abbate, P. E., Miralles, D. J., & Ballesteros, A. H. M. (2021). *NUEVO MAPA DE SUBREGIONES TRIGUERAS ARGENTINAS Y DE OTROS CEREALES INVERNALES*. INASE.

Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., & Upadhyaya, S. K. (2004). On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, *44*(1), 71–91. https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002

Adamchuk, V. I., Perk, R. L., & Schepers, J. S. (2007). *Applications of Remote Sensing in Site-Specific Management*.

Aliaga, V. S., Ferrelli, F., & Piccolo, M. C. (2017). Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International Journal of Climatology*, *37*(S1), 1237–1247. https://doi.org/10.1002/joc.5079

Alisaac, E., & Mahlein, A.-K. (2023). Fusarium Head Blight on Wheat: Biology, Modern Detection and Diagnosis and Integrated Disease Management. *Toxins*, *15*(3), 192. https://doi.org/10.3390/toxins15030192

Andrade, J. F., Poggio, S. L., Ermácora, M., & Satorre, E. H. (2017). Land use intensification in the Rolling Pampa, Argentina: Diversifying crop sequences to increase yields and resource use. *European Journal of Agronomy*, *82*, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.013

Andrade, J. F., & Satorre, E. H. (2015). Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Research*, *177*, 137–147. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.008

Anyou Xie, Zhou, Q., Fu, L., Zhan, L., & Wu, W. (2024). From Lab to Field: Advancements and Applications of On-The-Go Soil Sensors for Real-Time Monitoring. *Eurasian Soil Science*, *57*(10), 1730–1745. https://doi.org/10.1134/S1064229324601124

Avola, G., Distefano, M., Torrisi, A., & Riggi, E. (2024). Precision agriculture and patented innovation: State of the art and current trends. *World Patent Information*, *76*, 102262. https://doi.org/10.1016/j.wpi.2024.102262

Ayesta, C. (2025, marzo 12). El INTA impulsa la transformación tecnológica del agro. *INTA Informa*. https://intainforma.inta.gob.ar/el-inta-impulsa-la-transformacion-tecnologica-del-agro/

Baldoni, R., & Giardini, L. (2000). *Coltivazioni erbacee: Cereali e proteaginose* ([3ª ed.]). Pàtron Editore.

Basso, B., Cammarano, D., Chen, D., Cafiero, G., Amato, M., Bitella, G., Rossi, R., & Basso, F. (2009). Landscape Position and Precipitation Effects on Spatial Variability of Wheat Yield and Grain Protein in Southern Italy. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *195*(4), 301–312. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00351.x

Blanco, A., Boggini, G., Bolognesi, G., Brandolini, A., Cannella, C., Corbellini, M., D'Egidio, M. G., De Stefanis, E., Di Fonzo, N., Mastrangelo, A., Montemurro, P., Moscaritolo, S., Pasini, W., Pasquini, M., Pogna, N., Pollini, A., Rossi, V., Saviotti, B., Sgrulletta, D., … Viggiani, P. (2007). *Il grano*. Bayer CropScience ; ART servizi editoriali.

Blasi, G., Pisante, M., Sartori, L., Casa, R., Liberatori, S., Loreto, F., De Bernardinis, B., Furlan, L., Guaitoli, F., & Sarno, G. (2017). *LINEE GUIDA PER LO SVILUPPO DELL'AGRICOLTURA DI PRECISIONE IN ITALIA*.

Bocchio, V., Requesens, E., & Mestelan, S. (2019). Tendencias y equitatividad de los principales cultivos extensivos en el centro de la provincia de Buenos Aires. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, *45*(2).

Bona, L. (2021). Tendencias recientes en los cultivos de exportación y la producción ganadera en la provincia de Buenos Aires. Una mirada desde sus regiones productivas. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, *32*(62 may-ago). https://doi.org/10.33255/3262/775

Braff, R., & Shively, C. (2005). A Method of Over Bounding Ground Based Augmentation System (GBAS) Heavy Tail Error Distributions. *Journal of Navigation*, *58*(1), 83–103. https://doi.org/10.1017/S0373463304003029

Cano, P. B., Cabrini, S. M., & Poggio, S. L. (2025). Decision-making on crop sequence diversification in the Argentine pampas. *Land Use Policy*, *159*, 107778. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107778

Cao, Z., Gao, G., Duan, Y., Zhang, H., Tian, C., Zhao, C., & Xu, X. (2026). Water and nitrogen management strategies influence grain filling and yield of winter wheat in the North China Plain. *Frontiers in Plant Science*, *17*, 1795994. https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1795994

Casa, R. (A c. Di). (2024). *Agricoltura di precisione: Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali* (2. ed). Edagricole.

Castilla, F. (2013). La elegida para conservar el suelo. *Revista de Investigaciones Científica*, *39*(2).

Catálogo Nacional de Cultivares—INASE. (s.d.). Recuperato 17 settembre 2026, da https://gestion.inase.gob.ar/registroCultivares/publico/catalogo

Ceccon, P. (2017). *Agronomia*. EdiSES.

Celestina, C., Hunt, J., Kuchel, H., Harris, F., Porker, K., Biddulph, B., Bloomfield, M., McCallum, M., Graham, R., Matthews, P., Aisthorpe, D., Al-Yaseri, G., Hyles, J., Trevaskis, B., Wang, E., Zhao, Z., Zheng, B., Huth, N., & Brown, H. (2023). A cultivar phenology classification scheme for wheat and barley. *European Journal of Agronomy*, *143*, 126732. https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126732

Centro de Economía Internacional. (2025). *Panorama de los agroalimentos y bebidas argentinos en el comercio internacional*.

Cheng, E., Zhang, B., Peng, D., Zhong, L., Yu, L., Liu, Y., Xiao, C., Li, C., Li, X., Chen, Y., Ye, H., Wang, H., Yu, R., Hu, J., & Yang, S. (2022). Wheat yield estimation using remote sensing data based on machine learning approaches. *Frontiers in Plant Science*, *13*. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1090970

Consejo Agroindustrial Argentino. (2023, marzo). *Plan Federal Agroindustrial CAA 2023-2033*.

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) & Instituto Multidisciplinario de Historia y Ciencias Humanas (IMHICIHU). (s.d.). *La Argentina Rural en Mapas*. Recuperato 7 giugno 2026, da https://argentinaenmapas.wixsite.com/argentinarural

Conte, A. S. (2019). *El proceso de agriculturización del territorio argentino 1970-2015*.

Conte, A. S., Etchepareborda, M., Marino, M., & Róvere, F. V. (s.d.). *Oleaginización de la agricultura argentina*.

Cozzi, R., Protti, P., & Ruaro, T. (2013). *Elementi di analisi chimica strumentale: Tecniche di analisi con estensione digitale per chimica e materiali* (2. ed). Zanichelli.

Curin, F., Otegui, M. E., & González, F. G. (2021). Wheat yield progress and stability during the last five decades in Argentina. *Field Crops Research*, *269*, 108183. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108183

Datos Abiertos Estadística PBA - Estimaciones Agrícolas. (s.d.). Recuperato 13 giugno 2026, da https://datos.estadistica.ec.gba.gov.ar/

De Abelleyra, D., Iturralde Elortegui, M. D. R. M., Zelaya, D. K., Portillo, J. E., Volante, J. N., Franzoni, A., Lopez Morillo Barros, C. S., Goytia, S. Y., Murray, F., Santillan, J. L., Berriolo, M. J., Lanceta Pereyra, M. M., Scavone, A. S., Continelli, N., Gerlero, G. D., Reinaldi, J. A., Lopez Juane, P. A., Gomez, D. G., Krapovickas, S., & Vitale, J. P. (2025). *Mapa Nacional de cultivos campaña 2024 / 2025. Versión 1 Publicación no. 7.* https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/24705

De Paepe, J. L., & Álvarez, R. (2016). Wheat Yield Gap in the Pampas: Modeling the Impact of Environmental Factors. *Agronomy Journal*, *108*(4), 1367–1378. https://doi.org/10.2134/agronj2015.0482

Diacono, M., Castrignanò, A., Troccoli, A., De Benedetto, D., Basso, B., & Rubino, P. (2012). Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in a Mediterranean environment: A multivariate geostatistical approach. *Field Crops Research*, *131*, 49–62. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.03.004

Dong, T., Liu, J., Shang, J., Qian, B., Ma, B., Kovacs, J. M., Walters, D., Jiao, X., Geng, X., & Shi, Y. (2019). Assessment of red-edge vegetation indices for crop leaf area index estimation. *Remote Sensing of Environment*, *222*, 133–143. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.032

FAOSTAT. (s.d.). Recuperato 12 giugno 2026, da https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize

Farmonov, N., Amankulova, K., Szatmári, J., Urinov, J., Narmanov, Z., Nosirov, J., & Mucsi, L. (2023). Combining PlanetScope and Sentinel-2 images with environmental data for improved wheat yield estimation. *International Journal of Digital Earth*, *16*(1), 847–867. https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2186505

Fernández, R. B., & Fernández, K. (2011). Argentina. In R. Crane & C. Rizowy (A c. Di), *Latin American Business Cultures* (pp. 34–51). Palgrave Macmillan UK. https://doi.org/10.1057/9780230299108_3

Fernández-Long, M. E., Alvarez Prado, S., & Miralles, D. J. (2025). Climatic constraints behind spatial and temporal variability of wheat yields in the Pampa region of Argentina. *Agricultural Systems*, *224*, 104217. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104217

Ferreyra, M. C. (s.d.). *Emergy Perspectives on the Argentine Economy and Food Production Systems of the Rolling Pampas During the Twentieth Century*.

Figueroa, M., Hammond-Kosack, K. E., & Solomon, P. S. (2018). A review of wheat diseases—A field perspective. *Molecular Plant Pathology*, *19*(6), 1523–1536. https://doi.org/10.1111/mpp.12618

Finger, R., Swinton, S. M., El Benni, N., & Walter, A. (2019). Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. *Annual Review of Resource Economics*, *11*(1), 313–335. https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929

Fischer, R. A. (1983). Wheat. Potential Productivity of Field Crops under Different Environments. In *Symposium on Potential Productivity of Field Crops under Different Environments* (pp. 129–154). International Rice Research Institute, Manila.

Frazier, A. E., & Hemingway, B. L. (2021). A Technical Review of Planet Smallsat Data: Practical Considerations for Processing and Using PlanetScope Imagery. *Remote Sensing*, *13*(19), 3930. https://doi.org/10.3390/rs13193930

Gao, W., Zhou, W., Tang, C., Li, X., Yuan, Y., & Hu, X. (2024). High-precision services of BeiDou navigation satellite system (BDS): Current state, achievements, and future directions. *Satellite Navigation*, *5*(1), 20. https://doi.org/10.1186/s43020-024-00143-8

García, G. A., Miralles, D. J., Serrago, R. A., Alzueta, I., Huth, N., & Dreccer, M. F. (2018). Warm nights in the Argentine Pampas: Modelling its impact on wheat and barley shows yield reductions. *Agricultural Systems*, *162*, 259–268. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.12.009

Ge, Y., Thomasson, J. A., & Sui, R. (2011). Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. *Frontiers of Earth Science*. https://doi.org/10.1007/s11707-011-0175-0

Getahun, S., Kefale, H., & Gelaye, Y. (2024). Application of Precision Agriculture Technologies for Sustainable Crop Production and Environmental Sustainability: A Systematic Review. *The Scientific World Journal*, *2024*(1), 2126734. https://doi.org/10.1155/2024/2126734

Golik, S. I., Voisin, A. I., Castro, A. C., & Larran, S. (2022). Trigo: Rendimiento potencial y subregiones de cultivo. In *Cereales de Invierno* (pp. 213–239). Universidad Nacional de La Plata.

Gomarasca, M. A. (1998). *Il Telerilevamento*.

Grisso, R., Alley, M., McClellan, P., Brann, D., & Donohue, S. (2009). *Precision Farming: A Comprehensive Approach*.

Guaglianone, M. D. (2025). Adopción de Agricultura de Precisión en Argentina. Un Análisis Comparado con Estados Unidos. *Revista de Economía Política de Buenos Aires*, *30*, 77–121.

Guo, J., Li, X., Li, Z., Hu, L., Yang, G., Zhao, C., Fairbairn, D., Watson, D., & Ge, M. (2018). Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precision Agriculture*, *19*(5), 895–911. https://doi.org/10.1007/s11119-018-9563-8

Horo, J. T., He, X., Danu, K. G., Hei, N. B., Megerssa, S. H., Zhang, X., & Singh, P. K. (2026). Fusarium head blight: Emergence, impacts on wheat production and management in Ethiopia and beyond. *Frontiers in Agronomy*, *7*, 1716770. https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1716770

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, *83*(1–2), 195–213. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2

Hyles, J., Bloomfield, M. T., Hunt, J. R., Trethowan, R. M., & Trevaskis, B. (2020). Phenology and related traits for wheat adaptation. *Heredity*, *125*(6), 417–430. https://doi.org/10.1038/s41437-020-0320-1

INASE. (2026). *Trigo 2025-2026* [Informe]. Ministerio de Economía - Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca.

INDEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina. (s.d.). Recuperato 3 giugno 2026, da https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-8-87

INTA. (s.d.). *Resultados de la Red de Ensayos Territoriales de Trigo*. INTA. Recuperato https://repositorio.inta.gob.ar

Jackson, R. D., & Huete, A. R. (1991). Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, *11*(3–4), 185–200. https://doi.org/10.1016/S0167-5877(05)80004-2

Karunathilake, E. M. B. M., Le, A. T., Heo, S., Chung, Y. S., & Mansoor, S. (2023). The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. *Agriculture*, *13*(8), 1593. https://doi.org/10.3390/agriculture13081593

Kemerer, A., Melchiori, R., & Albarenque, S. (2020). Información Agronómica para la Agricultura de Precisión generada en la EEA Paraná del INTA. *SADIO Electronic Journal of Informatics and Operations Research*, *19*(1), 33–48.

Kuunya, R., Mohammed, E. A. H., Osman, M. M. A., Ssemugenze, B., Tamás, A., & Ragán, P. (2026). Leveraging Remote Sensing Technologies: A Review of Precision Cropping Challenges and Research Trend Analysis. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. https://doi.org/10.1007/s12524-026-02475-1

Li, W., Li, D., Warner, T. A., Liu, S., Baret, F., Yang, P., Jiang, J., Dong, M., Cheng, T., Zhu, Y., Cao, W., & Yao, X. (2025). Improved generality of wheat green LAI models through mitigation of the effect of leaf chlorophyll content variation with red edge vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, *318*, 114589. https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114589

Liaghat. (2010). A Review: The Role of Remote Sensing in Precision Agriculture. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, *5*(1), 50–55. https://doi.org/10.3844/ajabssp.2010.50.55

Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). Setting the Record Straight on Precision Agriculture Adoption. *Agronomy Journal*, *111*(4), 1552–1569. https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779

Maldonado, B., Ferrari, B., & Terré, E. (2025, dicembre 4). *Mapa comercial del trigo en Argentina*. Bolsa de Comercio de Rosario. http://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/mapa-comercial

Maloku, D. (2020). *Adoption of Precision Farming Technologies: USA and EU situation*. *VIII*.

Martínez, J. M., Galantini, J. A., Duval, M. E., Landriscini, M. R., García, R. J., & López, F. (2018). Nitrogen mineralization indicators under semi-arid and semi-humid conditions: Influence on wheat yield and nitrogen uptake. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *49*(15), 1907–1921. https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1485931

Melilli, M. P. (2026). *Caracterización físico-productiva del partido de Junín (Buenos Aires) mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica* [Informe Técnico]. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Menéndez, F. J., & Satorre, E. H. (2007). Evaluating wheat yield potential determination in the Argentine Pampas. *Agricultural Systems*, *95*(1), 1–10. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.03.004

Ministerio de Economía. (2025a). *Campaña Trigo 2024/25* [Resultados del ciclo]. Ministerio de Economía - Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca.

Ministerio de Economía. (2025b). *Estimaciones Agrícolas* [Informe Mensual]. Ministerio de Economía - Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca.

Ministerio de Economía. (2025c, diciembre). *Informe de comercio exterior – Agroindustria Argentina* [N° 4].

Ministerio de Economía. (2026). *Estimaciones Agrícolas* [Informe Mensual]. Ministerio de Economía - Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca.

Molfese, E. R., Castro Franco, M., Domenech, M., Fritz, N., & Yanniccari, M. E. (2021). Environmental and cultivar effects on technological quality of the bread wheat produced in the Pampean plain of Argentina. *Crop Science*, *61*(5), 3647–3659. https://doi.org/10.1002/csc2.20571

Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, *114*(4), 358–371. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009

Munoz, L. A., Gómez, M. C., Jiménez, D., Hasiner, E., Schroeder, K., Treguer, D., Juergenliemk, A., Horst, A., Jarvis, A., & Kropff, W. (2021). *Digital Agriculture Profile—Argentina*.

OECD. (2019). *Agricultural Policies in Argentina*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264311695-en

OECD. (2025). *Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2025: Making the Most of the Trade and Environment Nexus in Agriculture*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/a80ac398-en

OECD & Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/601276cd-en

Pacciani, C., Catellani, E., Bacchetti, A., Corbo, C., Ciccullo, F., & Ardolino, M. (2025). Agriculture 4.0: Technological adoption, drivers, benefits and challenges in Italy. A descriptive survey. *Bio-Based and Applied Economics*, *14*(4), 101–119. https://doi.org/10.36253/bae-17382

Pallottino, F., Biocca, M., Nardi, P., Figorilli, S., Menesatti, P., & Costa, C. (2018). Science mapping approach to analyze the research evolution on precision agriculture: World, EU and Italian situation. *Precision Agriculture*, *19*(6), 1011–1026. https://doi.org/10.1007/s11119-018-9569-2

Paul, K., Chatterjee, S. S., Pai, P., Varshney, A., Juikar, S., Prasad, V., Bhadra, B., & Dasgupta, S. (2022). Viable smart sensors and their application in data driven agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, *198*, 107096. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107096

Pengue, W. A. (2005). Transgenic Crops in Argentina: The Ecological and Social Debt. *Bulletin of Science, Technology & Society*, *25*(4), 314–322. https://doi.org/10.1177/0270467605277290

Pereira, P., Muñoz-Rojas, M., Bogunovic, I., & Zhao, W. (A c. Di). (2023). *Impact of Agriculture on Soil Degradation I: Perspectives from Africa, Asia, America and Oceania* (Vol. 120). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32168-9

Pérez, S. P., Irigoin, J., Cassani, M. T., & Massobrio, M. J. (2019). The importance of climate scenarios in setting the productivity indexes in the Pampa Arenosa sub-region of the province of Buenos Aires, Argentina. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, *14*(2), 1. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2286

Phang, S. K., Chiang, T. H. A., Happonen, A., & Chang, M. M. L. (2023). From Satellite to UAV-Based Remote Sensing: A Review on Precision Agriculture. *IEEE Access*, *11*, 127057–127076. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3330886

Piazzardi, B. (2022). *Necesidades del Productor Agropecuario Argentino* (Encuesta sobre las necesidades del productor agropecuario argentino). Universidad Austral.

Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of Precision Agriculture. In *Advances in Agronomy* (Vol. 67, pp. 1–85). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60513-1

Pinedo, M., Seain, C., & Serrano, J. (2024). Actualidad, desafíos y agregado de valor en el cultivo de trigo. *RevistaMDA - Cultivos de Invierno: Sostenibilidad, Calidad y Agregado de Valor*, *5*(1), 7–12.

Pisante, M. (2013). *Agricultura sostenibile: Principi, sistemi e tecnologie applicate all'agricoltura produttiva per la salvaguardia dell'ambiente e la tutela climatica*. Edagricole.

Puntel, L. A., Bolfe, É. L., Melchiori, R. J. M., Ortega, R., Tiscornia, G., Roel, A., Scaramuzza, F., Best, S., Berger, A. G., Hansel, D. S. S., Palacios Durán, D., & Balboa, G. R. (2023). How digital is agriculture in a subset

of countries from South America? Adoption and limitations. *Crop & Pasture Science*, *74*(6), 555–572. https://doi.org/10.1071/CP21759

Quiroga, M., Crociara, C., Schenfeld, E., Gomez, D., Muñoz, N., & Helguera, M. (2026). INTA's role in plant breeding in Argentina. *Discover Agriculture*, *4*(1), 122. https://doi.org/10.1007/s44279-026-00585-5

Radočaj, D., Plaščak, I., & Jurišić, M. (2023). Global Navigation Satellite Systems as State-of-the-Art Solutions in Precision Agriculture: A Review of Studies Indexed in the Web of Science. *Agriculture*, *13*(7), 1417. https://doi.org/10.3390/agriculture13071417

Romano, N. F., Alvarez, R., Bono, A. A., & Steinbach, H. S. (2015). Comparison of nitrogen fertilizer demand for wheat production between humid and semi-arid portions of the Argentinean Pampas using a mass balance method. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *61*(10), 1409–1422. https://doi.org/10.1080/03650340.2014.1003546

Royo, C., Soriano, J. M., & Alvaro, F. (2017). Wheat: A Crop in the Bottom of the Mediterranean Diet Pyramid. In B. Fuerst-Bjelis (A c. Di), *Mediterranean Identities—Environment, Society, Culture*. InTech. https://doi.org/10.5772/intechopen.69184

Saad El Imanni, H., El Harti, A., & El Iysaouy, L. (2022). Wheat Yield Estimation Using Remote Sensing Indices Derived from Sentinel-2 Time Series and Google Earth Engine in a Highly Fragmented and Heterogeneous Agricultural Region. *Agronomy*, *12*(11), 2853. https://doi.org/10.3390/agronomy12112853

Saini, E., & Lema, D. (2015). *Agricultural Productivity in Argentina*. https://doi.org/10.22004/ag.econ.211727

Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2020). From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy*, *10*(2), 207. https://doi.org/10.3390/agronomy10020207

Salado-Navarro, L. R., & Sinclair, T. R. (2009). Crop rotations in Argentina: Analysis of water balance and yield using crop models. *Agricultural Systems*, *102*(1–3), 11–16. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.06.004

Segarra, J. (2024). Satellite Imagery in Precision Agriculture. In P. M. Priyadarshan, S. M. Jain, S. Penna, & J. M. Al-Khayri (A c. Di), *Digital Agriculture* (pp. 325–340). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43548-5_10

Segarra, J., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2022). Farming and Earth Observation: Sentinel-2 data to estimate within-field wheat grain yield. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *107*, 102697. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102697

Segarra, J., Buchaillot, M. L., Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2020). Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. *Agronomy*, *10*(5), 641. https://doi.org/10.3390/agronomy10050641

Serrago, R. A., Carretero, R., Bancal, M. O., & Miralles, D. J. (2009). Foliar diseases affect the eco-physiological attributes linked with yield and biomass in wheat (*Triticum aestivum* L.). *European Journal of Agronomy*, *31*(4), 195–203. https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.002

Serri, D. L., MeriLeS, J., Conforto, C., BranDan, C. P., PaStor, S., GrüMBerG, B., Luna, C., & Lorenzon, Cl. (2018). *INCORPORACIÓN DE TRIGO EN LA ROTACIÓN AGRÍCOLA: UNA HERRAMIENTA PARA POTENCIAR EL FUNCIONAMIENTO DEL AGROECOSISTEMA*.

Sharma, A., Prakash, A., Bhambota, S., & Kumar, S. (2024). Investigations of precision agriculture technologies with application to developing countries. *Environment, Development and Sustainability*, *27*(7), 15135–15171. https://doi.org/10.1007/s10668-024-04572-y

Shewry, P. R. (2009). Wheat. *Journal of Experimental Botany*, *60*(6), 1537–1553. https://doi.org/10.1093/jxb/erp058

Simón, M. R., & Golik, S. I. (2022). *Cereales de invierno* (1a ed.). Universidad Nacional de La Plata.

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

Tellería, M. G., & Melilli, M. P. (2026). *Resultados de la Campaña 2025 de Trigo en Junín* [Informe Técnico]. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Trigo Argentino. (s.d.). Recuperato 28 settembre 2026, da https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiODI4ODAyOWEtZTc2NC00NWNlLTk4MjAtNTU2ODEzYzAzOTc4IiwidCI6IjAzNDJjMmMyLTgzNDAtNGM4NC04MTVjLWViMGE2ODE1N2MwNCIsImMiOjR9

Tucker, C. J. (1979). Red and Photographic Infrared l,lnear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*.

Vázquez, D., Berger, A. G., Cuniberti, M., Bainotti, C., De Miranda, M. Z., Scheeren, P. L., Jobet, C., Zúñiga, J., Cabrera, G., Verges, R., & Peña, R. J. (2012). Influence of cultivar and environment on quality of Latin American wheats. *Journal of Cereal Science*, *56*(2), 196–203. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.03.004

Verón, S. R., Paruelo, J. M., & Slafer, G. A. (2004). Interannual variability of wheat yield in the Argentine Pampas during the 20th century. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *103*(1), 177–190. https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.10.001

Vidican, R., Mălinaș, A., Ranta, O., Moldovan, C., Marian, O., Ghețe, A., Ghișe, C. R., Popovici, F., & Cătunescu, G. M. (2023). Using Remote Sensing Vegetation Indices for the Discrimination and Monitoring of Agricultural Crops: A Critical Review. *Agronomy*, *13*(12), 3040. https://doi.org/10.3390/agronomy13123040

Villarroel, D. D., Scaramuzza, F. M., & Melchiori, R. J. (2020). *Estimación de la evolución en la adopción de componentes de Agricultura de Precisión de cara al inicio de una década de Agricultura digitalizada* [Informe técnico]. INTA.

World Bank. (2023). *Argentina: Towards a More Competitive Inclusive and Resilient Agrifood Sector*. https://documentos.bancomundial.org/es/publication/documents-reports/documentdetail/099042825141510674

Wu, R., Fan, Y., Zhang, L., Yuan, D., & Gao, G. (2024). Wheat Yield Estimation Study Using Hyperspectral Vegetation Indices. *Applied Sciences*, *14*(10), 4245. https://doi.org/10.3390/app14104245

Yang, C. (2020). Remote Sensing and Precision Agriculture Technologies for Crop Disease Detection and Management with a Practical Application Example. *Engineering*, *6*(5), 528–532. https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.10.015

Zhou, C. (2025). Exploring future GIS visions in the era of the scientific and technological revolution. *Information Geography*, *1*(1), 100007. https://doi.org/10.1016/j.infgeo.2025.100007

Zhu, J., Li, Y., Wang, C., Liu, P., & Lan, Y. (2024). Method for Monitoring Wheat Growth Status and Estimating Yield Based on UAV Multispectral Remote Sensing. *Agronomy*, *14*(5), 991. https://doi.org/10.3390/agronomy14050991