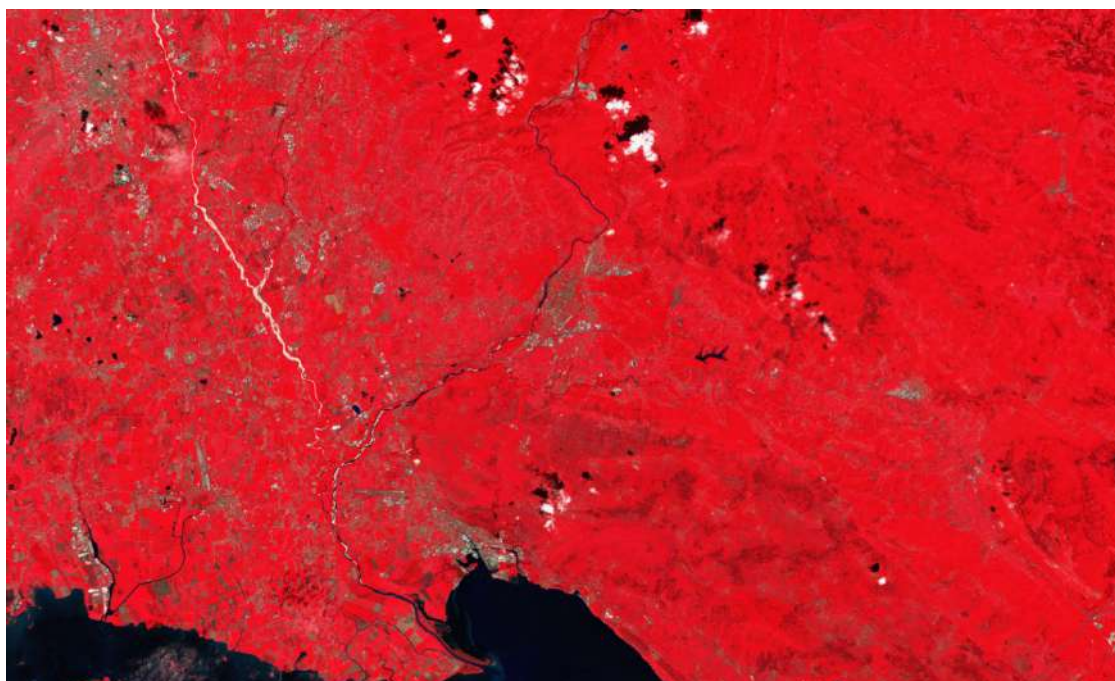


IRRIGAVIT - Irrigazione razionale e gestione del suolo in viticoltura transfrontaliera

IRRIGAVIT - Racionalno namakanje in upravljanje tal v čezmejnem vinogradništvu

D 2.1.2 Report delle correlazioni tra parametri fisiologici del vigneto e indici multispettrali

D 2.1.2 Poročilo o korelacijah med fiziološkimi parametri vinograda in multispektralnimi indeksi



Numero progetto/Projektna številka	ITA-SI0100043
Acronimo/Akronim	IRRIGAVIT
Titolo Progetto/ Projektni naslov	Irrigazione razionale e gestione del suolo in viticoltura transfrontaliera / Racionalno namakanje in upravljanje tal v čezmejnem vinogradništvu
Budget totale/celotni znesek	€ 617.325,98
Di cui Fondo europeo di sviluppo regionale (FESR)/ od tega Evropski sklad za regionalni razvoj (ESRR)	€ 493.860,78
Durata/Trajanje	01/10/2023 – 31/12/2025
WP e attività/DP in dejavnost	WP 2.1
Titolo Deliverable/ Naslov Dosežka	D 2.1.2 Report delle correlazioni tra parametri fisiologici del vigneto e indici multispettrali Poročilo o korelacijah med fiziološkimi parametri vinograda in multispektralnimi indeksi
WP leader /DP vodja	GIS
Autore/Autor	Alen Mangafić
Giorno di consegna/Dan izdaje	30/10/2025
Status/Status	Versione Finale/Končna verzija

Partner/Partnerji:

LP/VP- giver: **Università degli studi di Udine -Di4A (UNIUD)**

Partner 2- giver: **Università Ca' Foscari di Venezia (UNIVE)**

Partner 3- giver: **Kmetijski Inštitut Slovenije (KIS)**

Partner 4- giver: **Geodetski Inštitut Slovenije (GIS)**

Partner 5 - taker: **Consorzio Tutela Vini Friuli Colli Orientali e Ramandolo (CON)**

Partner 6 - taker: **RRA SEVERNE PRIMORSKE d.o.o. Nova Gorica (RAA)**

INTRODUZIONE	4
1 Miglioramento della modellizzazione dello stress idrico mediante l'uso di Sentinel-2.....	5
1.1 Introduzione	5
1.2 Dati e metodi	5
1.3 Test nel vigneto di Šmarje	6
2 Spessore equivalente dell'acqua nella copertura vegetale: approccio iperspettrale.....	10
2.1 Introduzione	10
2.2 Dati	10
2.3 Metodi	11
2.4 Risultati e conclusioni	12
Fonti	14

INTRODUZIONE

La viticoltura nell'area transfrontaliera tra Italia e Slovenia si confronta sempre più frequentemente con le conseguenze del cambiamento climatico: siccità ricorrenti, stress idrico prolungato ed eventi meteorologici estremi minacciano quantità e qualità delle uve, compromettendo la sostenibilità dell'intero sistema agricolo. Il progetto **IRRIGAVIT – Irrigazione razionale e gestione del suolo in viticoltura transfrontaliera**, avviato il 1° ottobre 2023 e cofinanziato nell'ambito del programma Interreg VI-A Italia-Slovenia 2021–2027, si propone di migliorare l'efficienza dell'uso dell'acqua nei vigneti e rafforzare la resilienza del settore vitivinicolo mediante l'introduzione di buone pratiche agronomiche e strumenti tecnologici avanzati. IRRIGAVIT valorizza i risultati del precedente **ACQUAVITIS – Soluzioni innovative per l'uso efficiente dell'acqua in viticoltura transfrontaliera**, che ha introdotto un approccio ecosistemico all'irrigazione di soccorso e alla gestione del suolo in tre aree pilota (Vipavska Dolina, Carso e Bassa Friulana), attraverso l'uso di tecnologie verdi, telerilevamento, DSS e pratiche agronomiche orientate all'ottimizzazione del bilancio idrico. IRRIGAVIT amplia questi protocolli e pratiche, con supporto tecnico-specialistico, in due nuove aree chiave – **Colli Orientali del Friuli e Brda** – con l'obiettivo di trasferire l'innovazione ai viticoltori e ai principali decisori pubblici.

Capofila del progetto è l'**Università degli Studi di Udine – Dipartimento di Scienze Agroalimentari, Ambientali e Animali (Di4A)**. Completano il partenariato sei organizzazioni:

- **Università Ca' Foscari di Venezia**
- **Kmetijski Inštitut Slovenije (KIS)**
- **Geodetski Inštitut Slovenije (GIS)**
- **RRA SEVERNE PRIMORSKE d.o.o. Nova Gorica**
- **Consorzio Tutela Vini Friuli Colli Orientali e Ramandolo**

E **undici partner associati**:

- **ARPA FVG - Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente del Friuli Venezia Giulia**
- **Regione autonoma Friuli Venezia Giulia**
- **Veneto Agricoltura**
- **Consorzio Tutela Prosecco doc, Area tecnicoambientale**
- **ERSA-Agenzia regionale per lo Sviluppo Rurale del Friuli Venezia Giulia**
- **Univerza v Novi Gorici**
- **Konzorcij Brda**
- **Regionalna razvojna agencija za Podravje – Maribor**
- **Università degli Studi di Padova**
- **Kohezijska regija Vzhodna Slovenija**
- **Center za podpora podjetjem pri razvijanju zelenih tehnologij d.o.o.**

Il progetto si concentra su due obiettivi principali: da un lato, la **validazione e l'adattamento delle strategie tecniche per una gestione ottimizzata dell'acqua**; dall'altro, la **definizione di nuove linee guida condivise**, da integrare nei disciplinari di produzione vitivinicola e nelle politiche agricole nazionali e regionali, con l'ambizione di estenderle anche ad altri territori. Il progetto si concluderà il **31 dicembre 2025** con la firma di un **impegno congiunto** tra partner e policy-maker per l'adozione ufficiale delle nuove **linee guida IRRIGAVIT**.

1 Miglioramento della modellizzazione dello stress idrico mediante l'uso di Sentinel-2

1.1 Introduzione

Nel progetto ACQUAVITIS abbiamo analizzato le correlazioni tra il potenziale idrico della vite e le immagini multispettrali. Oltre ai dati UAV, nel progetto abbiamo utilizzato anche le immagini satellitari della costellazione Sentinel-2 (CDSE). Nel proseguimento del progetto IRRIGAVIT, abbiamo aggiornato le analisi esistenti includendo ulteriori variabili. L'obiettivo principale era quello di migliorare la modellizzazione tenendo conto dei dati sulle precipitazioni ERA5 e delle stime del potenziale idrico basate sul sistema Vintel. La figura 1 mostra un diagramma che illustra i miglioramenti del modello del potenziale idrico per entrambi i progetti.

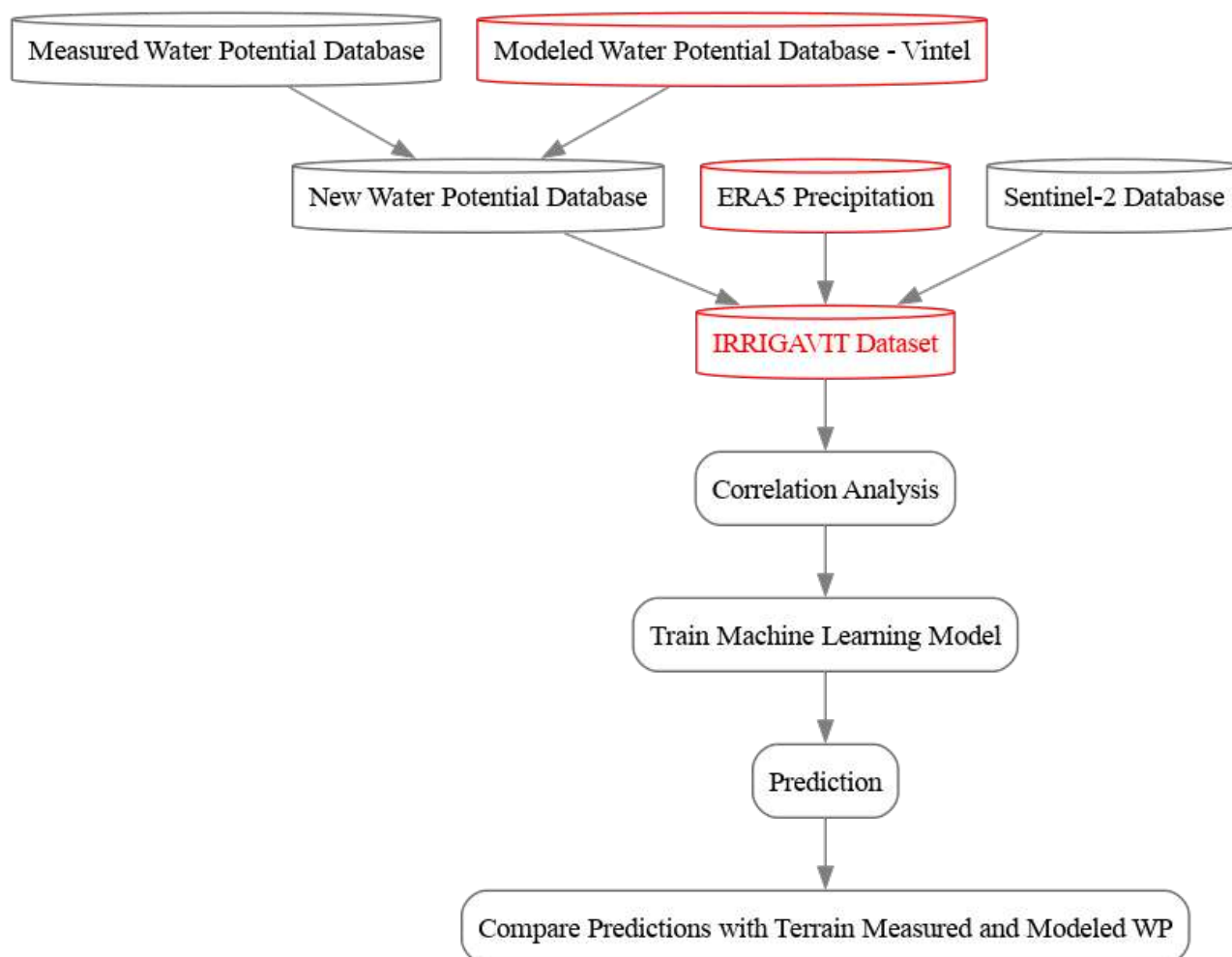


Figura 1: Diagramma del modello aggiornato.

1.2 Dati e metodi

I dati ERA5 consentono l'applicazione globale della metodologia sviluppata, poiché si tratta di una fonte aperta, standardizzata e accessibile a livello globale. L'utilizzo delle stime del potenziale idrico del sistema Vintel consente lo sviluppo di un approccio che non dipende dalle misurazioni sul campo effettuate il giorno del sorvolo del satellite. Quando sono disponibili immagini Sentinel-2 senza nuvole, ma non sono state

effettuate misurazioni del potenziale idrico, si verifica una perdita di informazioni. Il collegamento delle immagini Sentinel-2 con le valutazioni convalidate dal sistema Vintel (confermate in altri pacchetti di lavoro del progetto) consente una maggiore flessibilità e stabilità della modellizzazione, poiché abbiamo a disposizione il potenziale idrico modellizzato per ogni data di sorvolo Sentinel-2.

1.3 Test nel vigneto di Šmarje

Il test è stato effettuato nel vigneto di Šmarje, dove le misurazioni del potenziale idrico delle piante non erano sincronizzate con tutte le immagini. Ciononostante, grazie all'aggregazione dei blocchi nelle celle Sentinel-2, abbiamo ottenuto una distribuzione spaziale coerente dei dati (figura 2).

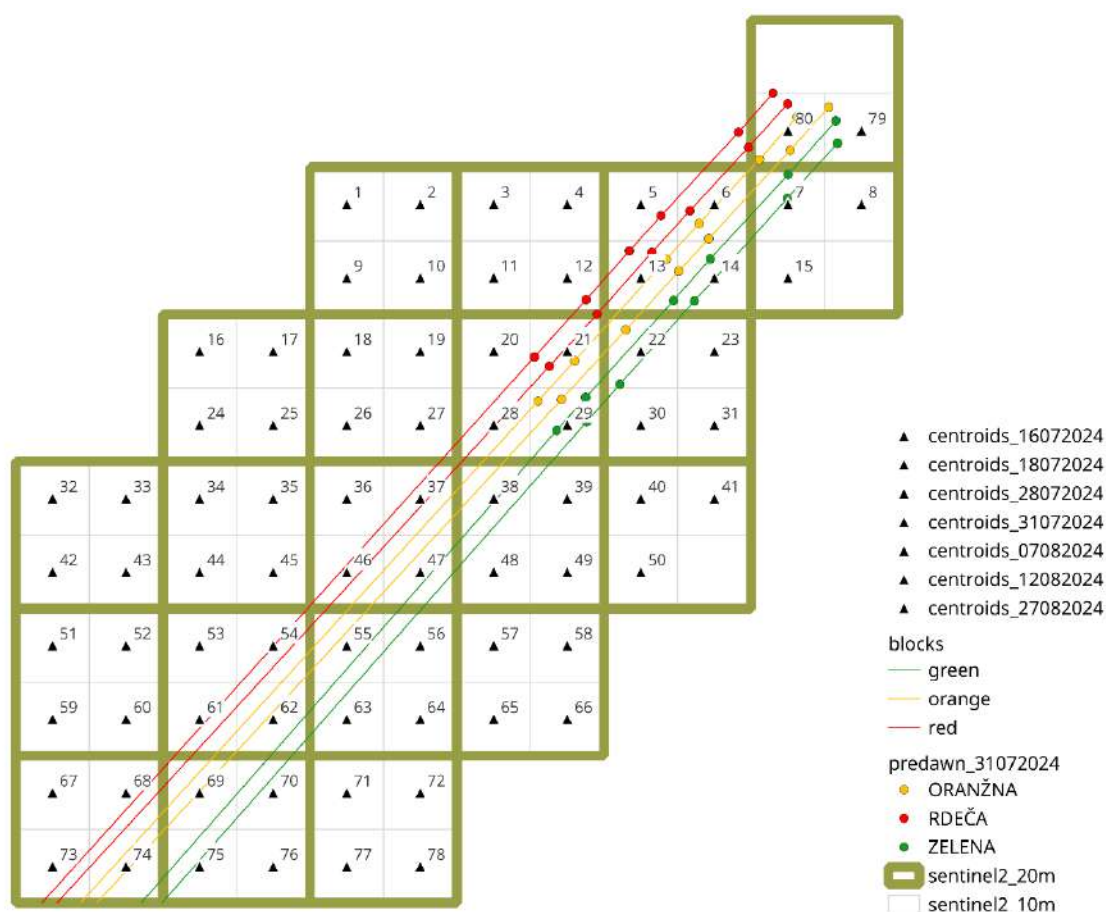


Figura 2: Mappa dei blocchi di studio sulla griglia Sentinel-2.

Per la modellizzazione abbiamo utilizzato le immagini Sentinel-2 con date 16.7, 18.7, 28.7, 31.7, 7.8, 12.8 e 27.8.2024, in combinazione con le stime del potenziale idrico del sistema Vintel. Su questa base abbiamo modellato i valori del potenziale idrico (MPa). Prima della modellizzazione abbiamo verificato che le date delle immagini coprissero la situazione immediatamente dopo la pioggia (figura 3).

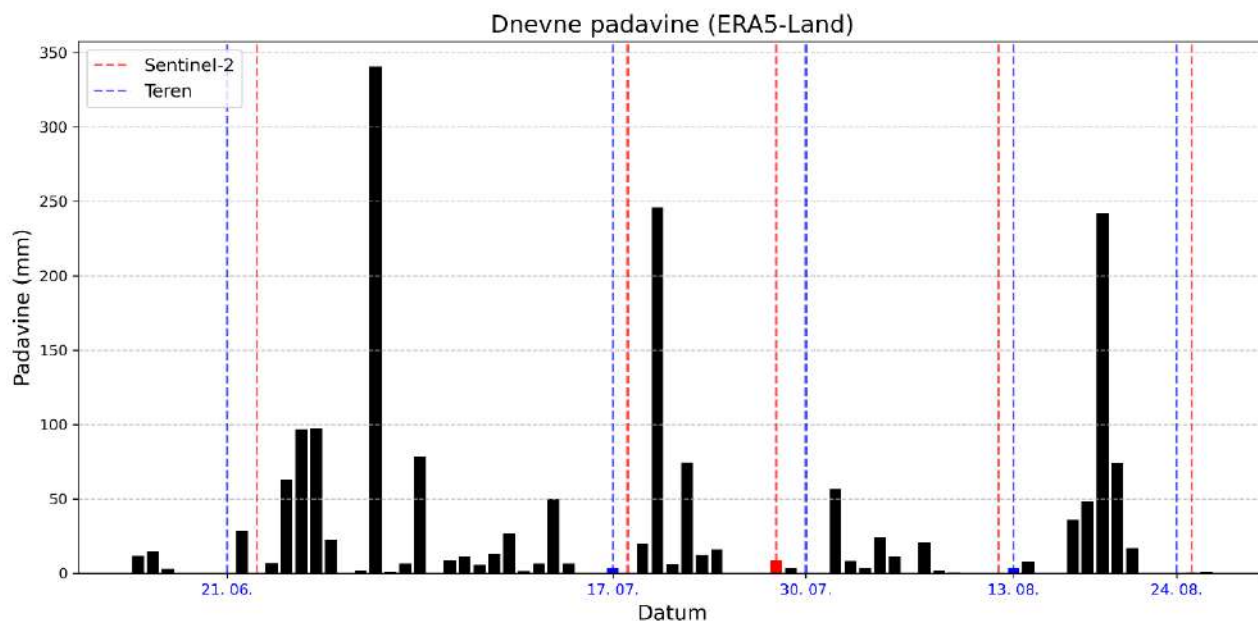


Figura 3: Rappresentazione della quantità di precipitazioni e delle date di sorvolo di Sentinel-2.

Nella figura 4 possiamo vedere come abbiamo ponderato le misurazioni del potenziale idrico su singole celle Sentinel-2 (percentuale di copertura rispetto al blocco verde, arancione e rosso) e determinato la stima del potenziale idrico che è stata inserita nella modellizzazione.

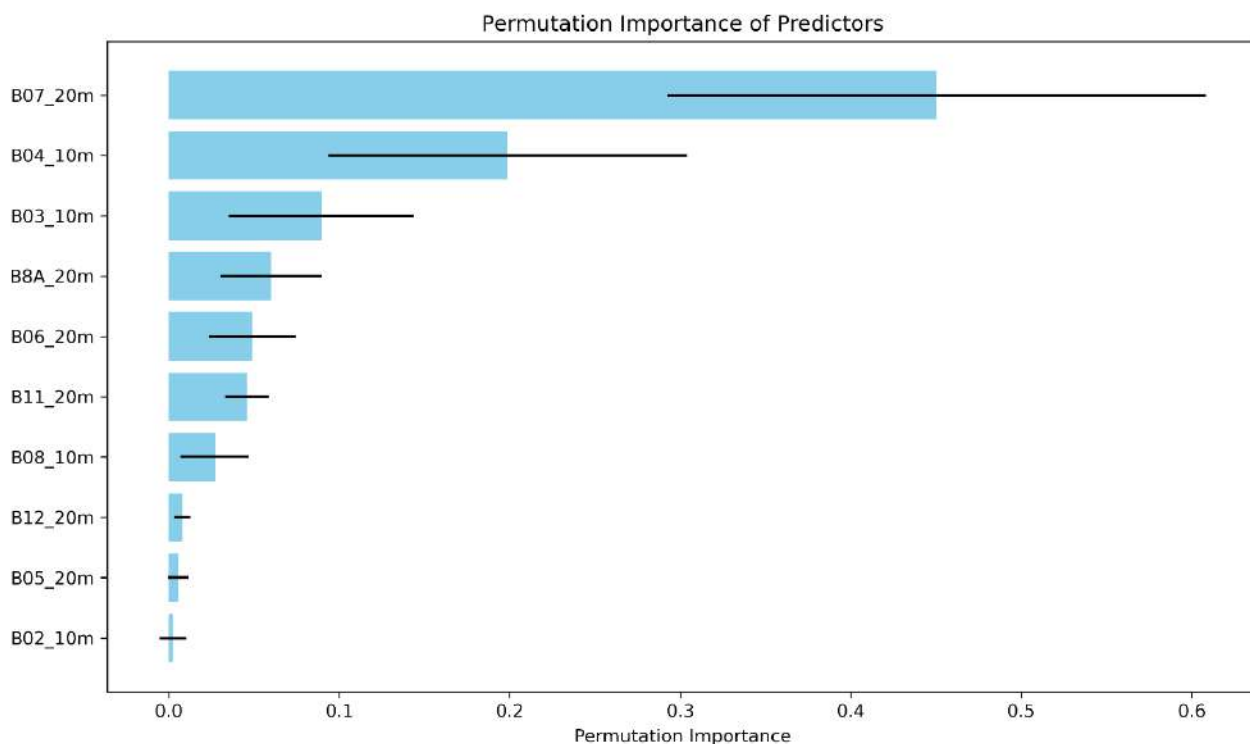
date	green_percentage	orange_percentage	red_percentage	green_vintel	orange_vintel	red_vintel	scholander
2024-07-16	15	40	45	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33
2024-07-18	15	40	45	-0.18	-0.38	-0.38	-0.35
2024-07-28	13	15	40	-0.22	-0.28	-0.58	-0.3
2024-07-31	15	40	45	-0.29	-0.34	-0.62	-0.46
2024-08-07	15	40	45	-0.19	-0.31	-0.38	-0.32
2024-08-12	15	40	45	-0.24	-0.47	-0.57	-0.48
2024-08-27	15	40	45	-0.24	-0.33	-0.3	-0.3

Figura 4: Attribuzione del potenziale idrico dei blocchi Sentinel-2 alle griglie.

Abbiamo testato cinque modelli di regressione di apprendimento automatico e ne abbiamo valutato la stabilità con R2 e la precisione con RMSE (figura 5), nonché l'importanza dei singoli canali multispettrali nella modellizzazione (figura 6).

Model	Most Important Features R2	Most Important Features RMSE	Extended Features R2	Extended Features RMSE	All Features R2	All Features RMSE
BaggingRegressor	0.64	0.063	0.69	0.057	0.66	0.061
RandomForestRegressor	0.63	0.063	0.66	0.06	0.64	0.063
AdaBoostRegressor	0.62	0.064	0.64	0.062	0.61	0.064
ExtraTreesRegressor	0.61	0.065	0.64	0.062	0.68	0.059
KNeighborsRegressor	0.53	0.071	0.57	0.068	0.63	0.063

Figura 5: Risultati dei modelli di regressione.



Model	Most Important Features R2	Most Important Features RMSE	Extended Features R2	Extended Features RMSE	All Features R2	All Features RMSE
BaggingRegressor	0.64	0.063	0.69	0.057	0.66	0.061
RandomForestRegressor	0.63	0.063	0.66	0.06	0.64	0.063
AdaBoostRegressor	0.62	0.064	0.64	0.062	0.61	0.064
ExtraTreesRegressor	0.61	0.065	0.64	0.062	0.68	0.059
KNeighborsRegressor	0.53	0.071	0.57	0.068	0.63	0.063

Figura 6: Influenza dei singoli canali multispettrali sulla previsione del potenziale idrico.

A causa della bassa varianza dei dati, l'approccio regressivo non si è rivelato ottimale. Successivamente abbiamo testato i modelli di classificazione per verificare l'efficacia della classificazione.

Abbiamo diviso il set di dati in due gruppi:

- classe 1: $< -0,35$ MPa
- classe 2: $> -0,35$ MPa

Le classi sono state determinate sulla base degli istogrammi della distribuzione dei valori rispetto al valore medio (figura 7).

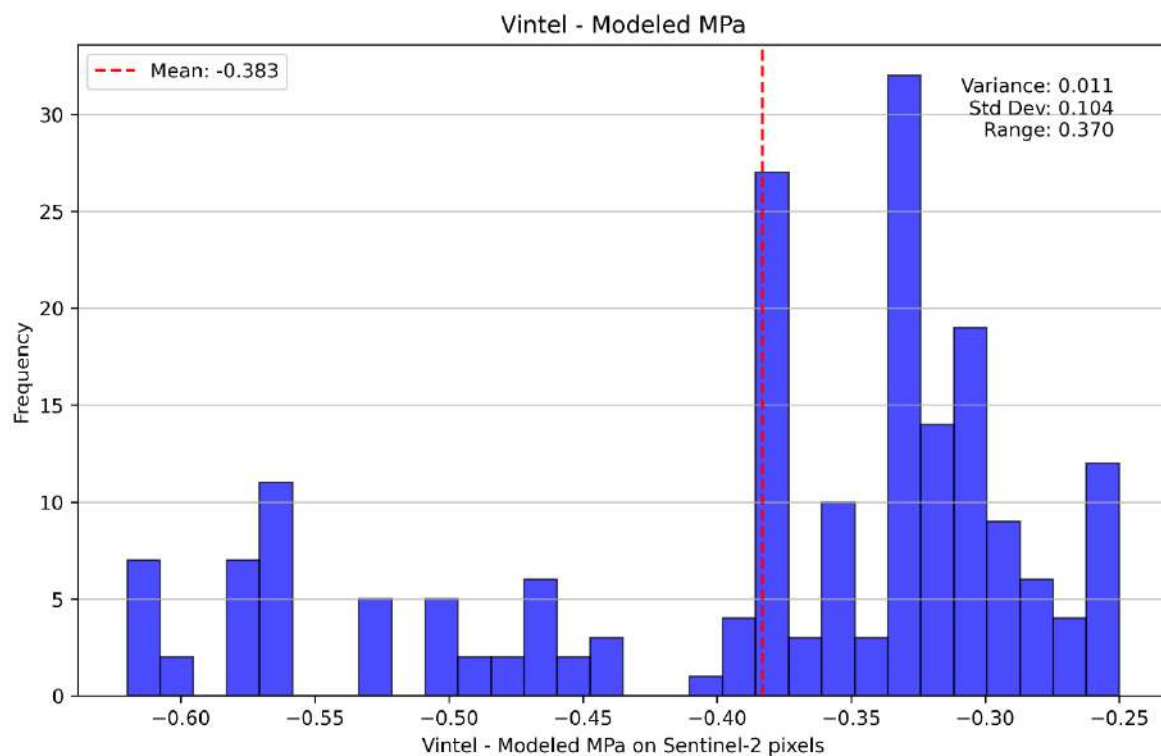


Figura 7: Distribuzione del potenziale idrico del set di dati.

Per la classificazione abbiamo utilizzato 10 modelli di apprendimento automatico (figura 8).

Model	Accuracy
AdaBoostClassifier	0.88
BaggingClassifier	0.88
ExtraTreesClassifier	0.85
LGBMClassifier	0.85
RandomForestClassifier	0.85
DecisionTreeClassifier	0.82
KNeighborsClassifier	0.8
RidgeClassifier	0.8
RidgeClassifierCV	0.8
LabelPropagation	0.78

Figura 8: Risultati dei modelli di classificazione.

Nella figura 9 sono riportati i risultati del modello Random Forest, con il quale abbiamo classificato correttamente 190 casi su 196. I pixel classificati in modo errato sono visualizzati in grigio, mentre quelli corretti sono visualizzati in due colori contrastanti.

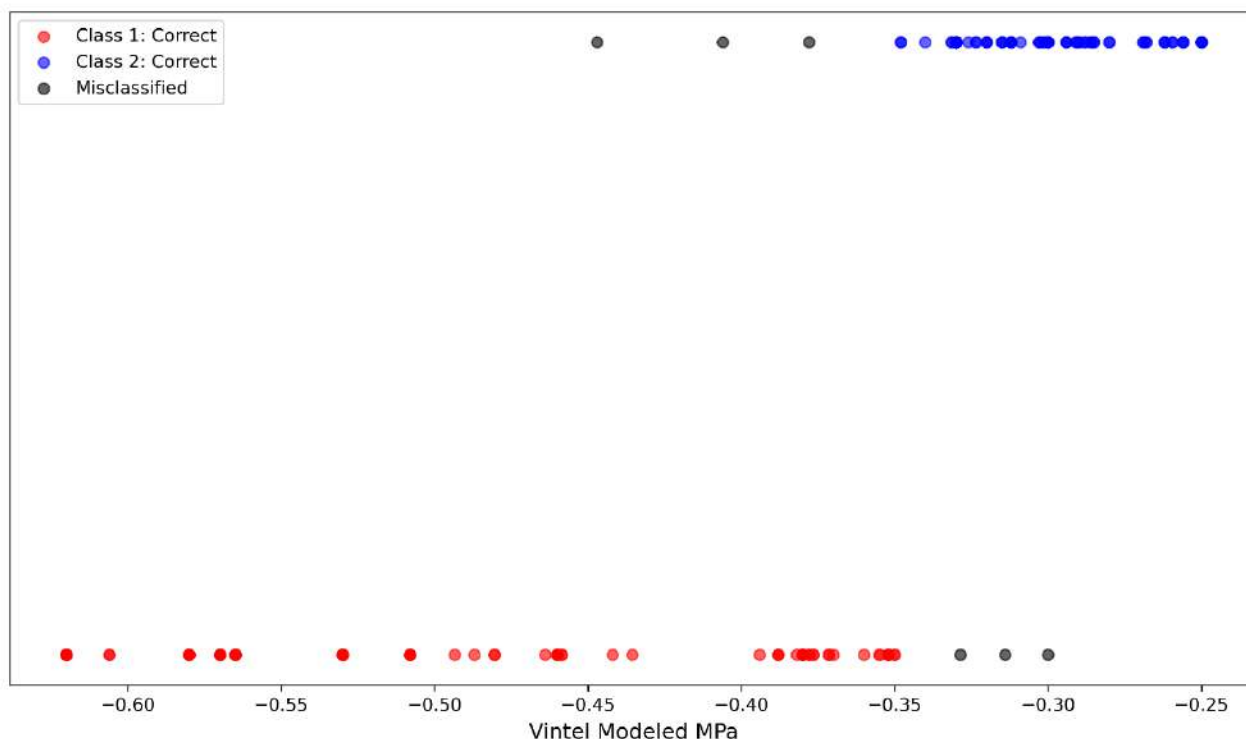


Figura 9: Visualizzazione dell'efficacia della classificazione: esempio Random Forest.

La combinazione dei dati Vintel + Sentinel-2 si è dimostrata efficace. Miglioramenti futuri potrebbero includere l'integrazione diretta dei dati sulle precipitazioni nei modelli, non solo per la pulizia dei set di dati, ma anche per migliorare la capacità predittiva.

2 Spessore equivalente dell'acqua nella copertura vegetale: approccio iperspettrale

2.1 Introduzione

Lo spessore equivalente dell'acqua (EWT) rappresenta la quantità di acqua contenuta nella pianta o nella sua copertura, espressa come strato d'acqua se fosse distribuita uniformemente sulla superficie delle foglie (Wocher et al. 2018). Si tratta di un indicatore otticamente misurabile del contenuto d'acqua nel tessuto vegetale, espresso in unità di spessore (ad esempio g/cm² o mm). L'EWT descrive lo stato idrico della pianta. L'EWT non indica lo stato energetico dell'acqua, quindi non è un indicatore diretto del potenziale idrico, ma può essere un indicatore indiretto della quantità d'acqua (proxy) che può essere utilizzato per monitorare l'impatto della siccità e dello stress idrico.

2.2 Dati

Per determinare l'EWT è possibile utilizzare immagini satellitari iperspettrali come ad esempio le immagini EnMAP (DLR; Chabrillat et al 2024), PRISMA (ASI; Galeazzi et al. 2008) e Tanager-1 (Planet Labs 2025), che

consentono di ricavare direttamente il contenuto di acqua nella copertura vegetale sulla base delle caratteristiche spettrali nella gamma di assorbimento dell'acqua tra circa 930 e 1060 nm. Le suddette immagini iperspettrali satellitari hanno una risoluzione spettrale estremamente alta () e una risoluzione spaziale media (30 m). Sono destinate alla modellizzazione a livello dell'intero vigneto e il loro massimo potenziale è la modellizzazione regionale.

Abbiamo effettuato il test su un'immagine PRISMA (12 aprile 2024) che è stata utilizzata per calcolare la distribuzione spaziale dell'EWT nell'area di prova (figura 10). Le immagini iperspettrali di questo tipo non sono ancora disponibili per tutte le località e i periodi desiderati, pertanto abbiamo effettuato l'analisi su un'immagine dell'area più vicina ai fini del primo test di questo tipo di tecnologia nel contesto del presente progetto. In questa zona sono presenti anche alcuni vigneti oggetto di precedenti attività progettuali.



Figura 10: Immagine in ingresso (a sinistra: RGB, a destra: falso composito SWIR)

2.3 Metodi

Prima dell'elaborazione è stata eseguita una correzione atmosferica con l'algoritmo ATCOR, che converte la riflettanza apparente in riflettanza superficiale, consentendo così un'interpretazione fisicamente corretta dell'interazione della luce con la copertura vegetale. Per l'estrazione diretta dell'EWT dalle immagini iperspettrali è stato utilizzato il modulo Plant Water Retrieval (PWR), basato sulla legge di assorbimento (Beer-Lambert) e che consente la stima dello strato d'acqua otticamente attivo dalla riflettanza a 970 nm. L'algoritmo PWR determina quantitativamente l'EWT in unità $[g\ cm^{-2}]$ o $[cm]$ sulla base della differenza tra la riflettanza misurata e la riflettanza di riferimento secca prevista (Wocher et al., 2018). I valori calcolati rappresentano l'acqua otticamente attiva o fisiologicamente disponibile nel tessuto vegetale, che partecipa direttamente ai processi di traspirazione e fotosintesi e riflette l'attuale stato di idratazione della pianta. I calcoli sono stati effettuati direttamente sull'immagine PRISMA, il che consente di ottenere valori EWT distribuiti spazialmente senza la necessità di misurazioni sul campo, poiché il risultato rappresenta il contenuto di acqua vegetale attiva ottenuto direttamente dalla risposta spettrale della vegetazione.

2.4 Risultati e conclusioni

Il risultato rappresenta una mappa spaziale dello spessore equivalente dell'acqua nella copertura vegetale [g cm^{-2}], che mostra le differenze nel contenuto d'acqua in base all'uso del suolo e alla fase fenologica delle piante (figura 11).

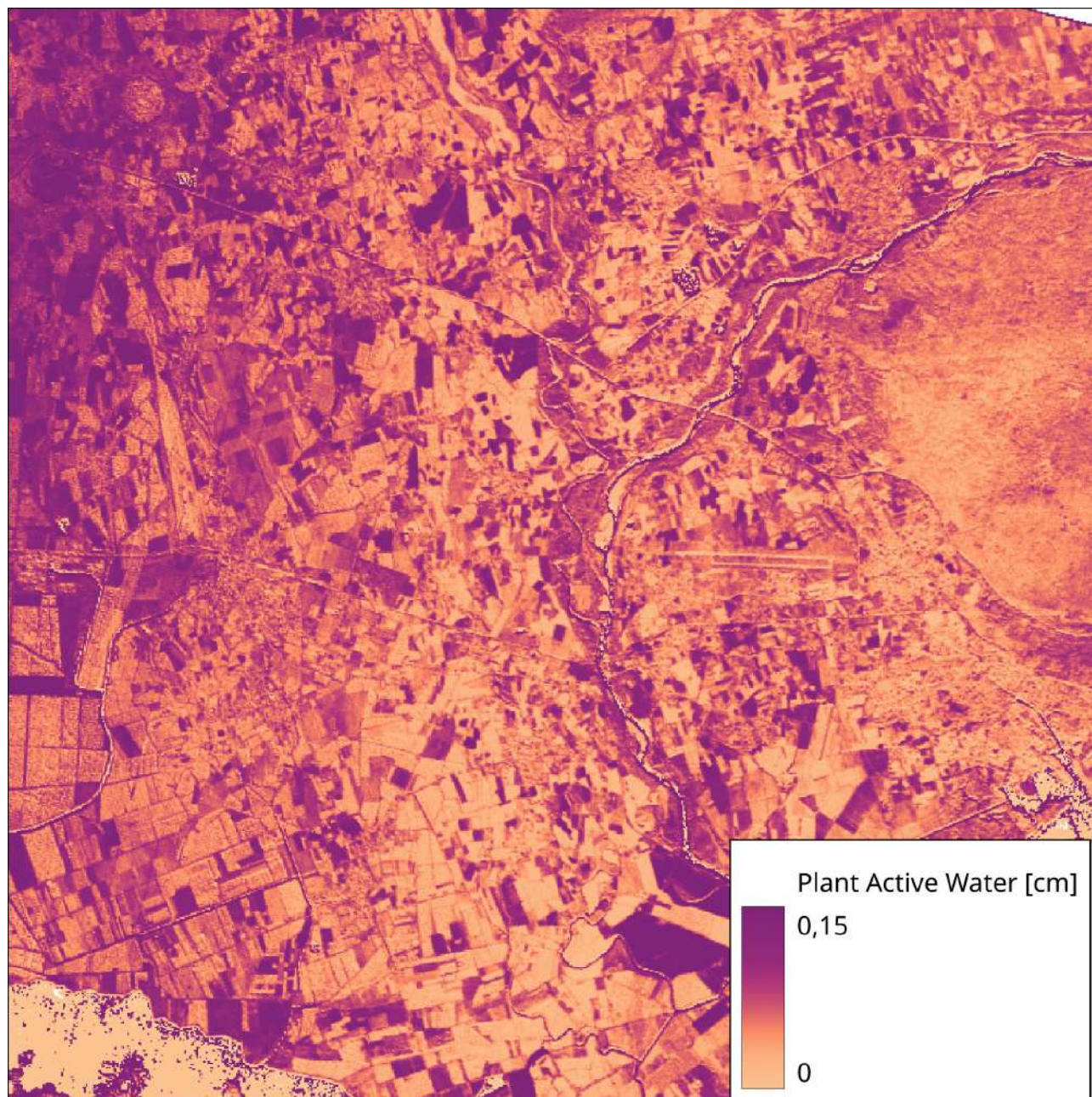


Figura 11: Distribuzione spaziale dell'acqua otticamente attiva nella parte superiore della copertura vegetale (EWT).

Concludiamo che l'EWT può essere utilizzato per migliorare le analisi dello stress idrico. Combinando i valori calcolati dell'EWT con i dati meteorologici (ad esempio precipitazioni, temperatura, umidità relativa, evapotraspirazione o contenuto d'acqua nel suolo) è possibile creare indici combinati di stress idrico che

consentono di riconoscere tempestivamente le condizioni di siccità e quantificare la risposta delle piante alla carenza d'acqua. Tale approccio apre la possibilità di sviluppare indicatori applicativi dello stress vegetale basati esclusivamente su dati rilevati tramite telerilevamento (remote) e utilizzabili anche per la validazione di modelli fisiologici senza la necessità di misurazioni dirette sul campo.

Fonti

CDSE. Sentinel-2 – Documentation. n.d. Retrieved 28 October 2025.

<https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html>.

Chabrillat, Sabine, Saskia Foerster, Karl Segl, Alison Beamish, Maximilian Brell, Saeid Asadzadeh, Robert Milewski, Kathrin J. Ward, Arlena Brosinsky, Katrin Koch, Daniel Scheffler, Stephane Guillaso, Alexander Kokhanovsky, Sigrid Roessner, Luis Guanter, Hermann Kaufmann, Nicole Pinnel, Emiliano Carmona, Tobias Storch, Tobias Hank, Katja Berger, Mathias Wocher, Patrick Hostert, Sebastian van der Linden, Akpona Okujeni, Andreas Janz, Benjamin Jakimow, Astrid Bracher, Mariana A. Soppa, Leonardo M. A. Alvarado, Henning Buddenbaum, Birgit Heim, Uta Heiden, Jose Moreno, Cindy Ong, Niklas Bohn, Robert O. Green, Martin Bachmann, Raymond Kokaly, Martin Schodlok, Thomas H. Painter, Ferran Gascon, Fabrizia Buongiorno, Matti Mottus, Vittorio Ernesto Brando, Hannes Feilhauer, Matthias Betz, Simon Baur, Rupert Feckl, Anke Schickling, Vera Krieger, Michael Bock, Laura La Porta, and Sebastian Fischer. 2024. 'The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission: Initial Scientific Results Two Years after Launch'. *Remote Sensing of Environment* 315:114379. doi:[10.1016/j.rse.2024.114379](https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114379).

Galeazzi, Claudio, Andrea Sacchetti, Andrea Cisbani, and Gianni Babini. 2008. 'The PRISMA Program'. P. IV-105-IV-108 in *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Vol. 4.

Planet Labs. 2025. Tanager - Planet Documentation. <https://docs.planet.com/data/imagery/tanager/>.

Plant Water Retrieval (PWR) — LMU Vegetation Apps 0.1 documentation. n.d. Retrieved 28 October 2025. <https://enmap-box-lmu-vegetation-apps.readthedocs.io/en/latest/apps/PWR.html>.

Wocher, Matthias, Katja Berger, Martin Danner, Wolfram Mauser, and Tobias Hank. 2018. 'Physically-Based Retrieval of Canopy Equivalent Water Thickness Using Hyperspectral Data'. *Remote Sensing* 10(12):1924. doi:[10.3390/rs10121924](https://doi.org/10.3390/rs10121924).