



L'AGROMETEOROLOGIA PER LA TRANSIZIONE SOSTENIBILE E COMPETITIVA

Firenze, 17-19 Giugno 2026

A cura di Francesca Ventura, Gabriele Cola, Francesca Di Cesare

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari
Università di Bologna



ISBN 9788854972391

<https://doi.org/10.6092/unibo/amsacta/9000>

Comitato Scientifico

Simone Orlandini
Gabriele Cola
Marina Baldi
Carmelo Maucieri
Claudio Cassardo
Federico Spanna
Danilo Tognetti
Leonardo Verdi

Comitato organizzatore

Anna Dalla Marta
Andrea Carli
Giulia Galli
Marco Mancini
Marco Napoli
Giulia Pastacaldi
Antonio Pescatore
Leonardo Verdi

Segreteria Organizzativa

Simone Falzoi
Tiziana La Iacona
Irene Vercellino

Bologna, 2026



**XXVIII Convegno Nazionale
di Agrometeorologia**

L'AGROMETEOROLOGIA PER LA TRANSIZIONE SOSTENIBILE E COMPETITIVA

Firenze, 17-19 Giugno 2026

A cura di Francesca Ventura, Gabriele Cola, Francesca Di Cesare

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari

Università di Bologna



Fondazione
Osservatorio
Ximeniano
di Firenze - ETS



ACCADEMIA DEI GEORGOFILII



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE
DAGRI
DIPARTIMENTO DI SCIENZE
ALIMENTARI, AMBIENTALI E FORESTALI



FONDAZIONE
CR FIRENZE



CNR IBE
Istituto per la BioEconomia



Fondazione
Clima &
Sostenibilità

L'AGROMETEOROLOGIA PER LA TRANSIZIONE SOSTENIBILE E COMPETITIVA

SESSIONE 1 – Innovazione e tecnologie emergenti

Recenti sviluppi e prospettive per l'atmometro di livingston: materiali intelligenti e regolazione adattativa dell'evaporazione

Rallo G., Bonzi L., Dichio E., Hamouda F., Puig-Sirera A., Sbrana A.....1

Reti di sensori wireless integrate 5g-satcom per il monitoraggio dello stato idrico suolo-pianta e delle emissioni di gas serra

E. Dichio, L. Bonzi, S. Marasco, A. Puig-Sirera, D. Remorini, A. Sbrana, G. Scognamiglio, A. Vaccaro, G. Landi, G. Rallo 6

Validazione dell'evapotraspirazione simulata: osservazioni con Eddy-Covariance e modelli Hargreaves-Samani, Penman-Monteith e SEBAL

Andrea Coletti, Giovanni Cinque, Gabriele Curci..... 11

Analisi della dinamica annuale dello stato idrico del suolo in un luppoloeto mediante monitoraggio continuo: implicazioni per la gestione irrigua

Andrea Gramazio 14

PocketSTRESS: una nuova tecnologia mobile per stimare la conduttanza stomatica al fine di supportare la gestione dello stress idrico in vigneto

Chiara Rusconi, Roberto Confalonieri, Lucio Brancadoro, Martino Bolognini, Davide Bianchi, Chiara Marchetti, Gabriele Cola, Davide Facchinetti, Stefano Poni, Mattia Invernizzi, Livia Paleari.....18

Valutazione delle stime satellitari di evapotraspirazione mediante modellistica bayesiana dell'errore nelle misure: un'analisi multi-scenario in sistemi agrumicoli microirrigati

Gaetano Alessandro Vivaldi, Lorenzo E. Cigarra-Guñez, Octavio Lagos, Pasquale Steduto, Samuel G. Metcalf, Kristen Shapiro, Daniele Zaccaria.....23

SESSIONE 2 – Resilienza climatica nei sistemi agricoli e urbani

Sviluppo fenologico e accumulo di GDD in leguminose minori da granella nella pianura veneta

Gianluca Soranno, Wendy Carolina Vernaza Cartagena, Vittoria Giannini.....27

Valutazione dei servizi ecosistemici dei tetti verdi nella pianura veneta

Giampaolo Zanin, Alexandra M. Lugo-Arroyo, Silvia Locatelli, Maria Giordano, Carmelo Maucieri 31

Monitoraggio multi-scala di alberi di alto valore paesaggistico nell'ambito di variabilità climatica: il caso del giardino storico di Villa Demidoff (Firenze, Italia)

Zammarchi F., Pollastrini M., Carrari E., Kasraoui J., Argenti G., Costafreda-Aumedes S., Bartoloni N., Vannella M., Moriondo M., Dibari C......35

Valutazione dell'impatto dell'andamento meteorologico sull'epoca di fioritura del frumento tenero

Leonardo Verdi, Lorenzo Arcidiaco, Anna Dalla Marta, Simone Orlandini, Francesca Nardi, Patrizia Vaccino, Marco Mancini 41

Test della replicabilità del framework BEEadapt per valutare il rischio climatico per le farfalle

Marina Baldi, Dino Biancolini.....44

Governance delle emergenze nel dominio agrario, forestale e zootecnico: verso protocolli operativi e integrazione tra aziende, conoscenza e professioni.

Stefano Cesco, Lucia Bailoni, Pietro Buzzini, Monica Cairolì, Giuseppe Corti, Marco Marchetti, Giacomo Scarascia Mugnozza, Simone Orlandini, Fabrizio Mazzetto 47

Valutazione degli impatti microclimatici sulla fenologia e fisiologia del vitigno Timorasso tramite modellistica numerica avanzata

Claudio Cassardo, Valentina Andreoli, Federico Isnardi, Sandro Zilli 51

SESSIONE 3 – Agrometeorologia applicata

Caratterizzazione agroclimatica del vitigno cilieggiolo.

*Marco Mancini, Giulia Galli, Lorenzo Arcidiaco, Leonardo Verdi, Silvia Mangani, Giacomo Buscioni, Damiano Barbato, Simone Orlandini.....*56

Il bollettino mensile di agrometeorologia viticola della rivista L'Enologo

*Luigi Mariani, Simone Gabriele Parisi, Gabriele Cola.....*60

Impiego di dati climatici globali a supporto della previsione delle contaminazioni da aflatossine in Mais

*Balkova, D., Raj, R., Rieder, H., Camardo Leggieri, M., and Battilani, Paola*65

Ottimizzazione dell'irrigazione deficitaria del mais: il ruolo dei driver agrometeorologici nel trade-off tra resa e WUE

*Andrea Carli, Leonardo Verdi, Anna Dalla Marta.....*66

Stima dell'ET₀ con modelli di AI in aree climaticamente eterogenee e condizioni di dati limitati.

Giorgia Raimondi, Jacopo Bonato, Carmelo Maucieri 71

Previsione di scenari climatici futuri per la gestione sostenibile delle risorse idriche nel bacino del Bradano come misura di adattamento ai cambiamenti climatici

Silvano Fortunato Dal Sasso, Htay Htay Aung, Teresa Pizzolla, Emanuele Scalcione, Pietro Dichio, Bartolomeo Dichio 75

Da prototipo di ricerca a infrastruttura territoriale istituzionale: il sistema di supporto alle decisioni IRRITRE per la gestione dell'irrigazione a livello di consorzio irriguo

Fabio Zottele, Cecilia Mattedi, Francesco Centurioni, Pietro Franceschi, Stefano Corradini, Fabio Antonelli, Francesca Paolucci, Alessandra Gattolin..... 80

Monitoraggio microclimatico distribuito in vigneto mediante rete di sensori wireless

Irene Cappelli, Ada Fort, Marco Tani, Valerio Vignoli..... 84

POSTER

- Analisi della risposta fenologica della vite alla variabilità termica interannuale:
applicazione dell'indice di Huglin nel bacino viticolo del Tortonese
Valentina Andreoli, Claudio Cassardo 89
- Uso delle immagini satellitari per il monitoraggio dello stato idrico delle colture:
un caso studio sulla soia con i satelliti Planet e Sentinel-2
*Alessia Bado, Francesco Morbidini, Carlo Camarotto, Carmelo Maucieri,
Giovanni Trevisanuto, Irene Terlizzi, Carlo Bettanini, Federico Toson,
Sebastiano Chiodini, Giacomo Colombatti, Maurizio Borin 93*
- Valutazione dell'attitudine alla viticoltura nell'Oltrepò Pavese: integrazione di
analisi multiscala in diversi scenari climatici
*Uta Biino, Federico Amari, Vanna Sale Maria, Eliana Tonelli, Lorenzo
Craveri, Valentina Mereu, Antonio Trabucco, Marta Debolini, Serena
Marras, Emanuela Serra, Donatella Spano, Massimiliano Bordoni, Amin
Ghezavati Nezhad, Claudia Meisina 98*
- La portata online dell'agrometeorologia nella gestione e nella resilienza
dell'agricoltura di fronte agli scenari di cambiamento climatico
*Orivaldo Brunini, Angelica Prella Pantano, Antônio Arantes O Roque,
Paulo Cesar Reco, Andrew Patrick Ciarelli Brunini, Surrender Singh... 103*
- Analisi delle disponibilità bioclimatiche nelle aree olivicole della regione Abruzzo
*Bruno Di Lena, Domenico Giuliani, Fabio Pietrangeli Nadia Di
Bucchianico 107*
- Risposte fisiologiche di *Quercus suber* L. a endoterapia e applicazione fogliare con
fosfonato di potassio in condizioni di deperimento associato a *Phytophthora
Cinnamomi*
*Ana Fernandes de Oliveira, Massimiliano Giuseppe Mameli, Salvatore
Seddaiu, Giuseppino Pira, Bruno Scanu, Luca Sarais, Pino Angelo Ruii,
Daniela Satta.....110*

Dalla frammentazione dei dati all'intelligenza agronomica: una proposta piattaforma unificata per la sintesi di informazioni multi-sorgente <i>Desta Gebre Gebremedhin, Daniele Andreis, Fabio Zottele, Cecilia Mattedi, Francesco Centurioni, Stefano Corradini.....</i>	115
Analisi termopluviometrica dello stato di San Paolo, Brasile, dal 2000 al 2025: oltre due decenni di dati climatici <i>Angelica Praela-Pantano, Orivaldo Brunini, Jane Maria Silveira de Carvalho, Romilson Moraes Yamamura, Elizandra C. Gomes, Humberto Ribeiro Rocha.....</i>	118
Gestione sostenibile del suolo in un ambiente mediterraneo: approcci agroecologici in un esperimento di lungo termine in Toscana (Italia) <i>Margherita Santoni, Anita Maienza, Francesco Serafini, Ottorino-Luca Pantani, Lorenzo Ferretti, Carlo Viti, Matteo Daglio, Filippo Gallese, Tanguy Labaeye, Gaio Cesare Pacini</i>	122

RECENT DEVELOPMENTS AND PROSPECTS FOR THE LIVINGSTON ATMOMETER: SMART MATERIALS AND ADAPTIVE REGULATION OF EVAPORATION

RECENTI SVILUPPI E PROSPETTIVE PER L'ATMOMETRO DI LIVINGSTON: MATERIALI INTELLIGENTI E REGOLAZIONE ADATTATIVA DELL'EVAPORAZIONE

Rallo G.*, Bonzi L., Dichio E., Hamouda F., Puig-Sirera A., Sbrana A.

¹ AgroHydrological Sensing and Modelling Laboratory (AgrHySMo), Department of Agriculture, Food and Environment (DAFE), University of Pisa, Italy
*giovanni.rallo@unipi.it

Abstract

This paper introduces an adaptive atmometer designed to estimate actual evapotranspiration from vegetated surfaces under varying soil water availability. The system incorporates a water reservoir, a porous ceramic plate, an external Green Canvas fabric, and a thermo-responsive functional layer that adjusts vapour-flow resistance in accordance with soil water conditions. Regulation is governed by a water-stress function that transforms volumetric soil water content into an actuation temperature for the smart material. In non-limiting soil water content, the evaporating surface has low resistance; in deficit conditions, resistance increases and vapour flux diminishes. The theoretical findings suggest that the device can mimic stomatal responses and provide an estimate of actual crop water consumption that aligns more closely with passive atmometers. Discussions on thermal constraints, material requirements, and future advancements are also presented.

Parole chiave:

evapotraspirazione reale; atmometro intelligente; tessuti intelligenti; stress idrico

Keywords:

actual evapotranspiration; smart atmometer; smart fabrics; water stress

Introduzione

La stima dell'evapotraspirazione reale di una superficie vegetata rappresenta un passaggio cruciale per la gestione irrigua di precisione, soprattutto quando l'obiettivo non è soltanto quantificare la domanda evaporativa dell'atmosfera, ma anche valutare il consumo idrico effettivo della coltura in condizioni di disponibilità idrica variabile. Gli approcci più diffusi (Allen et al., 1998) partono dalla stima dell'evapotraspirazione di riferimento e applicano successivamente i coefficienti culturali e di stress idrico. Pur essendo consolidata sul piano operativo, questa procedura mantiene una componente empirica rilevante, poiché i coefficienti devono essere adattati a specie, fasi fenologiche, condizioni pedoclimatiche e strategie irrigue spesso diverse da quelle in cui sono stati originariamente determinati.

L'atmometro di tipo Livingston, nelle sue configurazioni moderne, rappresenta una soluzione semplice e robusta per descrivere la domanda evaporativa atmosferica. Tuttavia, la superficie evaporante degli atmometri convenzionali (ET-gage, Inc.) ha un comportamento prevalentemente passivo: il tessuto esterno può riprodurre in modo soddisfacente alcune proprietà radiative di una superficie vegetale ben idratata, ma la sua resistenza al passaggio del vapore rimane costante. Di conseguenza, lo strumento descrive correttamente una condizione non limitante, ma non riesce a rappresentare la progressiva riduzione della traspirazione che si verifica quando il contenuto idrico del suolo diminuisce.

L'idea centrale è realizzare un analogo fisico della regolazione stomatica, in grado di riprodurre l'effetto dello stress idrico sulla traspirazione.

Il contributo presenta una formulazione scientifica del dispositivo, ricostruendone l'architettura, il principio di funzionamento, le relazioni di trasporto e la logica di regolazione dello strato funzionale. L'analisi è sviluppata a partire dal brevetto US Patent 11,860,147 B2 (Rallo, 2024), con l'obiettivo di tradurre il contenuto tecnico in un quadro metodologico idoneo alla discussione scientifica.

Materiali e Metodi

Il sistema è interpretato come un atmometro adattativo, in cui il trasferimento di vapore acqueo verso l'atmosfera dipende dall'interazione tra le condizioni meteorologiche, la disponibilità idrica del suolo e la resistenza interna della superficie evaporante. La grandezza osservata è la quantità d'acqua trasferita nell'atmosfera nel tempo, stimata dalla variazione del livello idrico nel serbatoio. La grandezza controllata è invece la resistenza al passaggio del vapore attraverso lo strato funzionale dell'evaporatore, regolata in funzione del contenuto idrico volumetrico del suolo (swc). Il collegamento tra la misura del suolo e la risposta dello strumento costituisce il principio operativo del dispositivo: quando il suolo è in condizioni idriche favorevoli, la resistenza diminuisce; quando il suolo entra in deficit idrico, la resistenza aumenta, limitando

il flusso di vapore in modo analogo alla chiusura stomatica nelle piante.

Lo strumento è costituito da un serbatoio in continuità idraulica con una superficie evaporante. La riserva idrica alimenta una piastra porosa in ceramica (PP) in cui l'acqua si muove ancora in fase liquida. Al di sopra della piastra si sviluppa il dominio di scambio in fase vapore, costituito da uno strato funzionale intelligente e da un tessuto esterno Green Canvas (GC), esposto direttamente all'atmosfera (Hetzel, 1995). Il Green Canvas ha la funzione di rendere la superficie evaporante confrontabile, per comportamento radiativo e fluidodinamico, con una coltura di riferimento con albedo prossima a 0,2 e resistenza al vapore nell'intervallo indicativo di 70-100 s m⁻¹.

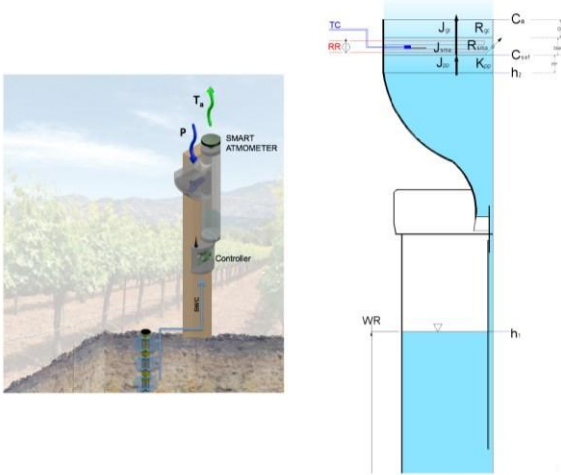


Fig. 1 - Schema CAD dell'atmometro intelligente e dettaglio della parte attiva del sistema

Fig. 1 - CAD of the smart anemometer and detail of the active part of the system

La componente adattativa è introdotta dallo strato intelligente (SMA), costituito da un materiale polimerico sensibile agli stimoli termici (Azra et al., 2015). Nel caso, il riferimento è a un tessuto trattato con un microgel poly-NiPAAm/chitosan, capace di imprimere una deformazione delle fibre e, di conseguenza, una variazione della resistenza al vapore acqueo in risposta alla temperatura indotta, T_{ind} (Križman Lavrič et al., 2012). In particolare, quando la temperatura dello strato raggiunge valori tali da attivare il polimero, la configurazione interna del materiale cambia e, con essa, varia la resistenza al passaggio del vapore (R_{SMA}). In termini agronomici, questo strato assume quindi il ruolo funzionale di una resistenza stomatica artificiale.

L'eccitazione termica avviene tramite una resistenza elettrica riscaldante (RR) solida e una termocoppia miniaturizzata (TC). La resistenza elettrica genera lo stimolo termico necessario ad attivare la risposta del materiale, mentre la termocoppia misura la temperatura effettiva dello strato funzionale. L'unità di controllo utilizza questo feedback per mantenere lo strato alla temperatura di riferimento e, di conseguenza, al corrispondente livello di resistenza al trasporto del vapore. Tale temperatura non è impostata in modo arbitrario, bensì definita in funzione dello stato idrico del suolo, interpretato dalla funzione di stress idrico (Fig. 2) della coltura

(Rallo e Provenzano, 2013) che traduce infatti il valore di swc in un coefficiente di stress idrico, α .

Il funzionamento complessivo può essere letto come una sequenza integrata di misura, controllo e attuazione. Il sensore di umidità rileva lo stato idrico del suolo; l'unità di controllo elabora questa informazione e stabilisce lo stimolo da applicare allo strato intelligente; la resistenza elettrica genera la variazione termica richiesta; il materiale funzionale modifica la propria resistenza al flusso di vapore acqueo e, di conseguenza, la resistenza al passaggio del vapore acqueo.

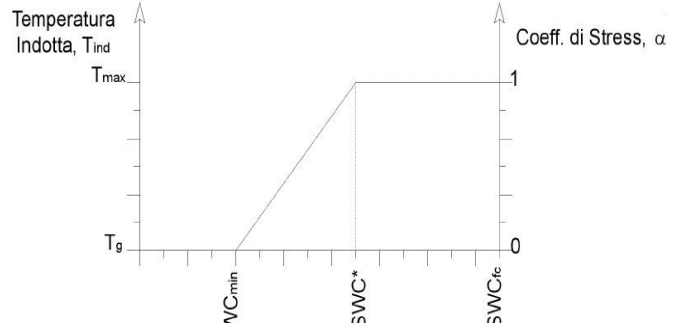


Fig. 2 - Schema della funzione di stress idrico e di temperatura indotta nel tessuto

Fig. 2 – Crop water stress and induced temperature function

La diminuzione del livello idrico nel serbatoio consente, infine, di quantificare il flusso d'acqua effettivamente trasferito nell'atmosfera.

Il moto dell'acqua nella piastra porosa può essere descritto mediante una formulazione monodimensionale di tipo Darcy (1856). Il flusso dipende dalla conducibilità idraulica della piastra, dalla differenza di potenziale tra la parte inferiore e quella superiore del mezzo poroso e dallo spessore attraversato:

$$J_{PP} = K_{PP} \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (1)$$

dove J_{PP} è il flusso nella piastra porosa, K_{PP} è la conducibilità idraulica, Δh è la differenza di potenziale e Δx è lo spessore del mezzo poroso. Il pelo libero della riserva idrica definisce la condizione al contorno inferiore: in una configurazione assimilabile a un serbatoio standard, il potenziale idrico alla base della piastra varia da circa 0 kPa (serbatoio pieno) a circa -5 kPa (serbatoio vuoto). Una volta raggiunta l'interfaccia superiore della piastra, l'acqua passa allo stato di vapore e attraversa gli strati posti in serie: lo strato intelligente, il tessuto Green Canvas e lo strato limite atmosferico. In condizioni stazionarie, il flusso massico di vapore può essere espresso come rapporto tra il gradiente di concentrazione di vapore e la somma delle resistenze al trasporto:

$$J = \frac{\Delta C}{R_{SMA} + R_{GC} + R_{BL}} \quad (2)$$

dove DC è la differenza di concentrazione di vapore acqueo tra la base dello strato intelligente, idealmente prossima alla

saturazione, e l'atmosfera; R_{SMA} è la resistenza al trasporto del vapore acqueo indotta dallo strato intelligente; R_{GC} è la resistenza del tessuto Green Canvas; R_{BL} è la resistenza dello strato limite al di sopra della superficie evaporante. Il legame tra lo stato idrico del suolo e la risposta del materiale è descritto da una funzione di stress idrico $\alpha(swc)$ (Fig. 2), variabile tra 0 e 1. Quando il contenuto idrico del suolo è superiore alla soglia critica swc^* , la coltura è considerata in condizioni non limitanti e α tende a 1; in questa fase la resistenza aggiuntiva dello strato intelligente è minima e il flusso è governato prevalentemente dalla domanda atmosferica. Quando invece swc scende al di sotto di swc^* , α diminuisce e il sistema aumenta progressivamente la resistenza al passaggio del vapore. In prossimità del contenuto idrico minimo, la resistenza assume valori elevati, a indicare la marcata riduzione della traspirazione osservata in condizioni di stress severo.

La relazione operativa tra funzione di stress e temperatura indotta nello strato funzionale è:

$$T_{ind} = T_g + \alpha T_g + \alpha T_x \quad (3)$$

dove T_g è la temperatura di attivazione del polimero, T_x è la temperatura del tessuto associata alla condizione di stress incipiente e α è il coefficiente di stress idrico.

Risultati e discussione

La risposta funzionale del dispositivo dipende dalla capacità di trasformare una variazione dello stato idrico del suolo in una variazione controllata della resistenza al trasferimento del vapore acqueo. Nel sistema considerato, questa regolazione è affidata allo strato intelligente, la cui resistenza al flusso di vapore acqueo in funzione delle condizioni termoisometriche indotte nel tessuto. Quando la temperatura del mezzo viene modificata fino a raggiungere la temperatura indotta T_{ind} , anche l'umidità relativa dell'aria interna al tessuto cambia. In prima approssimazione, assumendo un gradiente igrometrico lineare, l'umidità relativa indotta può essere stimata come la media tra una condizione prossima alla saturazione, localizzata all'interfaccia tra la piastra porosa e lo strato intelligente, e l'umidità relativa dell'atmosfera esterna. Pertanto, la resistenza R_{SMA} può essere interpretata come funzione del deficit di pressione di vapore indotto nel tessuto, VPD_{ind} .

Nel caso del tessuto in cotone funzionalizzato con microgel poly-NiPAAm/chitosan, già studiato da Lavrič et al. (2012), la documentazione tecnica mostra (Fig. 3) una relazione tra $R_{SMA}(VPD_{ind})$ di tipo potenza, indicando che il materiale è in grado di coprire un ampio intervallo di resistenze al flusso di vapore acqueo con una variazione relativamente contenuta delle condizioni termoisometriche interne.

Il dominio operativo riportato per questo tessuto comprende temperature interne comprese tra circa 25 e 47 °C e una temperatura di transizione del materiale (T_g) intorno a 30 °C. Questo valore rappresenta un elemento critico della progettazione, poiché la funzionalità del materiale dipende dal regime termico iniziale della superficie evaporante. Se il tessuto si trova a una temperatura prossima o superiore alla

soglia di attivazione, la regolazione può essere ottenuta mediante un riscaldamento controllato. Se invece il sistema parte da una temperatura inferiore alla soglia richiesta, l'attuazione potrebbe richiedere un raffreddamento, una soluzione poco compatibile con uno strumento da campo a basso consumo. Il limite non invalida il principio di funzionamento, ma indica che la scelta del materiale e della sua temperatura di attivazione deve essere coerente con il regime termico effettivo della superficie evaporante.

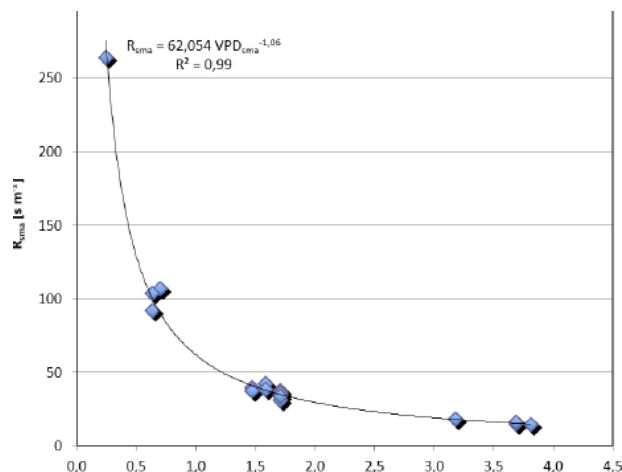


Fig. 3. Relazione tra la resistenza al flusso di vapore acqueo del tessuto funzionale e il deficit di pressione di vapore indotto

Fig. 3 - Relationship between the vapour resistance of the functional fabric and the induced vapour pressure deficit

La Fig. 4 mostra i risultati di una prima applicazione triennale condotta tra il 2009 e il 2011, basata sul confronto tra i valori di WVP rilevati dal sistema e i flussi traspirativi giornalieri T_a misurati tramite sonde TDP (Granier, 1985). Inoltre, si riportano gli andamenti del contenuto idrico volumetrico misurato con il sistema TDR (Campbell Scientific, Inc.) e del VPD atmosferico.

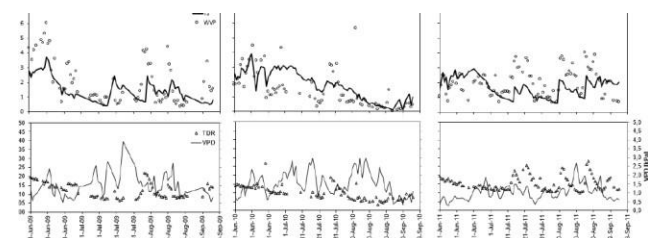


Fig. 4 Dinamiche temporali dei flussi traspirativi reali e misurati con l'atmometro intelligente. In basso, l'andamento del deficit di pressione di vapore e del contenuto idrico del suolo

Fig. 4 – Temporal dynamics of actual transpiration fluxes and fluxes measured with the smart atmometer. The lower panels show the dynamics of the vapour pressure deficit and the soil water content.

L'analisi mostra che la risposta del sistema varia in funzione del contenuto idrico del suolo. Quando swc è superiore al contenuto idrico critico swc^* (Rallo e Provenzano, 2013), la risposta dello strumento rimane prevalentemente controllata dal deficit di pressione di vapore atmosferico. In queste condizioni, il suolo non limita in modo sostanziale la traspirazione e il flusso è quindi guidato soprattutto dalla domanda evaporativa dell'atmosfera.

Quando invece $swc < swc^*$, il flusso WVP misurato col dispositivo non riproduce soltanto l'evaporazione potenziale, ma introduce anche una limitazione fisica al flusso, coerente con la riduzione della traspirazione osservata nelle piante in condizioni di stress idrico.

La relazione tra R_{SMA} e swc conferma il ruolo dello strato intelligente come resistenza stomatica artificiale. Il tessuto considerato nella simulazione consente di raggiungere valori di resistenza superiori a 100 s m^{-1} , indicati nella documentazione come l'ordine di grandezza della resistenza minima di una coltura di riferimento, come l'erba medica. A tale livello resistivo, come discusso anche nel confronto con l'atmometro controllato da Ranjan (2012), il flusso risulta ancora prevalentemente dipendente dallo stato idrico dell'atmosfera. Per valori di resistenza più elevati, invece, il flusso diventa progressivamente condizionato anche dallo stato idrico del suolo.

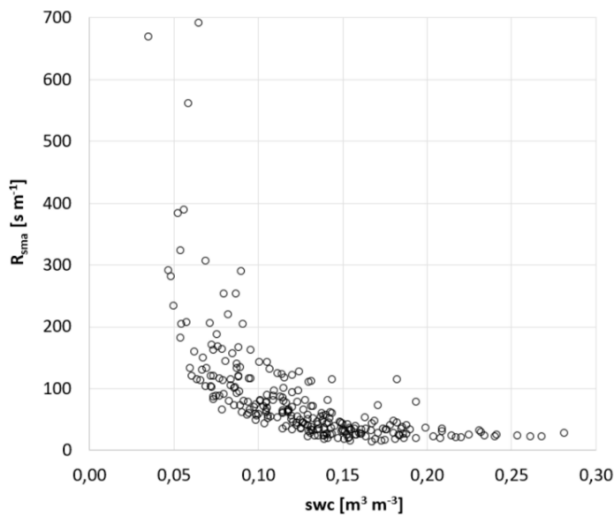


Fig. 5 - Relazione tra resistenza al flusso di vapore del tessuto intelligente e contenuto idrico del suolo

Fig. 5 – Relationship between the vapour resistance of the smart fabric and soil water content

Il principale miglioramento rispetto agli atmometri passivi consiste nella possibilità di trasferire l'informazione sullo stato idrico del suolo alla superficie evaporante, mediante una variazione fisica della resistenza al flusso di vapore acqueo. In un atmometro tradizionale, il flusso è principalmente influenzato dalle condizioni atmosferiche e dalla resistenza fissa del tessuto. Nel dispositivo adattativo, invece, il contenuto idrico del suolo funge da variabile di regolazione: in assenza di limiti, la resistenza rimane bassa, ma in caso di deficit aumenta, riducendo il flusso verso l'atmosfera. La misura ottenuta dalla diminuzione del livello dell'acqua nel

serbatoio è quindi più rappresentativa dell'evapotraspirazione reale, poiché tiene conto sia della domanda atmosferica sia della disponibilità idrica del suolo.

Resta tuttavia un limite importante legato all'uso di materiali *thermally driven*. La relazione tra la temperatura effettivamente indotta nel tessuto e il contenuto idrico del suolo mostra che, per un materiale caratterizzato da una determinata temperatura di attivazione T_g , esiste un intervallo di condizioni in cui il sistema potrebbe reagire correttamente solo mediante il raffreddamento. La temperatura effettivamente indotta è, infatti, data dalla differenza tra la temperatura richiesta dal controllo e la temperatura iniziale del mezzo, assunta, in prima approssimazione, come quella dell'aria. Questa assunzione introduce una semplificazione, ma consente comunque di evidenziare un vincolo progettuale reale: il materiale deve avere una soglia di attuazione compatibile con le temperature normalmente raggiunte dalla superficie evaporante in campo.

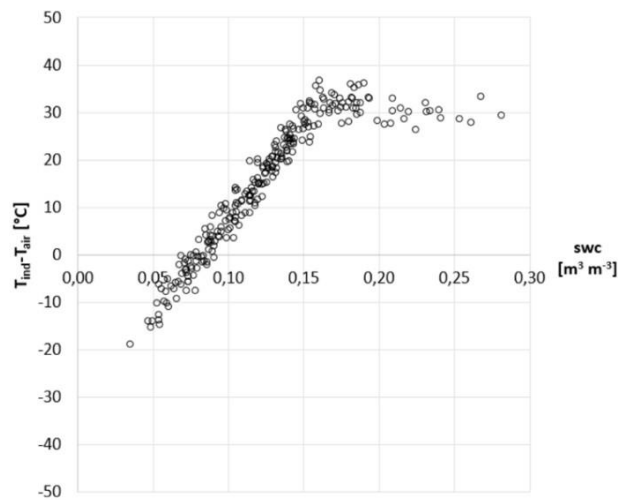


Fig. 6 - Relazione tra temperatura effettivamente indotta al tessuto e contenuto idrico del suolo

Fig. 6 - Relationship between the actual temperature induced in the tissue and the soil moisture content

Considerazioni finali e sviluppi futuri

L'esperienza descritta in questo lavoro consente di trarre due considerazioni principali. La prima riguarda la validità del principio fisico: la regolazione della resistenza al flusso di vapore acqueo mediante uno strato poroso intelligente consente di rappresentare la dinamica di riduzione del flusso di vapore in relazione alla risposta della coltura al deficit idrico del suolo. La seconda riguarda la maturità tecnologica della soluzione: affinché il dispositivo possa diventare uno strumento affidabile in pieno campo, il materiale funzionale deve essere progettato per operare entro un intervallo di regolazione termica compatibile con il bilancio energetico reale della superficie evaporante. In particolare, occorre evitare condizioni in cui il controllo richieda un raffreddamento attivo, una soluzione poco sostenibile per un dispositivo agrometeorologico a basso consumo energetico.

L'impiego di polimeri termo-responsivi costituisce quindi una soluzione efficace per dimostrare il concetto, ma non

necessariamente la configurazione finale più robusta. La dipendenza dalla temperatura di attuazione rappresenta infatti un vincolo progettuale rilevante: lo stesso stimolo termico che modifica la resistenza al flusso di vapore acqueo del materiale può alterare lo stato igrometrico locale e, di conseguenza, il gradiente naturale di vapore che rappresenta la forza motrice del processo di scambio di massa. Per questo motivo, gli sviluppi futuri si orientano verso materiali attivabili con stimoli elettrici a bassa potenza, capaci di modificare la resistenza al flusso di vapore acqueo attraverso variazioni controllate del diametro dei pori, dello spessore e della tortuosità del mezzo, riducendo al minimo l'interferenza termica sul processo evaporativo.

Questa traiettoria è coerente con gli sviluppi più recenti della ricerca, orientati verso dispositivi bioispirati capaci di rappresentare in modo più realistico l'interazione tra la disponibilità idrica del suolo, la domanda atmosferica e la risposta della superficie evaporante. In questa prospettiva, l'atmometro adattativo discusso in questo lavoro può essere considerato un primo passo verso sistemi in cui il flusso non sia soltanto misurato, ma anche fisicamente regolato da variabili ambientali e idrauliche osservabili.

Gli sviluppi futuri potranno quindi riguardare superfici evaporanti più evolute, materiali attivi a basso consumo e architetture di controllo in grado di modulare con maggiore precisione sia la resistenza al passaggio del vapore sia le condizioni interne che alimentano il processo evaporativo. Senza entrare nei dettagli costruttivi, l'obiettivo sarà passare da una regolazione principalmente termica a soluzioni più stabili, meno invasive sul bilancio energetico locale e più direttamente controllabili in funzione dello stato idrico del sistema suolo-cultura-atmosfera.

A livello sperimentale, il primo sviluppo necessario consiste nella caratterizzazione controllata del materiale funzionale. Occorrerà quantificare, in camera climatica, la relazione tra temperatura del tessuto, umidità relativa interna, VPD_{ind} e resistenza R_{SMA} , verificando l'eventuale presenza di isteresi, di deriva temporale e di sensibilità al bagnamento. Un secondo passaggio riguarderà la calibrazione della funzione di stress $\alpha(swc)$ per specifiche combinazioni coltura-suolo, distinguendo tra condizioni non limitanti, stress incipiente e stress severo. Infine, sarà necessario confrontare il segnale prodotto dal dispositivo con misure indipendenti della traspirazione o del flusso linfatico, così da valutare se l'atmometro adattativo sia realmente rappresentativo del consumo idrico della coltura.

In prospettiva, il dispositivo può essere interpretato come il primo livello di una piattaforma più ampia per la misura fisica della traspirazione reale. La configurazione termoresponsiva discussa in questo lavoro dimostra la possibilità di modulare la resistenza al flusso di vapore acqueo in funzione dello stato idrico del suolo; gli sviluppi successivi potranno estendere questo principio a sistemi più robusti, nei quali la risposta della superficie evaporante sia più stabile, ripetibile e meno dipendente dalle condizioni termiche esterne.

Nel complesso, i risultati teorici indicano che l'atmometro adattativo può rappresentare una piattaforma promettente per la misura dei flussi evapotraspirativi reali, soprattutto nei

contesti in cui la disponibilità idrica del suolo è il principale fattore limitante.

La sua utilità non risiede soltanto nella misura del volume d'acqua evaporato, ma anche nella possibilità di rendere tale misura dipendente da una risposta fisica controllata, ispirata al comportamento stomatico. La sfida futura sarà trasformare questa impostazione da prova di concetto a un sistema robusto, validato e trasferibile, capace di operare in campo con bassa manutenzione, ridotto consumo energetico e adeguata stabilità metrologica.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato sviluppato nell'ambito delle attività di valorizzazione e di trasferimento tecnologico promosse dall'Università di Pisa. Lo sviluppo del dimostratore tecnologico e la brevettazione sono stati finanziati dall'Università di Pisa attraverso il Bando per il finanziamento di dimostratori tecnologici del 2022 e hanno beneficiato del percorso di tutela e promozione della proprietà intellettuale sostenuto dal Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT), nell'ambito dell'Intellectual Property Award 2023.

Bibliografia

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.
- Azra, C., Alhazov, D., Zussman, E. (2015). Effect of polymer nanofibers thermoelasticity on deformable fluid-saturated porous membrane. *Polymer*, 58, 162–169.
- Campbell Scientific, Inc. (s.d.). *TDR100 Time-Domain Reflectometer*. Campbell Scientific, Logan, Utah.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Victor Dalmont, Paris.
- Granier, A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, 42(2), 193–200.
- Hetzel, H.T. (1995). *Atmometer covering and method*. US Patent 5,389,311.
- Lavrič, P., Warmoeskerken, M.M.C.G., Jocić, D. (2012). Functionalization of cotton with poly-NiPAAm/chitosan microgel. Part I: Stimuli-responsive moisture management properties. *Cellulose*, 19, 257–271.
- Rallo, G. (2024). *System for the determination of the real evapotranspiration of a vegetated surface*. US Patent 11,860,147 B2.
- Rallo, G., Provenzano, G. (2013). Modelling eco-physiological response of table olive trees (*Olea europaea* L.) to soil water deficit conditions. *Agricultural Water Management*, 120, 79–88.
- Ramanathan Sri Ranjan. (2012). Patent No.: US 8,205,486 B2. CA2694399 (A1) – Plant-controlled atmometer for measuring crop evapotranspiration.

INTEGRATED 5G-SATCOM WIRELESS SENSOR NETWORKS FOR SOIL-PLANT WATER STATUS AND GHG EMISSION MONITORING

RETI DI SENSORI WIRELESS INTEGRATE 5G-SATCOM PER IL MONITORAGGIO DELLO STATO IDRICO SUOLO-PIANTA E DELLE EMISSIONI DI GAS SERRA

E. Dichio^{1*}, L. Bonzi¹, S. Marasco¹, A. Puig-Sirera¹, D. Remorini¹, A. Sbrana¹, G. Scognamiglio², A. Vaccaro², G. Landi³, G. Rallo¹

¹ AgroHydrological Sensing and Modelling Laboratory (AgrHySMo), Department of Agriculture, Food and Environment (DAFE), University of Pisa, Italy

² M.B.I. S.r.l., Via Francesco Squartini, n° 7, 56121, Pisa (PI), Italy

³ Nextworks S.r.l., Via Livornese, 1027, 56122, San Piero A Grado (PI), Italy

*emanuele.dichio@phd.unipi.it

Abstract

This study details an integrated Wireless Sensor Network (WSN) combining private 5G and satellite backhaul for environmental monitoring in agriculture. Designed for areas with variable production and limited connectivity, it supports data collection, edge processing, and cloud analytics. Custom ESP32-LoRa sensor nodes measure soil moisture, plant water stress, microclimate, and gases like CO₂, CH₄, and NH₃ in crops and livestock. Private 5G enables real-time anomaly alerts and management actions, while satellite backhaul ensures data flow in remote regions. The system can integrate ground and Earth Observation data, offering a scalable, resilient framework for water, air quality, and environmental monitoring in climate-smart farming.

Parole chiave

5G-satcom, Reti di Sensori Wireless (WSN), Stress idrico, Monitoraggio gas serra (GHG)

Keywords

5G-satcom, Wireless Sensor Network (WSN), Crop Water Stress, Greenhouse Gas (GHG) monitoring

Introduzione

La variabilità climatica e la mitigazione degli impatti ambientali richiedono sistemi di monitoraggio continui e affidabili. Il controllo dello stato idrico del continuum suolo-pianta-atmosfera e il rilievo dei gas serra (CO₂, CH₄, NH₃) rappresentano sfide prioritarie per l'agricoltura di precisione. Le Reti di Sensori Wireless (WSN) acquisiscono questi dati ad alta frequenza, ma la loro efficacia in aree rurali è spesso limitata dalla scarsa copertura di rete. L'integrazione tra WSN, 5G e comunicazioni satellitari (SatCom) supera tale limite, garantendo continuità, trasmissione in tempo reale ed elaborazione distribuita tra edge e cloud (Haq et al., 2024). Questo lavoro analizza un'architettura WSN-5G-SatCom, sviluppata nel progetto 5G-HOSTS-SAT, declinata in due tipologie di Customer Premises Equipment (CPE): CPE-tipo 1 (nodi LoRa connessi a un gateway 5G) e CPE-tipo 2 (nodi stand-alone con 5G integrato). Sebbene valutate indipendentemente in questa fase, l'evoluzione del sistema è orientata verso la CPE di tipo 2 per massimizzare l'autonomia, la bassa latenza e la scalabilità. L'obiettivo è dimostrare come la sinergia tra questi livelli tecnologici ottimizzi l'irrigazione, abiliti il rilevamento tempestivo di condizioni critiche e supporti la gestione sostenibile e il reporting ambientale.

Materiali e Metodi

Il presente lavoro si inserisce nel progetto 5G-HOSTS-SAT, promosso nell'ambito delle iniziative dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) dedicate alla validazione di architetture ibride 5G-SatCom in condizioni operative reali, con particolare attenzione alla continuità del servizio in aree rurali o scarsamente servite da infrastrutture terrestri. In questo contributo, l'architettura viene applicata a due scenari agroambientali: il monitoraggio esperto dello stato idrico suolo-pianta e il monitoraggio, attualmente in fase di sviluppo, delle emissioni e della qualità dell'aria in sistemi agro-zootecnici e agrosilvopastorali.

L'architettura di trasmissione dati integra rete 5G, elaborazione edge, backhaul satellitare e servizi cloud. La 5G RAN collega i dispositivi di campo a un core locale, dove le applicazioni edge eseguono una prima elaborazione a bassa latenza per il monitoraggio IoT e il controllo degli attuatori. Il collegamento satellitare assicura l'interconnessione tra i nodi locali e la rete cloud centralizzata, dedicata ad analisi e dashboard. L'infrastruttura supporta il network slicing (Enhanced Mobile Broadband e Massive Machine-Type Communications) per garantire comunicazioni scalabili e affidabili negli scenari di agricoltura di precisione.

All'interno di questa architettura sono state considerate due configurazioni di CPE, adeguate ai diversi requisiti dei casi d'uso agroambientali. La CPE-tipo 1 rappresenta una configurazione gerarchica, in cui i nodi WSN acquisiscono le misure in campo e le trasmettono tramite LoRa a un gateway locale, che a sua volta è connesso alla rete 5G-SatCom. La CPE-tipo 2 rappresenta invece l'evoluzione verso nodi stand-alone, nei quali sensing, pre-elaborazione

locale e connettività 5G sono integrati direttamente nel dispositivo. In questo modo, la seconda configurazione riduce la dipendenza da gateway intermedi e risulta più adatta a scenari distribuiti, scalabili e multisito, come il monitoraggio delle emissioni e della qualità dell'aria.

I nodi delle reti di sensori sono stati sviluppati presso l'Agro-Hydrological Sensing and Modelling Laboratory dell'Università di Pisa, in collaborazione con MBI (www.mbigroup.com), secondo una logica modulare e open-source. Con riferimento alla CPE-1, il disegno delle schede elettroniche è stato realizzato con EASYEDA (easyeda.com), consentendo l'acquisizione di segnali digitali e analogici e il controllo di attuatori IoT.

I sensori sono stati calibrati secondo protocolli ufficiali di laboratorio. In particolare, la calibrazione dei sensori di contenuto idrico del suolo è stata condotta secondo la procedura descritta da Rallo et al. (2024), utilizzando campioni di suolo indisturbati. Lo stress idrico della coltura è stato stimato mediante il Crop Water Stress Index secondo l'approccio classico proposto da Idso et al. 1981, utilizzando la temperatura della chioma misurata, una temperatura di riferimento non stressata e una di riferimento stressata. La temperatura della chioma non stressata è stata assunta pari alla temperatura misurata sulla canvas verde dell'atmometro (Katimbo et al., 2022), mentre la temperatura di riferimento stressata è stata stimata sommando 5 °C alla temperatura dell'aria.

Un codice in Python è stato sviluppato su precedenti set di dati relativi a vigneti e implementato su un'infrastruttura cloud per consentire l'autocalibrazione e il controllo adattivo dell'irrigazione. In particolare, un algoritmo opportunistico ha inoltre utilizzato i dati del sensore Drill & Drop per identificare due soglie chiave di umidità del suolo: la capacità di campo (SWC_{fc}) e una soglia critica fisiologica (SWC*), definita come il contenuto idrico del suolo al quale inizia la chiusura degli stomi. Preliminarmente, i dati grezzi sono stati filtrati con un filtro a media mobile e analizzati tramite una derivata temporale discreta per stimare l'esaurimento dell'acqua nel suolo tra 10 e 60 cm di profondità, distinguendo tra le fasi di apporto idrico (pioggia o irrigazione) e di assorbimento idrico radicale. In particolare, SWC_{fc} viene identificato dopo un evento di irrigazione o di pioggia abbondante, quando la derivata prima della dinamica temporale dell'umidità del suolo raggiunge il massimo, indicando la transizione dalla percolazione all'infiltrazione (Polak e Wallach, 2001; Thompson et al., 2007).

La topologia della WSN è stata ottimizzata utilizzando mappe della conducibilità elettrica apparente del suolo, ottenute con il sensore a induzione elettromagnetica EM38 (Geonics Inc.), al fine di individuare aree omogenee e rappresentative per il posizionamento dei nodi.

Il secondo scenario riguarda il monitoraggio delle emissioni di gas e della qualità dell'aria, un'attività attualmente in fase di sviluppo all'interno del progetto. In tale scenario si considera una configurazione CPE di tipo 2. Tale configurazione è pensata per il monitoraggio distribuito di CO₂, CH₄ e NH₃ in stalle, pascoli e sistemi agrosilvopastorali. La

Fig. 1 dettaglia l'architettura applicativa prevista per questo caso d'uso, nei quali i nodi autonomi CPE-tipo 2 acquisiscono misure in situ e le trasmettono direttamente alla rete 5G. I dati vengono quindi inviati a una Local Processing Unit, dove possono essere eseguite operazioni preliminari di controllo della qualità, di filtraggio, di armonizzazione temporale e di rilevamento di anomalie.

Il backhaul satellitare collega il dominio locale al centro di controllo e al cloud, garantendo continuità operativa anche in aree rurali con connettività terrestre limitata.

Nell'ambito del progetto è inoltre prevista, come sviluppo successivo e non oggetto specifico del presente lavoro, l'integrazione delle osservazioni in situ con prodotti di Earth Observation, quali dati atmosferici di Sentinel-5P e immagini iperspettrali PRISMA, al fine di supportare l'estensione spaziale delle misure puntuali e la generazione di mappe agroambientali. In questa fase, il contributo si concentra principalmente sull'architettura WSN-5G-SatCom, sulle configurazioni dei CPE e sulla catena di acquisizione, trasmissione ed elaborazione dei dati locali/in cloud.

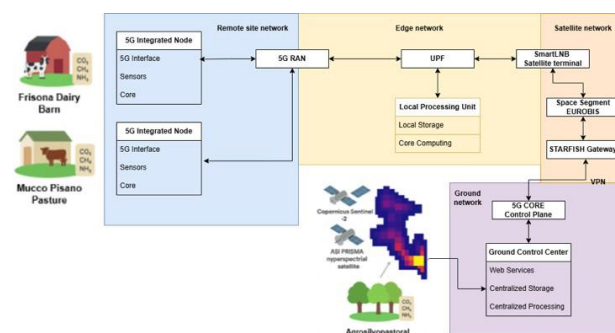


Fig. 1 - Architettura per il monitoraggio delle emissioni GHG tramite reti di nodi CPE-tipo 2

Fig. 1 - Architecture for GHG monitoring with CPE-type 2 mote

L'architettura GHG ha come obiettivo la caratterizzazione della variabilità temporale delle concentrazioni di gas e al supporto di futuri sistemi di reporting ambientale.

Risultati e discussione

Caso d'uso CPE-tipo 1

La configurazione CPE-tipo 1 ha previsto lo sviluppo di una scheda elettronica open-source (Fig. 2), basata sul microcontrollore ESP32. Tale scelta consente di raggiungere un buon compromesso tra costo, flessibilità di programmazione, consumo energetico e capacità di integrazione con sensori eterogenei. La scheda integra anche un modulo GPS, due convertitori analogico-digitali e un modulo RTC. Per il controllo degli attuatori irrigui è stato implementato un circuito relè. L'alimentazione dei diversi componenti, a 5 V, 10 V e 3,3 V, è stata gestita tramite regolatori di tensione LM78XX.

I nodi integrano sensori digitali con protocolli SDI-12 e pulse e sensori analogici. Le variabili atmosferiche sono state misurate mediante l'atmometro ET-gage Model E (ETgage, Inc.) e il sensore Atmos14 (Meter Group) per la

temperatura dell'aria, l'umidità relativa, il deficit di pressione di vapore e la pressione atmosferica.

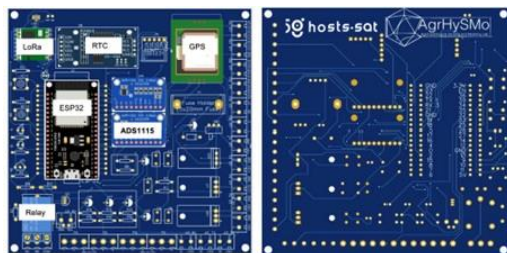


Fig. 2 - Scheda elettronica open-source sviluppata per nodo/gateway LoRa nella configurazione CPE tipo 1

Fig. 2 - Open-source electronic board developed for LoRa node/gateway in the CPE-type 1 configuration

La temperatura della chioma è stata acquisita con un termometro a infrarossi SILL-411 (Apogee, Inc.), mentre il contenuto idrico del suolo è stato misurato con una sonda FDR Drill & Drop (Sentek, Inc.). Ulteriori sensori includono un pluviometro a bascula, un misuratore di portata a impulsi, un trasduttore di pressione a ponte di Wheatstone e un sensore Hydros21 (Meter group) per il monitoraggio del livello idrico e della conducibilità nel canale irriguo.

La calibrazione e verifica della sensoristica hanno confermato l'idoneità dei nodi al monitoraggio in campo. La sonda FDR ha mostrato una risposta stabile e coerente con la calibrazione del costruttore, mentre il termistore dell'atmometro e il sensore di pressione hanno mostrato una buona linearità nei rispettivi intervalli di misura. Il sensore Hydros-21, utilizzato per il monitoraggio del livello idrico nel canale irriguo, ha consentito di stimare la portata istantanea a partire da misure continue del livello dell'acqua ($Q = 1,779H - 430,07$; $R^2 = 0,78$).

Il modulo di comunicazione LoRa, SX1276 (Semtech), opera a 868 MHz, in conformità con la banda ISM europea. Il protocollo LoRa ha consentito buone prestazioni di trasmissione anche in presenza di vegetazione, ostacoli fisici e variabilità morfologica del terreno. In condizioni operative di campo, le distanze utili di comunicazione sono state comprese tra 1 e 2 km. La Fig. 3 riporta la topologia della rete installata, che include il nodo per il monitoraggio del livello idrico del canale, i nodi per il monitoraggio del continuum suolo-pianta-atmosfera e i nodi per il controllo delle elettrovalvole. Operativamente, il gateway inoltra i dati a una Local Processing Unit, dove vengono effettuate le prime operazioni di aggregazione e analisi, prima dell'invio alla Central Processing Unit (CPU) cloud, responsabile della gestione di più siti e delle configurazioni remote.

La Fig. 5 mostra un esempio di dashboard con l'andamento del CWSI, del SWC a diverse profondità e degli eventi irrigui. La Fig. 4 mostra un esempio di output dell'algoritmo opportunistico per quantificare l'assorbimento radicale e identificare la soglia superiore (SWC_{fc}) e quella di stress idrico (SWC*) in accordo con il profilo del suolo monitorato.

Quando quest'area è scesa al di sotto del 40% del valore massimo registrato dopo l'irrigazione, si è ritenuto che lo

stress idrico fosse iniziato. Questa soglia è attualmente in fase di validazione in campo attraverso un'attività sperimentale parallela, volta a definire la funzione di stress idrico specifica della coltura, basata sulla relazione tra la traspirazione relativa, misurata con sensori di flusso di linfa, e la frazione di acqua del suolo traspirabile (Pellegrino et al., 2006).



Fig. 3 - Topologia della rete CPE-tipo 1 installata nell'azienda Calafata (Toscana)

Fig. 3 - CPE type-1 Sensor network topology installed at Calafata farm (Tuscany)



Fig. 4 - Output dell'algoritmo per la quantificazione dell'assorbimento radicale e l'identificazione delle condizioni di stato idrico ottimali e di stress della coltura

Fig. 4 - Output of the algorithm for the quantification of root absorption and the identification of the optimal crop water status and stress conditions

L'interfaccia grafica (GUI) basata su Grafana consente agli utenti di monitorare, filtrare e confrontare le dinamiche agroambientali. Attualmente operativa in modalità di sola visualizzazione, la piattaforma integrerà in futuro la gestione automatizzata dell'irrigazione, l'invio di alert in tempo reale e il controllo remoto delle valvole. La sua architettura scalabile e modulare lo rende uno strumento di supporto decisionale per l'irrigazione di precisione. La Fig. 5 mostra un tipico output della dashboard di Grafana: il grafico superiore mostra l'andamento del CWSI, il grafico centrale mostra il SWC a diverse profondità e il grafico inferiore evidenzia gli eventi di irrigazione come picchi distinti.

il monitoraggio in tempo reale del continuum suolo-pianta-atmosfera.

Tra l'11 e il 27 giugno 2025, il sistema ha monitorato il CWSI e SWC per valutare l'efficacia degli interventi irrigui. Nella fase iniziale (11-18 giugno), le condizioni idriche si sono mantenute ottimali (CWSI < 0,6 e SWC compreso tra le soglie SWC* e SWC_{fc}). Dal 19 giugno, l'aumento del CWSI oltre 0,6 ha segnalato uno stress idrico: la prima irrigazione è risultata insufficiente, con un SWC tornato rapi-

damente alla soglia critica. Al contrario, la seconda irrigazione (25 giugno) ha ripristinato efficacemente l'umidità del suolo, con conseguente diminuzione del CWSI. Questa forte coerenza tra i dati termici e quelli pedologici conferma la capacità dell'IDSS di rilevare tempestivamente lo stress idrico e di guidare strategie irrigue adattive.

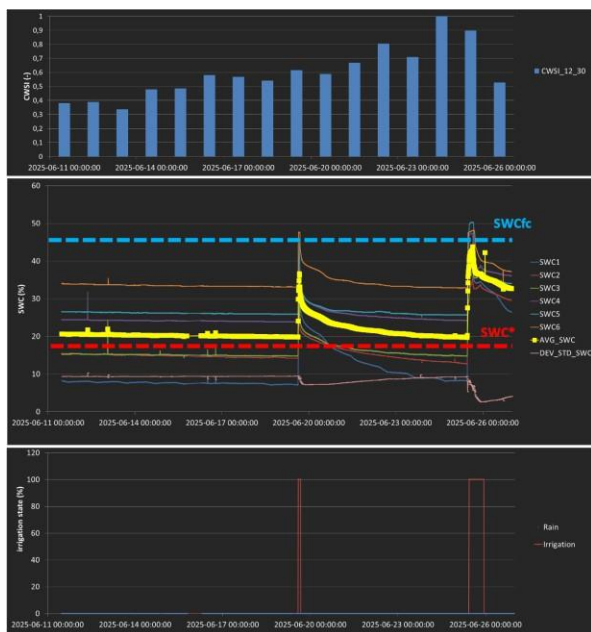


Fig. 5 - Utilizzo iniziale del Sistema di Supporto alle Decisioni (DSS) per l'audit dell'irrigazione in un vigneto commerciale

Fig. 5 - First application of DSS for irrigation auditing in a commercial vineyard

Caso d'uso CPE-tipo 2

La configurazione CPE-tipo 2 si basa su un'architettura hardware in cui le funzioni di sensing, di elaborazione locale (edge computing) e di connettività sono integrate in un unico dispositivo stand-alone. Questa soluzione è stata concepita specificamente per rispondere alle esigenze di un monitoraggio distribuito, flessibile e ad alta frequenza delle emissioni di gas serra (GHG) in ambienti zootecnici e agrosilvopastorali (Fig. 6).

Il core di elaborazione del nodo è costituito da un microcomputer Raspberry Pi 5, che funge da local edge controller. A tale unità è accoppiato un modulo di espansione hardware (5G HAT) che assicura la trasmissione diretta dei dati alla rete cellulare 5G, senza necessità di transitare attraverso gateway intermedi. Tale design modulare e a basso consumo (low-power) risulta particolarmente idoneo per i dispiegamenti in aree rurali, garantendo scalabilità e robustezza.

Dal punto di vista dell'interfacciamento dei sensori, l'architettura hardware prevede l'uso esclusivo di dispositivi con uscita digitale per massimizzare l'affidabilità del segnale in ambienti operativi complessi. I sensori sono direttamente connessi alla morsettiera GPIO del Raspberry, come mostrato nello schema in Fig. 7. Nello specifico, il monitoraggio delle concentrazioni di gas ambientali include un senso-

re per l'ammoniaca (NH_3), SKU: SEN0469, un sensore a infrarossi per l'anidride carbonica (Gravity SCD41 Infrared CO_2 Sensor V1.0) e un sensore per il metano (CH_4), SKU: SEN0654. Questi tre sensori condividono il bus di comunicazione I2C del microcomputer, i pin SDA (GPIO 2) e SCL (GPIO 3).

Parallelamente, per la necessaria caratterizzazione delle dinamiche microclimatiche e dei flussi di trasporto dei gas, il nodo integra un anemometro sonico 3D avanzato (modello LI-550 TriSonica), interfacciato al Raspberry Pi tramite la comunicazione seriale UART, utilizzando i pin TXD (GPIO 14) e RXD (GPIO 15). Il sensore fornisce un output multiparametrico che include: velocità del vento tridimensionale (m/s), direzione del vento ($^\circ$), temperatura dell'aria ($^\circ\text{C}$), umidità relativa (%) e pressione atmosferica (kPa).



Fig. 6 - Topologia della rete CPE-tipo 2 installata nel Centro di Ricerche Agro-Ambientali "Enrico Avanzi"

Fig. 6 - CPE type-2 Sensor network topology installed at Agro-Environmental Research Center "Enrico Avanzi"

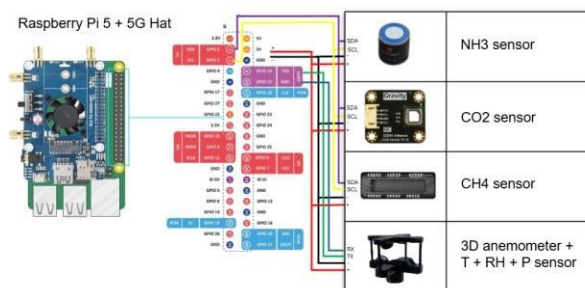


Fig. 7 - Schema delle connessioni hardware per il nodo integrato CPE-tipo 2

Fig. 7 - Hardware wiring diagram for the integrated CPE-tipo 2 node

Operando come nodo edge, il Raspberry esegue in tempo reale operazioni di preelaborazione dei dati ed eliminazione dei dati corrotti. Solo successivamente i pacchetti dati ottimizzati vengono trasmessi tramite il modulo 5G verso il cloud e il backhaul satellitare, riducendo la latenza e il carico di rete.

Conclusioni

Il presente lavoro dimostra la validità di un'architettura integrata WSN-5G-SatCom (progetto 5G-HOSTS-SAT) per

superare i limiti di connettività delle aree rurali. L'adozione di due topologie di rete ha risposto a specifiche esigenze operative: la configurazione CPE-1 ha validato efficace-mente un IDSS per l'ottimizzazione irrigua basata sullo stress idrico, mentre la CPE-2 ha delineato un framework ad alte prestazioni per il rilevamento intensivo dei gas serra (CO₂, CH₄, NH₃). In entrambi i casi, l'approccio *edge-to-cloud* ha decentralizzato l'elaborazione locale per garantire *alert* a bassa latenza, sfruttando il *backhaul* satellitare per un'interconnessione ininterrotta con il *cloud*. Gli sviluppi futuri consolideranno i nodi autonomi e integreranno le osservazioni *in situ* con i dati di Osservazione della Terra (EO), consentendo l'*upscaling* spaziale a supporto della mitigazione climatica e della certificazione della sostenibilità.

Ringraziamenti

Questa ricerca è stata condotta nell'ambito del progetto European Space Agency (ESA) 5G-HOSTS-SAT-5G HUB Over-the-Air Vertical Segment Validations.

Bibliografia

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) FAO irrigation and drainage paper no. 56, crop evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements), FAO Water Resources, Development and Management Service, Rome, Italy, pp 300.

European Space Agency (ESA). 5G-HOSTS-SAT: 5G Hub Over-the-Air Vertical Segment Validations. ESA Connectivity and Secure Communications. Available online at ESA Connectivity portal. Accessed 19 April 2026.

Haq, B.; Jamshed, M.A.; Nauman, A. Integrated Terrestrial and Non-Terrestrial Network: An Overview. In Integrated Terrestrial and Non-Terrestrial Networks; Springer, 2024; pp. 1-16.

Idso, S. B., Jackson R. D., Pinter P. J., Reginato, R. J., Hatfield J. L. Normalising the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.*, 24 (1981), pp. 45-55.

Katimbo, A., Rudnick, D.R., DeJonge, K.C., Lo, T.H., Qiao, X., Franz, T.E., Nakabuye, H.N., Duan, J. (2022). Crop water stress index computation approaches and their sensitivity to soil water dynamics. *Agricultural Water Management* 266 (2022) 107575.

Pellegrino, A., Gozé, E., Lebon, E., and Wery, J. (2006). "A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites." *European Journal of Agronomy* 25(1), 49–59

Rallo, G. Provenzano, I. C. Paltineanu. 2014 A New calibration equation for Diviner2000 capacitance probe accounting for soil shrinkage characteristic curve and estimation of parameters on the basis of soil physical properties. Fourth International Symposium on Soil Water Measurement using Capacitance, Impedance and Time Domain Transmission (TDT).

VALIDATION OF SIMULATED EVAPOTRASPIRATION: OBSERVATIONS WITH EDDY-COVARIACE AND HARGREAVES-SAMANI, PENMAN-MONTEITH, AND SEBAL MODELS

VALIDAZIONE DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE SIMULATA: OSSERVAZIONI CON EDDY-COVARIACE E MODELLI HARGREAVES-SAMANI, PENMAN-MONTEITH E SEBAL

Andrea Coletti¹, Giovanni Cinque², Gabriele Curci¹

¹ Università degli studi dell'Aquila, Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche

² Himet Srl

*emanuele.dichio@phd.unipi.it

Abstract

Accurate evapotranspiration estimation is crucial for optimal use of water resources, especially given the impact of climate change. The Abruzzo Region, as part of the 2023-2027 CSR, recently implemented the AgroAmbiente platform (<https://www.agroambiente.regione.abruzzo.it>), which, among other agrometeorological indicators, includes the calculation of reference evapotranspiration (ET₀) using the Hargreaves-Samani formula, based on temperature and solar radiation. The Penman-Monteith formula is able to more realistically simulate the plant-atmosphere system, as it also includes wind and humidity data and soil characteristics. The SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) algorithm determines evapotranspiration flux as the residual term of the surface energy balance equation, whose contributions (net radiation, soil heat flux, and sensible heat) are estimated using remote sensing techniques from multispectral satellite sensors. Data from the Landsat9 satellite were used, processed, along with meteorological data, using the LandMODETMapper tool. In this study, evapotranspiration was estimated using the residual of the surface-atmosphere energy balance, where sensible heat flux was derived from processing ultrasonic anemometer data using EddyPro software; soil heat flux was estimated by integrating direct measurements at a depth of 5 cm with calculations of surface layer thermal storage; and net radiation was estimated directly using a bidirectional pyranometer and pyrgeometer. The data observed in an initial period of the experimental campaign were compared with the three different modeling approaches, in order to characterize their performance in a real case.

Parole chiave

Evapotraspirazione, Eddy Covariance, Penman-Monteith, Hargreaves-Samani, SEBAL

Keywords

Evapotranspiration, Eddy Covariance, Penman-Monteith, Hargreaves-Samani, SEBAL

Introduzione

La gestione sostenibile delle risorse idriche rappresenta una delle sfide più critiche nel contesto attuale dei cambiamenti climatici, dove l'aumento delle temperature e l'irregolarità delle precipitazioni rendono la stima precisa del bilancio idrico fondamentale. In questo scenario, l'evapotraspirazione (ET) si configura come il parametro chiave per quantificare gli scambi di massa ed energia tra superficie e atmosfera. La Regione Abruzzo ha risposto a questa esigenza implementando, all'interno del CSR 2023-2027, la piattaforma AgroAmbiente. Tale strumento fornisce il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento (ET₀) basandosi sulla formula di Hargreaves-Samani, un approccio vantaggioso per la sua semplicità poiché richiede la sola conoscenza della temperatura e della radiazione solare extraterrestre, quest'ultima calcolabile in base alla latitudine. Tuttavia, la formula di Penman-Monteith modella in maniera più completa il sistema atmosfera-terreno, in quanto integra variabili cruciali come la velocità del vento, l'umidità relativa e le proprietà del suolo. Il presente studio si pone l'obiettivo di validare questi approcci modellistici e satellitari (SE-

BAL) attraverso l'utilizzo di misure dirette da stazione micrometeorologica, al fine di affinare le capacità predittive degli strumenti di supporto alle decisioni regionali.

Materiali e Metodi

Descrizione del sito e della strumentazione

Il sito in studio si trova in località Casale Calore, L'Aquila, ad un'altitudine di 681 m ed è caratterizzato da copertura erbacea rada. La strumentazione utilizzata comprende: un anemometro ultrasonico capace di acquisire dati di direzione e velocità del vento 3D alla frequenza di 20 Hz; un sensore multiparametrico per l'acquisizione di direzione e velocità del vento 2D, temperatura dell'aria, umidità relativa dell'aria, pressione atmosferica, dew point e quantità di pioggia; due sensori Hukseflux per la misura del flusso di calore nel suolo; quattro sensori PT100 per la misura della temperatura del terreno; quattro sensori SM150T per la misura del contenuto volumetrico di acqua nel terreno; un piranometro bidirezionale per la misura della radiazione solare ad onda corta incidente e riflessa; un pirgeometro bidire-

zionale per la misura della radiazione termica emessa dall'atmosfera e dalla superficie.

Elaborazione dei dati

I dati grezzi ad alta frequenza provenienti dall'anemometro ultrasonico sono stati processati tramite il software EddyPro® (LI-COR). Il processamento ha permesso di ricavare i **flussi mediati su 30 minuti** del calore sensibile (H), applicando le correzioni standard di rotazione delle coordinate e di detrending. La radiazione netta (R_n) è stata determinata su intervalli di 30 minuti calcolando il bilancio delle componenti ad onda corta (SW) e onda lunga (LW), ottenute rispettivamente dai sensori *up/down* del piranometro e del pirgeometro. Il flusso di calore nel suolo (G_0) è stato calcolato tenendo conto del termine di *storage* secondo le metodologie descritte in Ochsner et al. (2007).

Metodi di stima e confronto dell'evapotraspirazione

Il flusso di calore latente (λE) è stato ottenuto come termine residuo del bilancio energetico superficiale, cioè $\lambda E = R_n - G_0 - H$. Questo valore, derivato da misure dirette *in situ*, rappresenta il riferimento reale per la validazione degli altri metodi.

Per quanto riguarda i metodi di stima dell'evapotraspirazione di riferimento ET_0 sono stati utilizzati, come detto, Penman-Monteith (PM) ed Hargreaves-Samani (HS). Il primo è implementato secondo lo standard FAO-56 ed è un modello a base fisica che integra variabili termiche, igrometriche e anemometriche, simulando realisticamente la resistenza aerodinamica della superficie. Quindi, ET_0 secondo PM vale:

$$ET_0 = 0.408 \frac{\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} u_2 VDP \right)}{(\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2))}$$

in cui ET_0 è l'evapotraspirazione di riferimento in $mm \cdot d^{-1}$, Δ la pendenza della curva di vapor saturo rispetto alla temperatura ($kPa \cdot C^{-1}$), R_n la radiazione netta alla superficie della coltura ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$), G il flusso di calore nel suolo ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$), γ costante psicrometrica ($kPa \cdot ^\circ C^{-1}$), T temperatura dell'aria misurata in $^\circ C$ a 2 metri di altezza, u_2 velocità del vento misurata a 2 metri di altezza, VDP deficit di pressione di vapore (kPa).

Secondo HS invece, l'evapotraspirazione di riferimento viene stimata come:

$$ET_0 = 0.0023 \cdot (T_{med} + 17.8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5} \cdot Rad$$

dove T_{med} , T_{max} , T_{min} sono rispettivamente la temperatura media, la temperatura massima e la temperatura minima giornaliera, mentre Rad è la radiazione extra-terrestre in $mm \cdot d^{-1}$.

I confronti tra i modelli PM, HS (calcolati a partire dalle misure *in situ*) e il residuo λE sono stati condotti su quattro finestre temporali della durata di circa una settimana ciascuna, ricadenti nei mesi di gennaio, marzo e aprile 2026. Tale selezione ha permesso di valutare le performance dei modelli in diverse condizioni micrometeorologiche.

Risultati e discussione

Dinamica dei flussi superficiali e risposta agli eventi meteorologici

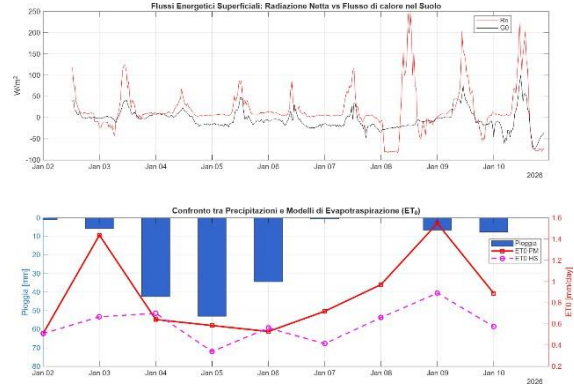


Fig. 1 - Analisi flussi energetici, PM e HS, prima finestra temporale gen 2026.

Fig. 1 - Analysis of energy fluxes, PM and HS, first time window Jan 2026.

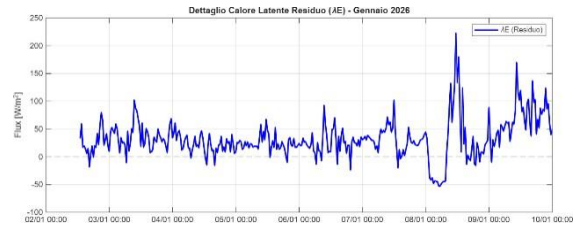


Fig. 2 - Andamento termine evapotraspirativo prima finestra temporale gen 2026.

Fig. 2 - Trend of evapotranspiration in the first time window, January 2026

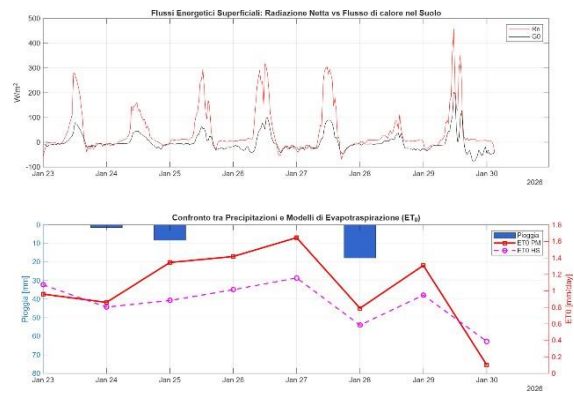


Fig. 3 - Analisi flussi energetici, PM e HS seconda finestra temporale gennaio 2026.

Fig. 3 - Analysis of energy fluxes, PM and HS, second time window January 2026.

Durante l'intero periodo di studio, il flusso di radiazione netta (R_n) ha mostrato l'andamento tipico a campana nei giorni sereni, con picchi crescenti dai **300 W/m² di fine gennaio ai 600-700 W/m² osservati in aprile**. Un evento di particolare rilievo è rappresentato dal **4-6 gennaio**, durante

il quale R_n ha subito un crollo drastico a causa della persistente copertura nuvolosa. In questa fase, il sistema ha mostrato una pressoché totale assenza di energia disponibile per l'evapotraspirazione, con valori di ET_0 inferiori a **0.6 mm/day**. Il flusso di calore nel suolo G_0 ha seguito coerentemente R_n ; si è poi osservato un marcato smorzamento delle sue oscillazioni a seguito degli eventi piovosi, fenomeno riconducibile all'aumento della capacità termica del terreno saturo.



Fig. 4 - Andamento termine evapotraspirativo seconda finestra temporale gennaio 2026.
Fig. 4 - Trend of the evapotranspiration in the second time window, January 2026.

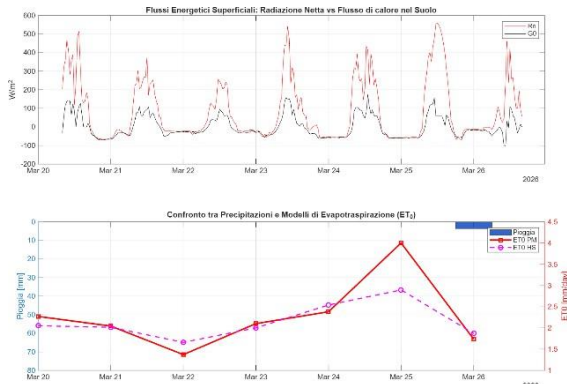


Fig. 5 - Analisi flussi energetici, PM e HS finestra temporale marzo 2026.
Fig. 5 - Analysis of energy fluxes, PM and HS for the March 2026 time window.



Fig. 6 - Andamento termine evapotraspirativo prima finestra temporale marzo 2026.
Fig. 6 - Trend of the evapotranspiration term in the first time window of March 2026.

Confronto tra i modelli PM e HS

Il confronto tra i modelli ha evidenziato una maggiore sensibilità di **Penman-Monteith (PM)** rispetto ad **Hargreaves-Samani (HS)**. In particolare: Il modello HS tende a sot-

tostimare sistematicamente l'evapotraspirazione rispetto a PM durante le giornate terse, confermando la necessità di integrare la componente radiativa ed aerodinamica quando si necessita di una stima più accurata dell'evapotraspirazione.

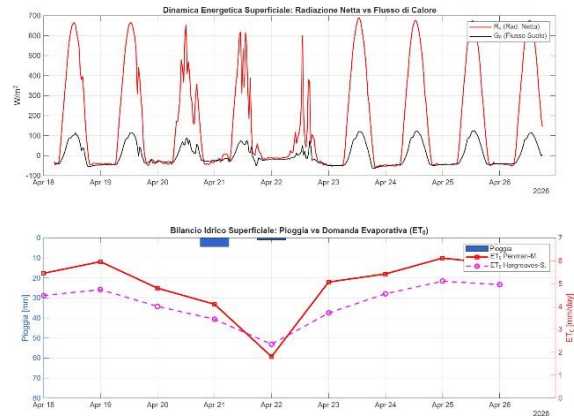


Fig. 7 - Analisi flussi energetici, PM e HS finestra temporale aprile 2026.
Fig. 7 - Analysis of energy fluxes, PM and HS for the April 2026 time window.

Bibliografia

- European Space Agency (ESA). 5G-HOSTS-SAT: 5G Hub Over-the-Air Vertical Segment Validations. ESA Connectivity and Secure Communications. Available online at ESA Connectivity portal. Accessed 19 April 2026.
- Haq, B.; Jamshed, M.A.; Nauman, A. Integrated Terrestrial and Non-Terrestrial Network: An Overview. In Integrated Terrestrial and Non-Terrestrial Networks; Springer, 2024; pp. 1-16.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture, 1(2), 96-99.
- Idso, S. B., Jackson R. D., Pinter P. J., Reginato, R. J., Hatfield J. L. Normalising the stress-degree-day parameter for environmental variability. Agric. Meteorol., 24 (1981), pp. 45-55.
- Katimbo, A., Rudnick, D.R., DeJonge, K.C., Lo, T.H., Qiao, X., Franz, T.E., Nakabuye, H.N., Duan, J. (2022). Crop water stress index computation approaches and their sensitivity to soil water dynamics. Agricultural Water Management 266 (2022) 107575.
- LI-COR (2021). EddyPro Software (Version 7.0). LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, USA.
- Ochsner, T. E., Sauer, T. J., & Horton, R. (2007). Soil Heat Storage Measurements in Energy Balance Studies. Agronomy Journal, 99(2), 311-322.
- Pellegrino, A., Goz , E., Lebon, E., and Wery, J. (2006). "A model-based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites." European Journal of Agronomy 25(1), 49–59
- Rallo, G. Provenzano, I. C. Paltineanu. 2014 A New calibration equation for Diviner2000 capacitance probe accounting for soil shrinkage characteristic curve and estimation of parameters on the basis of soil physical properties. Fourth International Symposium on Soil Water Measurement using Capacitance, Impedance and Time Domain Transmission (TDT).

ANALYSIS OF ANNUAL SOIL WATER STATUS DYNAMICS IN A HOP FIELD THROUGH CONTINUOUS MONITORING: IMPLICATIONS FOR IRRIGATION MANAGEMENT

ANALISI DELLA DINAMICA ANNUALE DELLO STATO IDRICO DEL SUOLO IN UN LUPPOLETO MEDIANTE MONITORAGGIO CONTINUO: IMPLICAZIONI PER LA GESTIONE IRRIGUA

Andrea Gramazio^{1*}

¹ lab3841 s.r.l., Cuneo (CN)

* andrea.gramazio@lab3841.it

Abstract

Continuous monitoring of soil water status can support irrigation management in precision agriculture. This work presents the analysis of an annual time series acquired in a hop field in Northern Italy using an autonomous low-power monitoring system based on LoRaWAN communication and a Watermark 200SS soil water tension sensor. Measurements acquired over more than one year highlighted recurrent wetting and drying cycles associated with rainfall events, manual irrigation practices and seasonal environmental conditions. The results showed marked seasonal variability in soil water tension dynamics, with faster drying trends during warmer periods. The observed repeatability of soil drying curves suggests the potential applicability of simplified predictive approaches for irrigation support. The study confirms that low-cost autonomous monitoring systems based on limited sensor configurations can provide useful information for small- and medium-scale agricultural applications.

Parole chiave

Agricoltura di precisione; monitoraggio del suolo; gestione irrigua; luppolo; sensoristica IoT

Keywords

Precision agriculture; soil monitoring; irrigation management; hop cultivation; IoT sensing

Introduzione

La tensione idrica del suolo rappresenta uno dei parametri più rilevanti per la gestione irrigua e per il monitoraggio dello stato idrico delle colture, influenzando direttamente la disponibilità di acqua per le piante e i processi di evapotraspirazione (Jones, 2004). In ambito agricolo, la possibilità di disporre di misure continue in situ consente di osservare la risposta del terreno agli eventi meteorici, ai cicli irrigui e alle variazioni stagionali, fornendo informazioni utili per il supporto alle decisioni irrigue e per una gestione più efficiente della risorsa idrica (Pereira et al., 2002).

Negli ultimi anni, la crescente diffusione di tecnologie per l'agricoltura di precisione ha favorito lo sviluppo di sistemi di monitoraggio distribuiti basati su sensoristica a basso consumo energetico e comunicazioni wireless, rendendo possibile l'acquisizione continuativa di dati ambientali anche in contesti remoti o privi di alimentazione cablata (Zhang et al., 2002). Tuttavia, molte applicazioni operative risultano ancora limitate dalla complessità installativa, dai costi di manutenzione e dalla necessità di calibrazioni specifiche per il sito.

Nel caso del monitoraggio dello stato idrico del suolo, anche installazioni caratterizzate da un numero limitato di sensori possono fornire informazioni utili sull'evoluzione temporale delle condizioni del terreno. In particolare, l'analisi delle dinamiche di reidratazione e disseccamento può evidenziare pattern ricorrenti associati a precipitazioni, irrigazione e condizioni microclimatiche stagionali. L'osservazione di tali dinamiche può inoltre costituire una base preliminare per

approcci empirici finalizzati alla stima del tempo necessario al raggiungimento di condizioni critiche per la coltura.

In questo lavoro viene presentata l'analisi di una serie temporale acquisita per circa 14 mesi in un luppolo del Nord Italia mediante un sistema autonomo di monitoraggio a basso consumo energetico. L'obiettivo dello studio è analizzare la dinamica annuale dello stato idrico del suolo, mettendo in evidenza la presenza di cicli ricorrenti di reidratazione e disseccamento e discutendo le possibili implicazioni per lo sviluppo di strumenti di supporto alla gestione irrigua basati su monitoraggio continuo in situ.

Materiali e Metodi

Sito sperimentale

Il monitoraggio è stato effettuato presso un luppolo situato nel Nord Italia, realizzato in collaborazione con Birrificio Kauss, birrificio agricolo attivo nella valorizzazione di materie prime locali e nella sperimentazione di filiere brassicole legate al territorio piemontese. In tale contesto, la coltivazione del luppolo riveste particolare interesse sia dal punto di vista produttivo sia per le specifiche esigenze irrigue della coltura durante la stagione vegetativa.

Il sito sperimentale è localizzato nel comune di Piasco (CN), nella bassa Valle Varaita, a circa 460 m s.l.m., in un contesto pedemontano caratterizzato da clima temperato sub-continentale con marcata variabilità stagionale, estati relativamente calde e precipitazioni distribuite prevalentemente nei periodi primaverile e autunnale.

Il terreno oggetto dell'analisi presenta una tessitura limoso-argillosa con presenza di scheletro, condizione rilevante per l'interpretazione della capacità di ritenzione idrica e della dinamica di drenaggio e disseccamento osservata durante il monitoraggio. Il sito è stato strumentato mediante un sensore per il monitoraggio dello stato idrico del terreno installato a una profondità di circa 25 cm, corrispondente allo strato di terreno maggiormente interessato dall'attività radicale e dall'assorbimento idrico della coltura. In letteratura (Brant et al., 2020; Rossini et al., 2021), il luppolo presenta infatti una significativa concentrazione di radici assorbenti nei primi decimetri di suolo, pur sviluppando apparati radicali più profondi nel lungo periodo. Tale configurazione è stata scelta al fine di osservare la dinamica del suolo nella porzione maggiormente influenzata sia dagli apporti irrigui sia dall'assorbimento idrico da parte della pianta.

Le acquisizioni sono state effettuate continuativamente da marzo 2025 ad aprile 2026, consentendo l'osservazione delle variazioni stagionali del terreno in risposta agli eventi meteorici, ai cicli irrigui e ai periodi di disseccamento.

La gestione irrigua del luppolo è stata basata sul monitoraggio tensiometrico del terreno mediante soglie operative definite dal gestore dell'impianto, con attivazione dell'irrigazione generalmente in corrispondenza di valori di tensione idrica del suolo compresi tra circa 60 e 70 kPa. Gli interventi irrigui sono stati effettuati manualmente mediante impianto a goccia (ala gocciolante), con l'obiettivo di mantenere adeguate condizioni idriche per la coltura e preservare sia la resa sia la qualità della produzione.

Sistema di monitoraggio

Il monitoraggio è stato realizzato mediante un nodo autonomo a basso consumo energetico Pera® (Lab3841, Italia), sviluppato per applicazioni di monitoraggio ambientale di lungo periodo (Fig. 1). Il sistema è progettato per operare continuativamente in ambiente *outdoor* senza alimentazione cablata, mediante pannello fotovoltaico e accumulo energetico integrati. La configurazione adottata è orientata a installazioni distribuite caratterizzate da limitata accessibilità del sito e ridotte esigenze manutentive, condizioni frequentemente riscontrabili nel monitoraggio agro-ambientale.

Le misure dello stato idrico del suolo sono state acquisite mediante un sensore resistivo Watermark 200SS (Irrometer Company Inc., USA), ampiamente utilizzato in applicazioni irrigue per la stima della tensione idrica del terreno. Il sensore appartiene alla categoria dei *granular matrix sensors* (GMS) e consente una misura indiretta della tensione matriciale del suolo mediante variazione della resistenza elettrica del materiale poroso interno. Grazie al ridotto costo, alla semplicità installativa e alla buona robustezza operativa, i sensori Watermark risultano diffusamente impiegati nel monitoraggio irriguo e nelle applicazioni di gestione della risorsa idrica in ambito agricolo (Shock et al., 2011; Varble and Chávez, 2011). La misura della tensione matriciale rappresenta inoltre un indicatore direttamente correlato alla disponibilità di acqua per la pianta e allo sforzo richiesto per l'assorbimento idrico dal terreno.

Il sistema è infine dotato di sensori per la misura della temperatura del suolo e delle principali variabili microclimatiche atmosferiche, installati in prossimità dell'area monitorata. È inoltre presente un sensore di bagnatura superficiale utilizzato come indicatore qualitativo della presenza di precipitazioni o di acqua libera sulla superficie del nodo, utile per il confronto con le dinamiche di variazione dello stato idrico del terreno.

I dati sono stati acquisiti con cadenza di 30 minuti e trasmessi mediante rete LoRaWAN, consentendo il monitoraggio continuo delle condizioni del terreno con limitate esigenze manutentive.

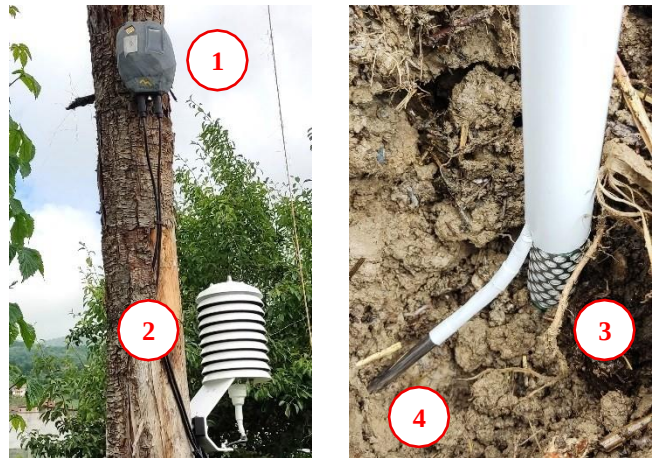


Fig. 1 - Installazione sistema di monitoraggio: (1) nodo autonomo Pera, (2) termo-igrometro aria, (3) sensore Watermark 200SS, (4) sensore di temperatura del suolo.

Fig. 1 – Monitoring system installation: (1) autonomous Pera node, (2) air temperature and relative humidity sensor, (3) Watermark 200SS sensor, (4) soil temperature sensor.

Risultati e Discussione

Dinamica stagionale dello stato idrico del suolo

La Figura 2 mostra l'andamento annuale della tensione idrica del suolo misurata nel luppolo durante il periodo di monitoraggio.

L'analisi evidenzia differenti regimi stagionali associati alle fasi vegetative della coltura e alla gestione irrigua del sito. Durante il periodo estivo si osservano variazioni rapide e ripetitive della tensione idrica, correlate agli interventi irrigui manuali effettuati con frequenza pressoché giornaliera.

Nel periodo autunno-invernale, in assenza di irrigazione e con ridotta attività vegetativa, il terreno mostra dinamiche più lente e progressive, principalmente influenzate dagli eventi meteorici e dalle condizioni ambientali stagionali.

Durante il periodo caratterizzato da copertura nevosa si osserva una marcata stabilizzazione del segnale, attribuibile alla ridotta evaporazione superficiale e alla limitata attività radicale della coltura.

La ripresa primaverile evidenzia nuovamente cicli di progressivo disseccamento del terreno intervallati da eventi di reidratazione, indicando la riattivazione dei processi evaporativi e dell'assorbimento idrico da parte della vegetazione.

Dinamica degli eventi irrigui

La Figura 3 riporta un dettaglio del periodo irriguo estivo. Gli eventi irrigui manuali vengono effettuati prevalentemente nelle ore mattutine e occasionalmente in fascia serale mediante impianto a goccia, con durata tipica compresa tra due e tre ore. Tali interventi producono rapide diminuzioni della tensione idrica del terreno, evidenziando la pronta risposta del sensore alle variazioni delle condizioni idriche del suolo.

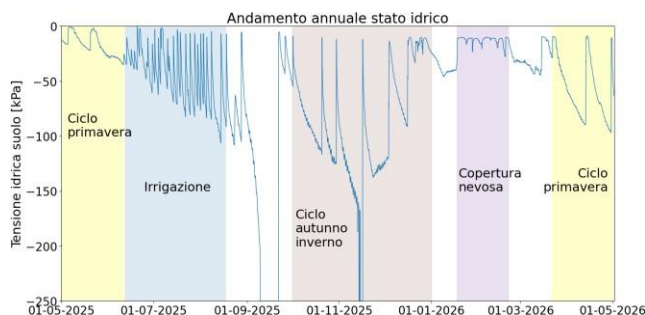


Fig. 2 - Andamento annuale della tensione idrica del suolo nel luppolo durante il periodo di monitoraggio, con evidenza dei differenti regimi stagionali e irrigui.

Fig. 2 - Annual trend of soil water tension in the hop field during the monitoring period, highlighting different seasonal and irrigation regimes.

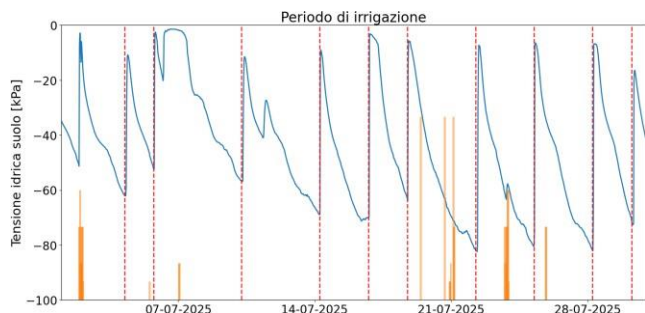


Fig. 3 - Dettaglio del periodo irriguo estivo, con evidenza degli eventi irrigui manuali (rosso, tratteggiato), della dinamica di disseccamento del terreno tra due irrigazioni successive (blu) e del segnale di bagnatura superficiale (arancio), utilizzato come indicatore qualitativo di precipitazioni o presenza di acqua libera.

Fig. 3 - Detail of the summer irrigation period, highlighting manual irrigation events (red, dashed), soil drying dynamics between successive irrigations (blue) and the surface wetness signal (orange histogram), used as a qualitative indicator of rainfall events or free water presence.

Nel periodo irriguo estivo mostrato nel grafico (luglio) sono stati identificati dieci eventi irrigui manuali, effettuati con frequenza variabile da due a quattro giorni. Gli interventi hanno determinato riduzioni della tensione idrica del terreno, tipicamente osservabili entro due ore dall'avvio dell'irrigazione. Tra due eventi consecutivi si osservano incrementi progressivi della tensione idrica dell'ordine di 20-25 kPa/giorno, associati al disseccamento del terreno dovuto all'evapotraspirazione e all'assorbimento radicale. La

regolarità delle curve di disseccamento suggerisce la possibilità di stimare l'evoluzione temporale dello stato idrico del suolo e prevedere il raggiungimento di soglie critiche utili alla gestione irrigua.

In alcuni casi si osservano variazioni del profilo temporale associate a eventi meteorici o a irrigazioni supplementari effettuate in fascia serale.

La velocità di disseccamento osservata nel periodo irriguo estivo appare significativamente maggiore rispetto alle dinamiche rilevate durante il periodo autunno-invernale, caratterizzato da variazioni più lente e progressive dello stato idrico del terreno.

Potenzialità per il supporto irriguo

I risultati mostrano come una configurazione strumentale minimale, costituita da un singolo sensore tensiometrico e da un nodo autonomo a basso consumo energetico, sia in grado di fornire informazioni utili sull'evoluzione idrica del terreno e sulle pratiche irrigue adottate.

La tensione matriciale del terreno rappresenta un indicatore direttamente correlato allo sforzo richiesto alla pianta per l'assorbimento idrico e può quindi essere utilizzata come parametro operativo per la gestione irrigua (Shock et al., 2011). In letteratura, differenti soglie tensiometriche vengono utilizzate per l'attivazione dell'irrigazione in funzione della coltura, della tessitura del suolo e delle condizioni climatiche locali (Jones, 2004; Pereira et al., 2002).

Nel caso del luppolo, condizioni di stress idrico prolungato durante il periodo vegetativo possono influenzare negativamente sia la resa sia alcuni parametri qualitativi della produzione, rendendo particolarmente rilevante il monitoraggio continuo dello stato idrico del terreno (Nakawuka et al., 2017).

L'analisi delle curve temporali consente infatti di identificare gli eventi irrigui, distinguere differenti regimi stagionali e osservare la velocità di disseccamento del terreno in funzione delle condizioni ambientali e microclimatiche del sito. La ripetibilità osservata nelle curve di disseccamento suggerisce la possibilità di sviluppare approcci predittivi per la stima del tempo residuo al raggiungimento di soglie critiche per la coltura. Una configurazione minimale di questo tipo rappresenta una soluzione di semplice installazione e ridotta manutenzione per applicazioni di monitoraggio irriguo in contesti agricoli di piccola e media scala, senza necessità di infrastrutture cablate o sensoristica distribuita complessa.

Sebbene in letteratura siano disponibili metodologie avanzate per la modellazione della dinamica idrica del suolo e della risposta della coltura, spesso basate su reti di sensori distribuiti, misure meteorologiche complete e modelli agro-idrologici dedicati, il presente lavoro adotta una strategia maggiormente pragmatica orientata alla semplicità installativa e alla sostenibilità operativa. L'obiettivo non è la ricostruzione completa del bilancio idrico del sistema suolo-pianta-atmosfera, ma l'identificazione di indicatori pratici e facilmente interpretabili a supporto della gestione irrigua mediante una configurazione strumentale minimale.

L'integrazione futura con previsioni meteorologiche e algoritmi di stima del tempo residuo al raggiungimento di soglie tensiometriche critiche potrebbe supportare una pianificazione maggiormente efficiente degli interventi irrigui e una gestione più sostenibile della risorsa idrica.

Limiti dello studio

Il presente studio rappresenta un'analisi preliminare basata su un singolo punto di misura e finalizzata principalmente all'osservazione qualitativa della dinamica temporale dello stato idrico del suolo in un contesto colturale reale. La configurazione adottata non consente di descrivere la variabilità spaziale del terreno all'interno del luppolo né di ricostruire in modo completo il bilancio idrico del sistema suolo-pianta-atmosfera. Inoltre, la disponibilità di una caratterizzazione pedologica solo generale del sito e l'assenza di misure meteorologiche quantitative limitano la possibilità di generalizzare quantitativamente i risultati ottenuti. Nonostante tali limitazioni, il monitoraggio continuo ha evidenziato pattern ricorrenti utili per l'interpretazione delle dinamiche irrigue e per lo sviluppo di approcci semplificati di supporto decisionale in ambito agricolo.

Conclusioni

Il monitoraggio continuo effettuato nel luppolo ha evidenziato la presenza di dinamiche stagionali ricorrenti dello stato idrico del suolo, strettamente associate agli eventi irrigui, alle precipitazioni e alle condizioni microclimatiche del sito. L'analisi delle serie temporali acquisite ha inoltre mostrato come le curve di disseccamento del terreno possano fornire indicazioni utili per l'interpretazione dell'evoluzione idrica del suolo durante il ciclo vegetativo della coltura.

I risultati ottenuti evidenziano che una configurazione strumentale minimale, autonoma e a ridotta manutenzione, basata su un singolo sensore tensiometrico e comunicazione LoRaWAN, può fornire indicatori operativi utili per il monitoraggio irriguo continuo in contesti agricoli reali di piccola e media scala.

L'integrazione futura con dati meteorologici quantitativi e approcci previsionali potrebbe consentire lo sviluppo di strumenti di supporto decisionale per una gestione irrigua maggiormente efficiente e sostenibile.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Birrificio Kauss per la collaborazione e il supporto forniti durante le attività sperimentali e il monitoraggio presso il luppolo oggetto dello studio.

Bibliografia

- Brant V., Krofta K., Kroulík M., Zábanský P., Procházka P., Pokorný J., 2020. Distribution of root system of hop plants in hop gardens with regular rows cultivation. *Plant, Soil and Environment*, 66(7): 317–326.
- Jones H.G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407): 2427–2436.
- Nakawuka P., Peters T.R., Kenny S., Walsh D., 2017. Effect of deficit irrigation on yield quantity and quality, water productivity and economic returns of four cultivars of hops in the Yakima Valley, Washington State. *Industrial Crops and Products*, 98: 82–92.
- Pereira L.S., Oweis T., Zairi A., 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, 57(3): 175–206.
- Rossini F., Virga G., Loreti P., Iacuzzi N., Ruggeri R., Provenzano M.E., 2021. Hops (*Humulus lupulus* L.) as a novel multipurpose crop for the Mediterranean region of Europe: challenges and opportunities of their cultivation. *Agriculture*, 11(6): 484.
- Shock C.C., Wang F.X., 2011. Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship. *HortScience*, 46(2): 178–185.
- Varble J.L., Chávez J.L., 2011. Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. *Agricultural Water Management*, 101(1): 93–106.
- Zhang N., Wang M., Wang N., 2002. Precision agriculture - a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2–3): 113–132.

POCKETSTRESS: A NEW MOBILE TECHNOLOGY FOR ESTIMATING STOMATAL CONDUCTANCE TO OPTIMIZE WATER STRESS MANAGEMENT IN VINEYARDS

POCKETSTRESS: UNA NUOVA TECNOLOGIA MOBILE PER STIMARE LA CONDUTTANZA STOMATICA AL FINE DI SUPPORTARE LA GESTIONE DELLO STRESS IDRICO IN VIGNETO

Chiara Rusconi¹, Roberto Confalonieri^{1*}, Lucio Brancadoro², Martino Bolognini², Davide Bianchi², Chiara Marchetti¹, Gabriele Cola², Davide Facchinetti², Stefano Poni³, Mattia Invernizzi⁴, Livia Paleari¹

¹ Università degli Studi di Milano, ESP, Cassandra lab, via Celoria 2, 20133, Milano

² Università degli Studi di Milano, DISAA, via Celoria 2, 20133, Milano

³ Università Cattolica del Sacro Cuore, DIPROVES, via Emilia Parmense 84, 29122, Piacenza

⁴ Politecnico di Milano, DICA, Piazza Leonardo Da Vinci 32, 20133, Milano

*roberto.confalonieri@unimi.it

Abstract

Optimizing water stress management is crucial in viticulture, as it affects both yield and grape quality. In this context, we present a new mobile technology (PocketSTRESS), which provides farmers with stomatal conductance (g_s)-based, easy-to-interpret information on the presence and the extent of water stress. The approach uses 3D leaf scans to estimate the χ parameter of the Campbell's ellipsoidal leaf angle distribution. Cultivar specific coefficients are then applied to derive g_s as a linear function of χ . Estimated g_s values are automatically compared with thresholds to classify four water status levels: no stress, mild, moderate and severe stress. Relationships for cvs. Chardonnay, Malvasia, Pinot Blanc, Sangiovese, and Montepulciano are currently available. The capability to assess water status and the accuracy quantified according to the ISO 5725 protocol demonstrated the reliability of the method and its potential for being evaluated under operational farming conditions.

Parole chiave

Distribuzione ellissoidale di Campbell, Architettura della chioma, Sistema di supporto alle decisioni, Analizzatore di scambi gassosi, Accuratezza del metodo

Keywords

Campbell's ellipsoidal distribution, Canopy architecture, Decision support system, Gas exchange analyser, Method accuracy

Introduzione

Nonostante la vite sia una specie relativamente tollerante alla siccità, un'attenta gestione della risorsa idrica in viticoltura è fondamentale per garantire un equilibrio ottimale tra produttività e qualità delle uve. Se, da un lato, deficit eccessivi rischiano di compromettere le produzioni, dall'altro livelli moderati di stress – se ben gestiti – sono addirittura auspicabili per migliorare il profilo qualitativo della bacca (Scholasch and Rienth, 2019).

Tuttavia, mantenere il delicato equilibrio tra i vantaggi e gli svantaggi derivanti da livelli moderati di stress idrico è diventato sempre più impegnativo, anche a causa della crescente frequenza e intensità di eventi siccitosi causati dai cambiamenti climatici in diversi distretti produttivi. Oltre alle strategie di mitigazione basate, ad esempio, su cambiamenti nella gestione delle potature verdi o nell'impiego di prodotti antitraspiranti (Mirás-Avalos and Araujo, 2021), ciò ha portato all'adozione di impianti di irrigazione anche in areali storicamente non irrigui (Rienth and Scholasch, 2019). Per questi motivi, quantificare lo stato idrico della vite sta diventando sempre più cruciale sia per ottimizzare l'irrigazione sia per giustificare interventi di

irrigazione di soccorso in contesti in cui l'uso dell'acqua è limitato dai disciplinari di produzione (Bianchi et al., 2023). Negli ultimi decenni sono stati proposti diversi metodi per valutare lo stato idrico della vite, che variano da approcci basati sul telerilevamento a quelli basati su sensori per misurazioni in campo. Utilizzando sensori multispettrali o iperspettrali montati su satelliti, droni o aerei, le tecniche di telerilevamento riescono a catturare efficacemente la variabilità nello spazio e nel tempo su vaste aree viticole (Poblete et al., 2017). Tuttavia, la caratterizzazione di tale variabilità richiede l'integrazione con misure a terra e questo – insieme alla necessità di competenze specifiche e software dedicati – rende questi approcci parzialmente inadatti a contesti operativi. Inoltre, la marcata discontinuità della chioma nei vigneti (la presenza, cioè, di filari e interfile) rende necessario il monitoraggio tramite immagini ad alta risoluzione, attualmente ottenibili solo con sensori montati su droni o costellazioni di satelliti commerciali, generando in entrambi i casi costi difficilmente accessibili per la maggior parte degli agricoltori (Giovos et al., 2021). Anche le sonde per l'umidità del suolo possono fornire un supporto, in quanto consentono una raccolta dati continua e automatizzata (Rienth and Scholasch, 2019), ma la

necessità di ottenere dati rappresentativi richiede spesso una rete di sensori a diverse profondità, proprio per la marcata variabilità tridimensionale del profondo apparato radicale della vite (Soulis et al., 2015). Oltre ai costi e alle sfide tecniche associate all'implementazione di reti 3D di sensori del suolo in contesti agricoli (Rienth and Scholasch, 2019), diversi studi hanno dimostrato che il contenuto di acqua nel suolo, di per sé, non è indice dello stato idrico delle piante, riducendone così l'affidabilità come indicatore autonomo di stato idrico della vite (Lavoie-Lamoureux et al., 2017).

I metodi basati su rilievi effettuati direttamente sulla pianta restano i più affidabili grazie alla loro relazione diretta con i processi fisiologici coinvolti nella risposta delle piante a condizioni di stress idrico (Jones, 2004). Ad esempio, misurare il potenziale idrico dello stelo è piuttosto comune negli studi in viticoltura. Tuttavia, in contesti operativi è un metodo poco usato perchè è dispendioso in termini di tempo, è distruttivo, e richiede competenze specifiche ed elevata manualità. Anche la conduttanza stomatica (g_s , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), seppur considerata un affidabile, sensibile e precoce indicatore di stress idrico (Jones, 2004), vede il suo utilizzo solitamente limitato a contesti di ricerca a causa del costo e della complessità degli strumenti usati per la sua determinazione (Toro et al., 2019; Rusconi et al., 2025).

Per superare tali limitazioni, Paleari et al. (2024) hanno proposto un nuovo approccio per la stima di g_s basato su scansioni 3D delle foglie e sulle variazioni dell'angolo di inclinazione delle stesse. Sviluppi successivi hanno poi mirato a trasferire l'approccio in strumenti operativi facilmente utilizzabili in vigneto (Rusconi et al., 2026).

In questo contesto, l'obiettivo del presente lavoro è presentare una nuova applicazione per smartphone (PocketSTRESS) – recentemente sviluppata da Rusconi et al. (2026) e che implementa il metodo proposto da Paleari et al. (2024) – la quale fornisce ai viticoltori informazioni semplici e chiare sullo stato idrico del vigneto. In particolare, vengono illustrati (i) il suo funzionamento, (ii) le performance su cinque varietà di interesse vitivinicolo, e (iii) i risultati dell'analisi di accuratezza del metodo (trueness e precisione, con quest'ultima che include ripetibilità e riproducibilità) condotta secondo il protocollo ISO 5725.

Materiali e Metodi

Funzionamento dell'app PocketSTRESS

PocketSTRESS, recentemente sviluppata da Rusconi et al. (2026), è un'applicazione per smartphone progettata per valutare lo stato idrico della vite direttamente in campo. L'app implementa l'approccio proposto da Paleari et al. (2024), basato sulla stima indiretta di g_s a partire da variazioni dell'architettura fogliare indotte dallo stress idrico. L'orientamento 3D dei tessuti fotosintetici viene acquisito mediante una scansione delle foglie effettuata muovendo il dispositivo lungo la lamina fogliare – dal punto di inserzione col picciolo fino all'apice – mantenendo lo schermo parallelo alla superficie fogliare. Durante la scansione, l'app acquisisce automaticamente – a intervalli regolari – gli angoli tra lo zenit e la normale allo schermo (θ_L , °) e gli angoli azimutali della proiezione della normale

sul piano orizzontale mediante sensori integrati nel dispositivo (inclinometro e accelerometro a 3 assi). I valori di θ_L vengono quindi utilizzati per stimare automaticamente il parametro χ della distribuzione ellissoidale degli angoli fogliari di Campbell (Campbell, 1986), usato come indice sintetico dell'architettura della chioma, per cui un valore ridotto è rappresentativo di una chioma con foglie più verticali. Come dimostrato da Paleari et al. (2024), g_s può essere derivata come una funzione lineare di χ attraverso relazioni specifiche per ciascuna cultivar. Le stime di g_s ottenute dalle relazioni vengono successivamente confrontate con soglie note di g_s , corrispondenti a diversi livelli di stress idrico della vite. In particolare, i valori di g_s superiori a $300 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sono considerati corrispondenti a piante in totale assenza di stress, mentre i valori di g_s compresi tra 150 e $300 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 50 e $150 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e inferiori a $50 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ si riferiscono rispettivamente a stress lieve, moderato e severo (Cifre et al., 2005). In questo modo, l'app restituisce un'informazione immediatamente interpretabile sul livello di stress idrico effettivamente presente in vigneto.

La Fig. 1 mostra i passaggi principali nell'utilizzo dell'applicazione. Una volta selezionata la varietà presente in campo (Fig. 1a), la scansione viene effettuata cliccando il pulsante “Misura” e scorrendo il telefono lungo la lamina fogliare, fino all'apice, dove si conclude cliccando nuovamente lo stesso pulsante (Fig. 1b). In questo modo, il dispositivo è pronto per effettuare la successiva scansione (Fig. 1c). Per ottenere una stima affidabile dello stato idrico della vite è necessario scegliere foglie nella porzione centrale della chioma e ripetere la misura in più punti dell'appezzamento (i.e., 13 foglie completamente espanse per punto, in 7 punti diversi per ogni ettaro di vigneto, secondo l'analisi del sample size condotta da Paleari et al. (2024)). Una volta completate le scansioni, cliccando “Calcola stress” l'app restituisce immediatamente il livello di stress idrico, per supportare direttamente la gestione operativa (Fig. 1d).



Fig. 1 - Screenshot dell'app PocketSTRESS che ne illustrano il funzionamento: (a) scelta della varietà, (b) scansione della foglia, (c) conteggio del numero di foglie scansionate, (d) visualizzazione del livello di stress idrico.

Fig. 1 – Screenshots of the PocketSTRESS app illustrating its functioning: (a) selecting the cultivar, (b) scanning leaf surfaces, (c) displaying of the number of scanned leaves, and (d) visualization of the detected water stress level.

Relazioni tra g_s e χ

Le relazioni tra g_s e χ implementate nell'app sono state definite integrando dati provenienti da prove sperimentali condotte tra il 2021 e il 2024 su cinque cultivar: Malvasia, Chardonnay, Pinot Bianco, Sangiovese, e Montepulciano. Le sperimentazioni sono state effettuate sia in pieno campo sia in vaso e hanno previsto diversi trattamenti irrigui al fine di esplorare ampia variabilità in termini di stato idrico della vite. In tutte le prove, g_s è stata misurata mediante un analizzatore portatile di scambi gassosi (Ciras-3, PP Systems) su una foglia per pianta completamente espansa e ben esposta alla radiazione solare. Parallelamente, il parametro χ è stato derivato tramite scansioni effettuate con smartphone su circa dieci foglie per pianta, selezionate nella porzione centrale della chioma (nodi 6-12), al fine di garantire una corrispondenza diretta tra la misura fisiologica e l'architettura fogliare. Tutte le misurazioni sono state effettuate nelle ore centrali della giornata, intorno a mezzogiorno.

Accuratezza secondo ISO 5725

Per fornire indicazioni sull'affidabilità e sui limiti applicativi del metodo, l'accuratezza di PocketSTRESS è stata valutata secondo il protocollo di validazione ISO 5725, adattato ai metodi in vivo da Confalonieri et al. (2014). L'analisi ha considerato sia la trueness sia la precisione, quest'ultima espressa in termini di ripetibilità e riproducibilità. Le prove sperimentali dedicate sono state condotte coinvolgendo più operatori e differenti condizioni operative su due cultivar caratterizzate da una differente risposta allo stress idrico (Sangiovese e Montepulciano). In particolare, la ripetibilità è stata valutata analizzando la variabilità delle misure ottenute dallo stesso operatore nelle medesime condizioni operative, mentre la riproducibilità è stata stimata considerando misurazioni effettuate da operatori diversi e in differenti condizioni. La trueness è stata invece valutata confrontando – per ciascun livello di riferimento (definito dalle misure di g_s effettuate mediante l'analizzatore di scambi gassosi) – i valori medi di g_s stimati mediante le relazioni cultivar-specifiche g_s - χ ottenute in differenti condizioni di disponibilità idrica con i corrispondenti valori dei livelli di riferimento.

Risultati e Discussione

Le performance ottenute risultano in linea o superiori rispetto a quelle riportate in altri studi basati su approcci indiretti per la valutazione dello stato idrico della vite. Le relazioni lineari tra g_s e χ , infatti, sono in grado di spiegare mediamente circa 80% della varianza. Questo conferma il potenziale dell'approccio implementato in PocketSTRESS come soluzione robusta per applicazioni operative in vigneto.

Dalle analisi condotte per valutare la capacità dell'app di classificare correttamente i diversi livelli di stress idrico, è emerso come PocketSTRESS sia in grado di distinguere efficacemente piante stressate da piante non stressate, indipendentemente dalla cultivar considerata (Fig. 2). Solo in due casi su 49, piante con condizioni di lieve stress sono state erroneamente classificate come non stressate, mentre nessuna pianta ben irrigata è stata classificata come

stressata. Inoltre, il 71% dei casi è risultato correttamente assegnato alla classe di stato idrico attesa, mentre nei restanti casi l'errore non ha mai superato una singola classe di stress. Tali risultati evidenziano come l'app sia in grado di fornire indicazioni sufficientemente affidabili per supportare decisioni operative relative a una gestione mirata dello stress idrico.

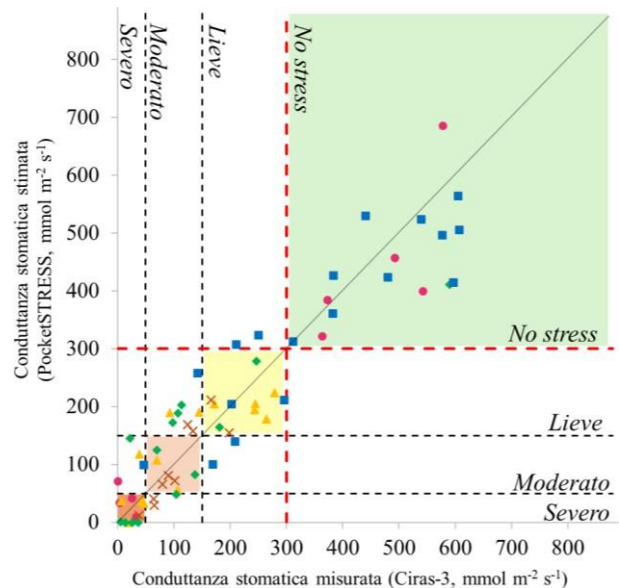


Fig. 2 - Relazione tra i valori di conduttanza stomatica misurati mediante analizzatore portatile di scambi gassosi (Ciras-3) e quelli stimati con PocketSTRESS. Il quadrato blu (■), la croce marrone (×), il cerchio rosa (●), il rombo verde (◆) e il triangolo giallo (▲) corrispondono rispettivamente alle cultivar Chardonnay, Malvasia, Pinot Blanc, Montepulciano e Sangiovese. Le linee tratteggiate indicano le soglie di g_s corrispondenti ai diversi livelli di stress idrico. Le linee rosse separano le condizioni di assenza di stress da quelle di stress idrico. I quadranti colorati evidenziano i casi in cui i valori misurati e stimati ricadono nella stessa classe di stress idrico. La linea nera rappresenta la perfetta corrispondenza tra i valori misurati e quelli stimati.

Fig. 2 – Relationships between stomatal conductance values measured with a portable gas exchange analyser (Ciras-3) and those estimated with PocketSTRESS. Blue square (■), brown cross (×), pink circle (●), green rhombus (◆), and yellow triangle (▲) correspond to cvs. Chardonnay, Malvasia, Pinot Blanc, Montepulciano, and Sangiovese. Dashed lines indicate g_s thresholds corresponding to different water stress levels. Red lines separate well-watered and water stressed conditions. Colored quadrants indicate measured and estimated values falling in the same water stress class. The black line refers to the perfect agreement between measured and estimated values.

Dal punto di vista operativo, il metodo proposto presenta inoltre vantaggi significativi rispetto alle tecniche

tradizionali di misura della conduttanza stomatica. Il tempo necessario per effettuare le scansioni fogliari (circa 3s per foglia) risulta infatti compatibile con le esigenze dei contesti aziendali, soprattutto se confrontato con quello richiesto dagli strumenti tradizionali per misure dirette di g_s – e.g., Ciras-3 – caratterizzati, tra l'altro, da costi elevati e bassa usabilità in contesti operativi. La validazione effettuata secondo il protocollo ISO 5725 ha evidenziato un livello di precisione soddisfacente, senza particolari trend legati ai differenti livelli di stress idrico. I valori medi delle deviazioni standard di ripetibilità e riproducibilità sono risultati pari rispettivamente a 44.8% e a 48.3%, generalmente senza differenze rilevanti tra le cultivar considerate. Sebbene tali valori siano superiori rispetto a quelli tipicamente ottenuti nella validazione di metodi analitici in condizioni di laboratorio, essi risultano coerenti con quelli riportati per altri metodi applicati in condizioni di campo. La limitata differenza tra ripetibilità e riproducibilità suggerisce inoltre un effetto relativamente trascurabile dell'operatore e delle condizioni ambientali sulla precisione complessiva del metodo, indicando come la principale fonte di incertezza sia associata alla variabilità intrinseca tra le piante usate come repliche.

Per quanto riguarda la trueness, il confronto tra valori di g_s stimati e misurati ha evidenziato un R^2 pari a 0.74 e un errore medio assoluto (MAE) di 49.9 mmol m⁻² s⁻¹. Tali risultati, in linea con quanto osservato in altri studi dedicati all'utilizzo dell'architettura fogliare come indicatore dello stato idrico delle colture, confermano ulteriormente l'affidabilità del metodo proposto.

Conclusioni

La crescente necessità di ottimizzare la gestione dello stress idrico in viticoltura richiede strumenti di monitoraggio affidabili, rapidi e facilmente applicabili in contesti operativi. In questo lavoro è stata presentata PocketSTRESS, un'applicazione per smartphone in grado di fornire informazioni semplici e immediatamente interpretabili sullo stato idrico della vite attraverso stime di conduttanza stomatica derivate da scansioni 3D delle foglie. Inoltre, la possibilità di estendere ulteriormente l'approccio a nuove cultivar – definendo relazioni specifiche g_s - χ con differenti condizioni di disponibilità idrica – amplia le potenzialità di applicazione della tecnologia. Questo aspetto, insieme all'elevata usabilità e all'immediatezza delle informazioni restituite, rende PocketSTRESS una tecnologia potenzialmente adatta anche ad aziende di piccole dimensioni o a contesti caratterizzati da limitate disponibilità economiche.

Nonostante ulteriori validazioni in diverse condizioni pedoclimatiche e gestionali siano necessarie per confermarne la robustezza, i risultati ottenuti evidenziano il potenziale della tecnologia proposta come supporto per migliorare la gestione dello stress idrico e dell'irrigazione in viticoltura.

Ringraziamenti

Questa ricerca è stata condotta nell'ambito dei progetti “DRIVE LIFE” (Life19 000035), “Agrifood TEF”

(101100622), “TIGER” (202503127655 PSR SRH05 Reg. Lombardia).

Bibliografia

- Campbell, G. S. (1986). Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and forest meteorology*, 36(4), 317-321.
- Cifre, J., Bota, J., Escalona, J. M., Medrano, H., & Flexas, J. (2005). Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.): an open gate to improve water-use efficiency?. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 106(2-3), 159-170.
- Confalonieri, R., Francone, C., Chiodini, M. E., Cantaluppi, E., Caravati, L., Colombi, V., ... & Acutis, M. (2014). Any chance to evaluate in vivo field methods using standard protocols?. *Field Crops Research*, 161, 128-136.
- Davide, B., Martino, B., Lucio, B., Sara, C., Daniele, F., Daniele, M., ... & Claudio, G. (2023). Effect of multifunctional irrigation on grape quality: a case study in Northern Italy. *Irrigation Science*, 41(4), 521-542.
- Giovas, R., Tassopoulos, D., Kalivas, D., Lougkos, N., & Priovolou, A. (2021). Remote sensing vegetation indices in viticulture: A critical review. *Agriculture*, 11(5), 457.
- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of experimental botany*, 55(407), 2427-2436.
- Lavoie-Lamoureux, A., Sacco, D., Risse, P. A., & Lovisolo, C. (2017). Factors influencing stomatal conductance in response to water availability in grapevine: a meta-analysis. *Physiologia Plantarum*, 159(4), 468-482.
- Mirás-Avalos, J. M., & Araujo, E. S. (2021). Optimization of vineyard water management: Challenges, strategies, and perspectives. *Water*, 13(6), 746.
- Paleari, L., Brancadoro, L., Rusconi, C., Movedi, E., Poni, S., Bolognini, M., ... & Confalonieri, R. (2024). Quantifying water stress in vineyards using a smartphone. *Biosystems Engineering*, 238, 89-93.
- Poblete, T., Ortega-Farías, S., Moreno, M. A., & Bardeen, M. (2017). Artificial neural network to predict vine water status spatial variability using multispectral information obtained from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Sensors*, 17(11), 2488.
- Rienth, M., & Scholasch, T. (2019). State-of-the-art of tools and methods to assess vine water status. *OENO one*.
- Rusconi, C., Confalonieri, R., Movedi, E., Gazzoli, A., Arrigoni, G., Brocca, G., ... & Paleari, L. (2025). Porometer for estimating stomatal conductance in maize: Determination of trueness and precision according to ISO 5725. *Biosystems Engineering*, 250, 158-162.
- Rusconi, C., Confalonieri, R., Brancadoro, L., Bolognini, M., Bianchi, D., Marchetti, C., ... & Paleari, L. (2026). PocketSTRESS: A new mobile technology for estimating stomatal conductance in vineyards to optimize water stress management. *Smart Agricultural Technology*, 102128.
- Scholasch, T., & Rienth, M. (2019). Review of water deficit mediated changes in vine and berry physiology:

- consequences for the optimization of irrigation strategies. *Oeno One*.
- Soulis, K. X., Elmaloglou, S., & Dercas, N. (2015). Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems. *Agricultural Water Management*, 148, 258-268.
- Toro, G., Flexas, J., & Escalona, J. M. (2019). Contrasting leaf porometer and infra-red gas analyser methodologies: an old paradigm about the stomatal conductance measurement. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 31(4), 483-492.

EVALUATING SATELLITE-DERIVED EVAPOTRANSPIRATION USING BAYESIAN MODELING OF MEASUREMENT ERRORS: A MULTI-SCENARIO ASSESSMENT IN MICROIRRIGATED CITRUS PRODUCTION SYSTEMS

VALUTAZIONE DELLE STIME SATELLITARI DI EVAPOTRASPIRAZIONE MEDIANTE MODELLISTICA BAYESIANA DELL'ERRORE NELLE MISURE: UN'ANALISI MULTI-SCENARIO IN SISTEMI AGRUMICOLI MICROIRRIGATI

Gaetano Alessandro Vivaldi¹, Lorenzo E. Cigarra-Guñez^{1,2}, Octavio Lagos², Pasquale Steduto³, Samuel G Metcalf³, Kristen Shapiro³, Daniele Zaccaria³

¹ Ente 1 - Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e degli Alimenti – DISSPA, Via Amendola 165/A, 70126 Bari - Italia

² Ente 2 - Facultad de Ingenieria Agrícola, Departamento de Recursos Hídricos, Universidad de Concepcion, Av. Vicente Mendez 595, Chillan, 3812120, Nuble, Chile

³ Ente 3 - Department of Land, Air, and Water Resources, University of California, Davis, One Shields Ave, Davis, 95616, CA, United States.

* gaetano.vivaldi@uniba.it

Abstract

Validation of satellite-derived evapotranspiration estimates typically assumes that ground-based micro-meteorological measurements with eddy-covariance (EC) are error-free, but EC carries 10–20% uncertainty that affects satellite error characterization. A hierarchical Bayesian measurement error model was developed that accounts for uncertainty in ground-based ET measurements and satellite-derived ETa estimates to characterize the performance of satellite remote sensing-based models (OpenET) for determination of actual in mandarin and orange orchards grown with microirrigation in the San Joaquin Valley of California over multiple crop seasons (2023–2025).

OpenET consistently overestimated ETa across all sites. NRMSE ranged from 25% (mandarin-Tulare) to 34–44% (orange orchards in Tulare and Kern), to 74% (mandarin-Kern). Systematic bias dominated across all combinations (79–97% of error variance) and estimates were robust to EC uncertainty assumptions. Site-specific bias correction should be prioritized over temporal averaging for operational water management. The proposed framework for error analysis is applicable to other satellite remote sensing-based ETa products where ground-based ETa measurements contain non-negligible uncertainty.

Parole chiave:

evapotraspirazione reale; atmometro intelligente; tessuti intelligenti; stress idrico

Keywords:

actual evapotranspiration; smart atmometer; smart fabrics; water stress

Introduction

Accurate quantification of crop evapotranspiration (ET) is essential for optimizing water use efficiency in high-value agricultural production systems, such as the microirrigated citrus orchards of California's San Joaquin Valley (Lavagi-Craddock et al., 2022). While satellite remote sensing-based products like OpenET offer unprecedented spatiotemporal coverage for field-scale irrigation management (Melton et al., 2022), their operationalization requires rigorous validation against ground-based ET measurements. Traditionally, the eddy covariance (EC) method has served as the primary reference for these validations (Volk et al., 2023); however, the assumption that EC observations represent error-free field truthing ET values can lead to misleading performance assessments, as satellite model errors are confounded with unacknowledged measurement uncertainty in the ground-based measurements. Early studies established that EC measurements carry irreducible random errors, typically 10–20% of latent heat flux, driven primarily by the stochastic nature of turbulent sampling during finite averaging periods (Finkelstein and Sims 2001; Rannik et al. 2016). More recently, attention has shifted toward systematic

energy balance non-closure, now recognized as a persistent ~15% bias across global EC networks, mostly attributable to large-scale circulation patterns that are undetectable by fixed towers (Mauder et al. 2024), with site-specific values reaching 40–50% depending on local conditions and the closure adjustment applied (Bambach et al. 2022). Even the most advanced correction methods achieve partial closure (96%), and residual ambiguity persists because errors in net radiation and soil heat flux cannot be ruled out (Zhang et al. 2024; Bambach et al. 2022). These two sources of uncertainty have been studied largely in isolation, and satellite validation studies have rarely propagated either one formally through the comparison with ground measurements. Rather than attempting an arbitrary separation, we treat total EC uncertainty as an aggregate parameter that formally propagates both components through the validation.

Despite its importance, formal propagation of EC measurement uncertainty in satellite ET validation remains rare (Tran et al., 2023). This study addresses such gap by developing a hierarchical Bayesian measurement error model that treats true ETa as a latent variable (a quantity that

cannot be directly observed but is inferred from measurements) and propagates EC uncertainty as a single aggregate parameter through the validation, without attempting to resolve its individual sources. Errors in satellite-derived ETa estimates are simultaneously decomposed into systematic bias and random noise. We evaluate three plausible values of total EC uncertainty spanning the range reported in the scientific literature (10%, 15%, and 20%) to assess the robustness of satellite error characterization to this assumption. We apply this framework across four mature mandarin and orange orchards in California's San Joaquin Valley (2023–2025, 2408 daily observations) to characterize the performance of OpenET satellite remote sensing-based models and assess whether the error structure is consistent across sites, crops, and years.

Materials and methods

Study Sites and Data

Four mature microirrigated citrus orchards were instrumented with energy flux towers in California's San Joaquin Valley (Fig.1): two mandarin and two orange orchards across the counties of Tulare and Kern counties. The study sites are in Tulare and Kern counties within California's San Joaquin Valley. Tulare County lies in a semi-arid to Mediterranean transition zone (Köppen BSk/BSH/Csa), while Kern County presents a hotter and drier regime that additionally includes hot and cold desert classifications (BWh, BWk) in the valley floor (Beck et al., 2018). Daily ETa was derived using the residual of the energy balance (REB) method, where latent heat flux (λE , $W m^{-2}$) was estimated as the residual of the surface energy balance ($\lambda E = R_n - H - G$), with R_n the net radiation, H the sensible heat flux, and G the soil heat flux, all in $W m^{-2}$. Daily ETa was obtained by converting λE using the latent heat of vaporization.



Fig. 1 – Stazione Eddy covariance in un agrumeto adulto di mandarino microirrigato in Tulare County, California.

Fig. 1 – Eddy covariance tower in a mature microirrigated mandarin orchard, Tulare County, California.

Quality control included removal of precipitation-affected periods, instrument failure flags, and days with data gaps exceeding two hours. Satellite-derived daily ETa datasets were obtained as the flux-footprint-weighted spatial average of the OpenET ensemble mean, with daily footprints estimated following Kljun et al. (2015) using half-hourly latent heat flux measurements as weighting factors. Estimated ETa values (April–October) for three consecutive seasons, (2023–2025) were analyzed and then compared against ground-measured daily ETa values obtained with the REB method, yielding 2,408 daily paired ETa observations after quality filtering.

Bayesian Hierarchical Measurement Error Model

True daily ETa is unknown. Both the flux tower and the satellite observe it imperfectly (Fig. 2): tower uncertainty is treated as a single aggregate parameter proportional to observed flux, without attempting to resolve its constituent sources, while satellite error is simultaneously decomposed into systematic bias and random noise. Instead of treating flux tower data as error-free, we treated the true ETa as considered as a latent variable and modeled errors occurring in both the ground-measured and satellite-derived ETa datasets jointly within a Bayesian hierarchical framework.

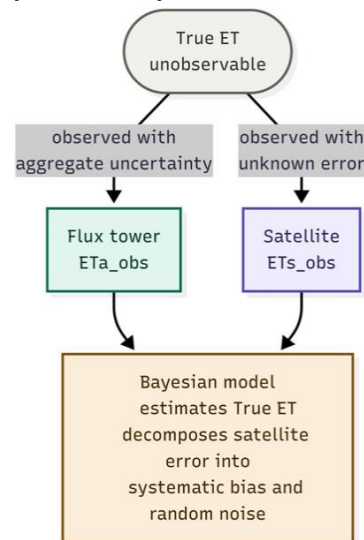


Fig. 2 - Schema concettuale del modello bayesiano dell'errore di misura.

Fig. 2 - Conceptual framework of the Bayesian measurement error model.

The model estimates, for each site-year combination, two satellite error components: a systematic bias described by an intercept and slope relating satellite ETa to true ETa, and a random noise term representing day-to-day unexplained variability. Year-specific parameters are partially pooled across years, allowing the model to borrow strength across seasons while capturing interannual calibration drift.

To assess sensitivity to the assumed EC uncertainty, three scenarios were evaluated: 10%, 15%, and 20% of daily ETa. Posterior inference was conducted in Stan via RStan (4 chains, 8,000 iterations). All models converged to stable

posterior distributions, verified across all parameters and sites.

Results and Discussion

OpenET consistently overestimated ETa across all site-crop combinations, with mean bias ranging from +0.72 mm/day (mandarin-Tulare) to +1.62 mm/day (mandarin-Kern). Error estimates varied markedly by site and citrus varieties (Tab. 1). Mandarin-Tulare showed the lowest total error (NRMSE 24.5%), followed by orange-Tulare (33.9%), orange-Kern (43.6%), and mandarin-Kern (74.1%), indicating that error structure is not consistent across sites or crops varieties. Systematic bias dominated satellite error across all combinations, accounting for 79–97% of total error variance. Random noise (σ_e) was comparatively small, ranging from 0.20 to 0.45 mm/day. The error estimates were highly related to the assumed EC uncertainty: total NRMSE changed by less than 3 percentage points across the three scenarios (10%, 15%, 20%), confirming that conclusions are not sensitive to the specific value of total EC error (σ_u) assumed (Fig.3, Fig.4).

The wide range of NRMSE across sites (25–74%) indicates that the performance of OpenET in estimating consumptive water use for citrus in the semiarid conditions of California is highly site-dependent and cannot be characterized by a single global error estimate. OpenET consistently underperformed for the citrus study orchards in Kern County relative to those in Tulare County, suggesting that local factors (which may include advective conditions, canopy structure, management practices) contribute to substantial differences in the accuracy of satellite-derived ETa estimates that aggregated validation approaches would instead mask out.

The dominance of systematic bias across all citrus study orchards has a direct operational implication. Temporal averaging reduces only the random noise component, which accounts for 3–21% of total error variance depending on site. The remaining 79–97% is systematic and unaffected by averaging. Site-specific bias correction is therefore the more effective strategy for improving OpenET's reliability in estimating citrus ETa for irrigation management in these production systems.

The robustness of error estimates to the assumed EC uncertainty (< 3% sensitivity across scenarios) strengthens confidence in the proposed methodology. Even without precise knowledge of ground-based ETA uncertainty, the satellite error characterization remains stable, a property that is not guaranteed when ground measurements are naively treated as error-free.

Two limitations are worth noting. First, results apply to microirrigated citrus in California's San Joaquin Valley and may not extend to other crops or climatic conditions. Second, the model treats EC uncertainty as a known aggregate parameter; if actual uncertainty falls outside the evaluated range, error decompositions may shift, though the dominance of systematic bias is unlikely to change given its magnitude.

Several model assumptions warrant considerations. The measurement model assumes conditional independence

between flux tower and satellite observations given true ET, which may be violated on days when both instruments are simultaneously affected by regional weather conditions. EC uncertainty was parameterized as proportional to observed energy flux ($\sigma_u = k \times ETa$), treating k as known rather than as an additional latent parameter; eliminating this assumption would require information priors on k for parameter identification. At higher assumed EC uncertainty (20%), separating EC error from satellite error became more uncertain in high-error study orchard, producing wider credible intervals, though all convergence diagnostics remained satisfactory. Random noise (σ_e) in satellite-derived ETa estimates was modeled as constant in magnitude regardless of ET flux level; residual diagnostics suggest that this noise may in fact increase with ET magnitude, which future work could address by allowing error magnitude to scale with flux.

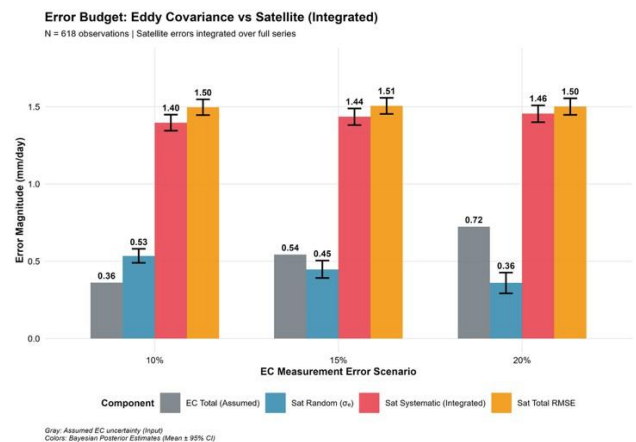


Fig. 3 - Errore satellitare (media a posteriori $\pm$ intervallo di credibilità al 95%) confrontato con l'incertezza dell'eddy covariance assunta nei tre scenari. Orange-Kern, 2023–2025.

Fig. 3 - Satellite error (posterior mean $\pm$ 95% credible interval) compared to assumed EC uncertainty across three scenarios. Orange-Kern, 2023–2025.

Conclusions

A hierarchical Bayesian error model was applied to characterize the performance of OpenET satellite-derived evapotranspiration estimates across four citrus orchards in California's San Joaquin Valley. OpenET satellite remote sensing-based models consistently overestimated ETa relative to the ground-measured ETa values, with site-specific NRMSE ranging from 25% to 74%. Systematic bias dominated error structure at all sites (79–97% of variance), indicating that bias correction should be prioritized over temporal averaging for operational water management. Error estimates were robust to assumptions.

Tab. 1 – Errore bayesiano per sito (scenario di incertezza al 15%). Valori integrati sulla distribuzione a posteriori dell'evapotraspirazione reale latente. Parentesi quadre = intervalli di credibilità al 95%.

Tab. 1 – Bayesian error by study orchard (under the 15% EC uncertainty scenario). Values integrated over the posterior distribution of latent true ET. Brackets = 95% credible intervals.

Site	N	NRMSE (%)	RMSE (mm/day)
Mandarin-Tulare	613	24.5 [23.2, 25.9]	0.92 [0.87, 0.97]
Orange-Tulare	560	33.9 [32.6, 35.1]	1.06 [1.02, 1.10]
Orange-Kern	618	43.6 [42.1, 45.2]	1.51 [1.45, 1.56]
Mandarin-Kern	617	74.1 [72.3, 75.8]	1.78 [1.74, 1.82]

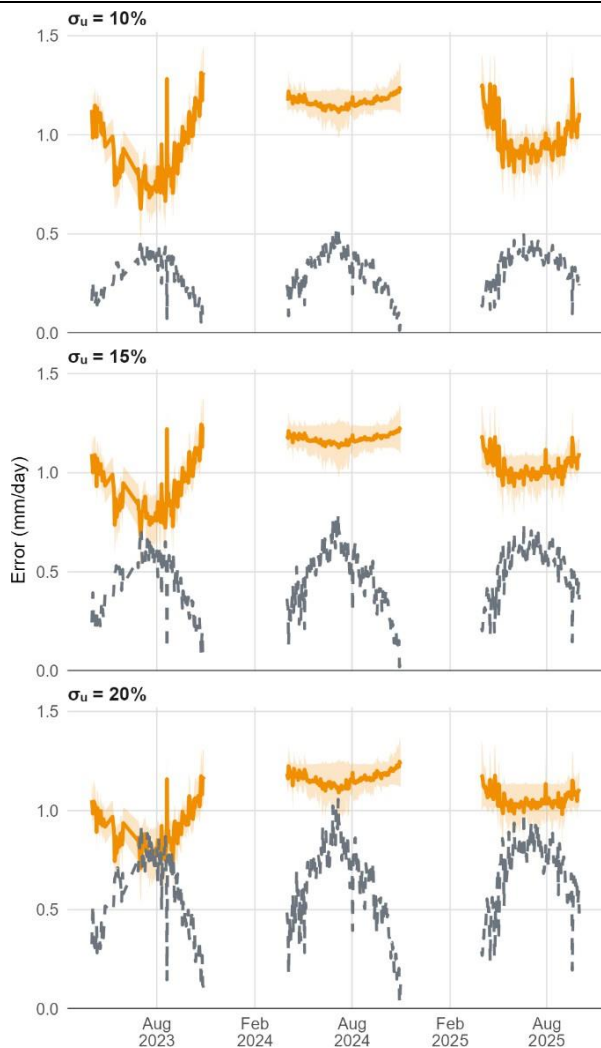


Fig. 4 – Budget degli errori: incertezza della stazione di Eddy Covariance (grigio, input assunto) e componenti dell'errore satellitare stimate dal modello bayesiano (media a posteriori $\pm$ intervallo di credibilità al 95%). Orange-Tulare, 2023–2025.

Fig. 4 – Error budget: flux tower uncertainty (gray, assumed input) and satellite error components estimated by the Bayesian model (posterior mean $\pm$ 95% credible interval). Orange-Tulare, 2023–2025.

References

- Bambach, N., Kustas, W., Alfieri, J., Prueger, J., Hipps, L., McKee, L., et al. (2022). Evapotranspiration uncertainty at micrometeorological scales: the impact of the eddy covariance energy imbalance and correction methods. *Irrigation Science*, 40(4), 445–461. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00783-1>
- Beck, H.E., N.E. Zimmermann, T.R. McVicar, N. Vergopolan, A. Berg, E.F. Wood, 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution, *Scientific Data* 5:180214, doi:10.1038/sdata.2018.214.
- Finkelstein, P. L., & Sims, P. F. (2001). Sampling error in eddy correlation flux measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D4), 3503–3509
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M. W., and Schmid, H. P., 2015. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP), *Geosci. Model Dev.*, 8, 3695–3713, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3695-2015>, 2015.
- Lavagi-Craddock, I., Dang, T., Comstock, S., Osman, F., Bodaghi, S., & Vidalakis, G., 2022. Transcriptome Analysis of Citrus Dwarfing Viroid Induced Dwarfing Phenotype of Sweet Orange on Trifoliate Orange Rootstock. *Microorganisms*, 10(6), 1144. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061144>
- Mauder, M., Jung, M., Stoy, P., Nelson, J., & Wanner, L. (2024). Energy balance closure at FLUXNET sites revisited. *Agricultural and Forest Meteorology*, 358, 110235. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110235>
- Melton, F.S., J.Huntington, R.Grimm, J.Herring, M.Hall, D.Rollison, T.Erickson et al. 2022. OpenET: Filling a Critical Data Gap in Water Management for the Western United States. *Journal of the American Water Resources Association* 58 (6): 971–994. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12956>
- Rannik, Ü., Peltola, O., & Mammarella, I. (2016). Random uncertainties of flux measurements by the eddy covariance technique. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(10), 5163–5181.
- Tran, B. N., van der Kwast, J., Seyoum, S., Uijlenhoet, R., Jewitt, G., & Mul, M. (2023). Uncertainty assessment of satellite remote-sensing-based evapotranspiration estimates: a systematic review of methods and gaps. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(24), 4505–4528. <https://doi.org/10.5194/hess-27-4505-2023>
- Volk, J. M., Huntington, J., Melton, F. S., Allen, R., Anderson, M. C., Fisher, J. B., Kilic, A., Senay, G., Halverson, G., Knipper, K., Minor, B., Pearson, C., Wang, T., Yang, Y., Evett, S., French, A. N., Jasoni, R., & Kustas, W., 2023. Development of a Benchmark Eddy Flux Evapotranspiration Dataset for Evaluation of Satellite-Driven Evapotranspiration Models Over the CONUS. *Agricultural and Forest Meteorology*, 331, 109307. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109307>
- Zhang, W., Nelson, J. A., Miralles, D. G., Mauder, M., Migliavacca, M., Poyatos, R., et al. 2024. A new post-hoc method to reduce the energy imbalance in eddy covariance measurements. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL107084.

PHENOLOGICAL DEVELOPMENT AND GDD ACCUMULATION OF MINOR GRAIN LEGUMES IN VENETO PLAIN

SVILUPPO FENOLOGICO E ACCUMULO DI GDD IN LEGUMINOSE MINORI DA GRANELLA NELLA PIANURA VENETA

Gianluca Soranno^{1*}, Wendy Carolina Vernaza Cartagena¹, Vittoria Giannini¹

¹ Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse naturali e Ambiente (DAFNAE), Università degli Studi di Padova

* gianluca.soranno@unipd.it

Abstract

Climate change needs crop diversification to enhance resilience against new abiotic and biotic stresses. This study evaluates the adaptability of minor grain legumes (broad bean, field bean, and chickpea) to the pedoclimatic context of Veneto region. The research conducted in "L. Toniolo" experimental farm (University of Padua) since 2024, analyzes the correlation between yield, phenological development, and GDD accumulation across three sowing dates: November, March, and April.

For broad and field beans, the first two dates ensured higher yields than late sowing, with GDD 1.3 and 1.2 times higher than last one. In contrast, the third date was most productive for chickpeas, despite comparable GDD. Data suggest that yield is not strictly proportional to GDD but depends on sowing dates, crop cycle synchronization with weather patterns and thermal stress tolerance during sensitive stages. This work provides key data to promote minor grain legumes as a strategic resource for crop diversification in the Veneto region.

Parole chiave

Leguminose minori, gradi giorno (GDD), cambiamento climatico, epoche di semina, Veneto

Keywords

Minor legumes, growing degree days (GDD), climate change, sowing dates, Veneto region

Introduzione

L'attuale crisi climatica sta imponendo una grande trasformazione delle strategie agronomiche utilizzate nelle coltivazioni in pieno campo (Pörtner et al., 2022). Tra gli effetti più comuni di questi cambiamenti climatici si osservano una crescente variabilità delle precipitazioni e un aumento costante delle temperature medie che generano fenomeni di stress idrico anche in areali storicamente considerati resilienti (Lesk et al., 2016). La rapidità e l'imprevedibilità di queste variazioni climatiche costringono il settore agricolo a implementare misure di adattamento utili a preservare sia la stabilità delle rese che la sostenibilità economica delle produzioni (Challinor et al., 2014). Le possibili opzioni per rispondere a queste sfide sono molteplici, ma presentano criticità differenti. Da un lato, si può puntare ad un'ottimizzazione delle tecniche colturali, tra le quali l'irrigazione ha un ruolo centrale come strumento per compensare le carenze idriche. Tuttavia, l'efficacia di questa pratica è spesso limitata da una scarsa disponibilità di risorse e dalle difficoltà che si riscontrano in caso di approvvigionamento in periodi critici (Lesk et al., 2016). Dall'altro lato, il miglioramento genetico offre prospettive interessanti attraverso la selezione di varietà tolleranti agli stress abiotici, in particolare alla siccità e alle ondate di calore (Mickelbart et al., 2015). Nonostante ciò, questa via risulta complessa da attuare a livello aziendale, a causa degli ingenti investimenti necessari e della scarsa reperibilità di risorse genetiche locali (Alvarez et al., 2016). In questo contesto di incertezza, una potenziale soluzione esplorata dal presente studio riguarda lo spostamento

dell'areale di coltivazione di alcune specie tipicamente adattate a un clima mediterraneo e quindi storicamente coltivate nel Sud Italia, verso regioni più a Nord caratterizzate da un clima temperato sub-continentale (Koppen-Geinger). Sebbene le mutate condizioni pedoclimatiche stiano conferendo al Veneto tratti sempre più simili a quelli delle regioni meridionali (Straffellini et al., 2023), permangono ostacoli importanti, come la persistenza di inverni rigidi e di primavere piovose, che possono condizionare negativamente alcune fasi di sviluppo, compromettendo così la produttività finale delle colture. In questo contesto il monitoraggio delle somme termiche, espresso tramite l'accumulo dei GDD (Growing Degree Days), rappresenta uno strumento fondamentale per correlare lo sviluppo fenologico e la produttività delle colture all'andamento meteorologico stagionale, offrendo così un parametro oggettivo per valutare l'impatto dei cambiamenti climatici sui cicli biologici delle colture. Di conseguenza, l'individuazione di tecniche colturali idonee ed epoche di semina ottimali, basate sul soddisfacimento delle esigenze termiche della pianta, diventano un requisito quasi essenziale per il successo produttivo delle coltivazioni.

Sulla base di queste premesse, l'obiettivo del presente lavoro sperimentale è quello di valutare l'adattabilità di alcune leguminose minori da granella - nello specifico fava, favino e cece - nell'areale veneto. Più nel dettaglio, attraverso l'impiego di varietà tipicamente adattate ad un clima mediterraneo, la ricerca intende analizzare la risposta produttiva e lo sviluppo fenologico in relazione

all'accumulo di gradi giorno (GDD), confrontando tre differenti epoche di semina (novembre, marzo e aprile).

Materiali e metodi

La prova è stata condotta, a partire dal 5 Novembre 2024, all'interno dell'azienda agraria sperimentale "L.Toniolo" dell'Università di Padova, ed è ancora in corso.

L'area di studio, sita a Legnaro (PD), è inserita in un contesto climatico sub-continentale temperato (Cfa secondo la classificazione di Koppen-Geinger, Beck et al., 2023). Durante l'intero periodo sperimentale, l'andamento meteorologico è stato monitorato mediante una stazione meteo dell'Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto (ARPAV) distante circa 250 m dal sito sperimentale. In questo scenario, è stato impostato un esperimento con disegno a blocchi completamente randomizzati con quattro repliche per valutare il comportamento di diverse leguminose: fava, cece e favino. Le parcelle di 4 m² sono state seminate in tre epoche distinte, una autunnale (novembre), rappresentativa degli areali a clima mediterraneo tipici del Sud Italia, e due primaverili (marzo e aprile), più coerenti con le condizioni dell'Italia settentrionale a clima temperato sub-continentale. Inoltre, durante tutto il periodo della prova, sono stati effettuati dei rilievi fenologici a cadenza settimanale. Nel dettaglio, l'andamento fenologico delle colture è stato valutato facendo riferimento alla scala BBCH (Meier, 2001) per fava e favino, mentre per il cece, in assenza di riferimenti dettagliati disponibili in letteratura, è stata avviata ex novo l'elaborazione di una scala fenologica specifica. Al fine di correlare la crescita delle colture alle variabili termiche del sito, sono state calcolate le somme termiche mediante l'impiego dei GDD, determinati come differenza tra la temperatura media giornaliera e la temperatura basale. Tale indice, infatti, consente di quantificare l'energia termica cumulata disponibile per le colture e di metterla in relazione con i processi di sviluppo fenologico (McMaster e Wilhelm, 1997). Le temperature medie giornaliere sono state ottenute dai dati ARPAV, mentre le temperature basali sono state ricavate dalla letteratura, assumendo valori pari a 0 °C per fava e favino (Confalone et al., 2011) e pari a 4 °C per il cece (Nahas et al., 2019). Infine, l'ultimo parametro valutato è stato quello della resa commerciale, uniformata per tutte le colture al 14% di umidità, per la quale è stata effettuata un'analisi della varianza (ANOVA) ad una via, confrontando i valori medi delle rese con i tre periodi di semina. In caso di ANOVA significativa, le differenze tra le epoche di semina sono state valutate con il test post-hoc di Tukey ($p < 0,05$).

Risultati e discussioni

L'analisi dei dati termo-pluviometrici rilevati presso la stazione di Legnaro (Fig. 1) permette di delineare un quadro climatico locale attraverso il confronto tra il lungo periodo (1994-2025) e il recente intervallo sperimentale (2024-2025). Per quanto concerne le temperature, i dati mostrano una sensibile variabilità entro stagione. Il deficit registrato a novembre 2024 e gennaio 2025, con precipitazioni ridotte di circa 70 mm nel primo caso e

dimezzate nel secondo rispetto alla media storica, indica una sensibile diminuzione delle piogge invernali. Questa distribuzione irregolare delle precipitazioni, confrontata con il passato, appare strettamente correlata alle dinamiche di cambiamento climatico attualmente in atto. Ciò è confermato anche dalla situazione termica, nella quale il confronto (Fig.1) evidenzia un aumento delle temperature medie generalizzato in tutto il periodo della sperimentazione rispetto al passato, con fenomeni accentuati nei mesi di gennaio e giugno 2025.

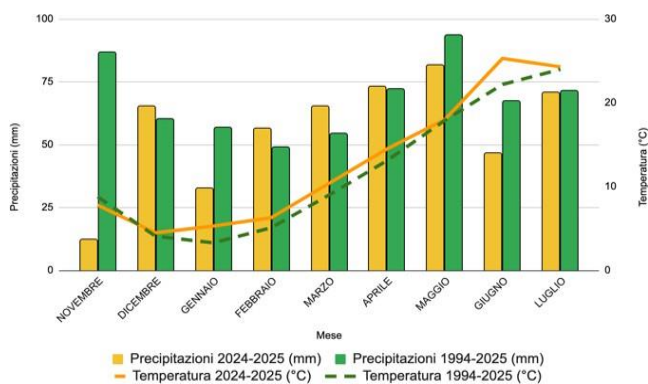


Fig. 1 - Precipitazioni e temperature medie mensili nel lungo periodo (1994-2025) e nel breve periodo (novembre 2024-luglio 2025)

Fig. 1 - Monthly average precipitation and temperatures in the long term (1994-2025) and in the short term (November 2024-July 2025)

Da ciò ne deriva che le evidenze raccolte confermano su scala locale la tendenza globale dell'estremizzazione dei fenomeni climatici, caratterizzati sempre più da un innalzamento delle temperature medie e da una distribuzione irregolare delle piogge.

Lo studio ha evidenziato una risposta fenologica e produttiva profondamente diversa tra le specie oggetto di studio, suggerendo strategie di adattamento al nuovo contesto climatico ben distinte tra di loro. Per favino e fava si osserva una produttività maggiore nelle epoche di semina precoci: i valori più alti si registrano con la prima epoca di semina (rese > 4,5 t/ha), in corrispondenza dei valori più elevati di GDD (superiori a 2750 per il favino e di quasi 2400 per la fava). Tuttavia, uno dei dati più rilevanti è il crollo di produzione con la terza epoca di semina per fava e in maniera più marcata per favino, arrivando anche a valori compresi tra 0,4 e 1 t/ha. Questo fenomeno indica che, nonostante un accumulo termico maggiore rispetto alla seconda epoca, il calore accumulato non viene tradotto in produzione, probabilmente a causa di stress termici o idrici durante le fasi fenologiche più sensibili come quelle di fioritura e riempimento dei baccelli. A dimostrazione di ciò è interessante notare come i GDD registrati durante la fase di sviluppo dei baccelli, per il favino, ad esempio, crollino da 478,1 in Epoca 1 a 169 in Epoca 3 (Tab. 1) Ciò evidenzia come, l'elevato calore percepito in terza epoca, possa aver accelerato il passaggio alla fase fenologica

successiva, di fatto limitando la formazione dei baccelli e di conseguenza anche la produzione.

In netto contrasto con le colture precedenti, il cece, manifesta un comportamento diametralmente opposto: pur mantenendo un fabbisogno termico più basso (sempre al di sotto dei 2000 GDD), registra il suo picco produttivo (>4 t/ha) proprio con la terza epoca di semina. I dati mostrano come, a fronte di una riduzione complessiva del ciclo, il cece riesca a ridistribuire strategicamente i GDD quasi raddoppiando l'energia termica dedicata alla fase di maturazione (627,5 GDD) rispetto alle epoche precedenti (411,9 e 436 GDD) (Tab. 2). Questa evidenza suggerisce come il cece riesca a tollerare meglio finestre di semina tardive, riuscendo anche ad avere una maggiore efficienza termica rispetto a colture come fava e favino che, in questa epoca, hanno sofferto particolarmente le condizioni pedoclimatiche. Di conseguenza se fava e favino riescono ad ottenere una buona stabilità produttiva solo con semine precoci che massimizzano l'accumulo termico utile, il cece riesce ad avere una maggiore duttilità riuscendo a massimizzare la resa con cicli termici più brevi e intensi.

Tab. 1 – Accumulo di GDD nelle fasi fenologiche principali del favino in relazione alle tre epoche di semina.

Tab. 1 – GDD accumulation in the main phenological phases of field beans in relation to the three sowing periods

FAVINO			
FASE	EPOCA 1	EPOCA 2	EPOCA 3
Germinazione	260,8	150,3	120,4
Sviluppo fogliare	275,9	311,9	174,1
Formazione germogli laterali	285,2	119	115,4
Allungamento internodi	70,6	115,4	230,9
Sviluppo infiorescenze	166,7	230,9	412,4
Fioritura	642,9	412,4	544,3
Sviluppo Baccelli	474,8	363,9	169
Maturazione	198,5	349,4	191,6
Senescenza	377,3	115,5	358,8

Tab. 2 – Accumulo di GDD nelle fasi fenologiche principali del cece in relazione alle tre epoche di semina.

Tab. 2 – GDD accumulation in the main phenological phases of chickpea in relation to the three sowing periods.

CECE			
FASE	EPOCA 1	EPOCA 2	EPOCA 3
Germinazione	165,7	194,6	119,5
Sviluppo fogliare	79,6	53	87
Vegetativa	468,5	497,1	359,5
Fioritura	395,3	251,5	368,6
Maturazione	411,9	436	627,5
Senescenza	396,9	244,5	298,8

Conclusioni

Questo studio dimostra come la scelta ottimale del periodo di semina sia una condizione fondamentale per garantire la stabilità produttiva delle leguminose in un contesto di cambiamento climatico, evidenziando come la pianura padana sia pronta a ospitare colture tradizionalmente vocate al clima mediterraneo. L'obiettivo principale è stato analizzare l'influenza del calore accumulato dalle piante sulla loro crescita e sulla resa finale, mettendo a confronto semine autunnali e primaverili.

Dai risultati emerge con chiarezza che fava e favino necessitano di semine anticipate per completare il proprio ciclo biologico garantendo buone produzioni. Nel contesto veneto, quando queste specie vengono seminate in periodi tendenzialmente più caldi, soffrono maggiormente stress abiotici che, colpendo le fasi fenologiche più sensibili, portano a rese inferiori. Al contrario, il cece ha mostrato un comportamento opposto, ottenendo una produzione migliore nelle semine primaverili rispetto a quella autunnale. Questo successo è dovuto probabilmente alla capacità di tale coltura di allocare al meglio le risorse in contesti climatici nei quali le altre specie studiate hanno sofferto, a dimostrazione di come la risposta all'incremento delle temperature vari sensibilmente tra le diverse specie.

In conclusione, l'impiego delle somme termiche, calcolate per la prima volta in questo areale per tali colture, dimostra che l'adattamento delle leguminose non dipende soltanto dal calore totale accumulato, ma dalla sincronizzazione tra fasi critiche e disponibilità termica. Mentre il cece si conferma una risorsa strategica per le semine primaverili, fava e favino richiedono semine anticipate per evitare che la fioritura coincida con accumuli termici eccessivi, che ne potrebbero compromettere la stabilità produttiva.

Sebbene i risultati ottenuti da questo primo anno di sperimentazione siano promettenti, occorre proseguire le prove per validarne l'attendibilità e la stabilità nel tempo. Questo studio intende quindi aprire la strada ad una gestione agronomica in cui la scelta delle specie e dei periodi di semina più adatti diventi uno strumento pratico per affrontare le sfide dei cambiamenti climatici, valorizzando colture che arricchiscano il comparto agricolo locale e garantiscano buone produzioni anche in condizioni pedoclimatiche nuove.

Bibliografia

- Alvarez S., Rodriguez P., Broetto F., Sanchez-Blanco M. J., 2016. Long-term responses and adaptive strategies of *Pistacia lentiscus* under moderate and severe water deficit and salinity. *Nature Plants*, 2 (16037): 1-9.
- Bas Nahas S. S., Interdonato R., Romero E., 2019. Estimating base temperature and thermal time requirement for chickpea (*Cicer arietinum* L.) emergence. *Revista Agronómica del Noroeste Argentino*, 39: 37-44.
- Beck H. E., McVicar T. R., Vergopolan N., Berg A., Luthi J., Nielsen U., Pan M., Peng S., Sheffield J., Wood E. F., 2023. High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. *Nature Scientific Data*, 10 (724): 1-10.

- Challinor A. J., Watson J., Lobell D. B., Howden S. M., Smith D. R., Chhetri N., 2014. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4 (4): 287-291.
- Confalone A., Boote K. J., Lizaso J., Sau F., 2011. Temperature and Photoperiod Effects on *Vicia faba* Phenology Simulated by CROPGRO-Fababean. *Agronomy Journal*, 103: 1036-1043
- Lesk C., Rowhani P., Ramankutty N., 2016. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, 529 (7584): 84-87.
- McMaster G. S., Wilhelm W. W., 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87 (4): 291-300.
- Meier U., 2001. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. *BBCH Monograph*: 33-36.
- Mickelbart M. V., Hasegawa P. M., Bailey-Serres J., 2015. Genetic mechanisms of abiotic stress tolerance that translate to crop yield stability. *Nature Reviews Genetics*, 16 (4): 237-251.
- Pörtner H.-O., Roberts D. C., Tignor M., Poloczanska E. S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., Rama B. (eds.), 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: 1-3056.
- Straffellini A., Tarolli P., 2023. Climate change-induced water stress and the potential for sustainable agriculture in the Venetian Plain. [Documento Unipd]: 1-15.

ASSESSMENT OF THE ECOSYSTEM SERVICES OF GREEN ROOFS IN THE VENETO PLAIN

VALUTAZIONE DEI SERVIZI ECOSISTEMICI DEI TETTI VERDI NELLA PIANURA VENETA

Giampaolo Zanin, Alexandra M. Lugo-Arroyo, Silvia Locatelli, Maria Giordano, Carmelo Maucieri

Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti Risorse naturali e Ambiente, Università di Padova, Viale Università, 16 - 35020 Legnaro (PD)

Abstract

This research evaluates how vegetation type, substrate depth and summer irrigation affect greenhouse gas fluxes (CO₂, CH₄, N₂O), substrate temperatures, and water retention in 48 extensive green-roof mesocosms at the University of Padua (Legnaro) from April 2022–March 2023. Vegetation strongly controlled CO₂ and Global Warming Potential (GWP) seasonally: wildflower mixes and *Sedum* mix showed high emissions in warm seasons, while cold- and warm-season grasses acted as better sinks in respective favorable seasons. Deeper substrate (14 cm) reduced daily temperature oscillations by 2–3 °C and increased water retention but was associated with higher CO₂ efflux and GWP in spring. Summer irrigation influenced N₂O sinks (higher irrigation increased uptake) and produced delayed effects on CO₂ in winter. Results indicate trade-offs among thermal insulation, hydrological performance and greenhouse gas balances, supporting service-specific design and long-term monitoring for urban green-roof implementation.

Parole chiave

Cambiamento climatico; Eventi estremi; Adattamento; Mitigazione

Keywords

Climate change; Extreme events; Adaptation; Mitigation

Introduzione

I Tetti Verdi (TV) sono coperture vegetate dotate di un substrato capace di immagazzinare temporaneamente l'acqua piovana e rappresentano, in ambiente urbano, una promettente strategia di adattamento al cambiamento climatico in un contesto di incremento della sostenibilità (Andenæs *et al.*, 2018; Manso *et al.*, 2021). Infatti, l'incremento dell'urbanizzazione e le pressioni indotte dal cambiamento climatico hanno aumentato le emissioni di gas a effetto serra, le temperature e l'irregolarità delle precipitazioni, stimolando la ricerca di soluzioni integrate per mitigare questi impatti (Teemusk *et al.*, 2019; Han & Zhu, 2020). I TV forniscono molteplici servizi ecosistemici che possono contribuire a chiudere i cicli di nutrienti, energia e acqua nelle città, oltre a migliorare connettività paesaggistica, biodiversità, qualità delle acque ecc... (Oberndorfer *et al.*, 2007).

Tra i servizi ecosistemici maggiormente documentati vi sono i benefici termici: le coperture vegetate possono ridurre la domanda energetica per raffreddamento estivo e riscaldamento invernale grazie all'evapotraspirazione, all'ombreggiamento della vegetazione, all'isolamento del pacchetto substrato-drenaggio e a un'albedo spesso superiore rispetto ai tetti convenzionali, con effetti potenzialmente rilevanti anche a scala urbana per mitigare l'Isola di Calore Urbana (Shafique *et al.*, 2018; Sanchez & Reames, 2019). Tuttavia, l'entità di tali benefici dipende fortemente dalle caratteristiche del substrato, dal tipo di vegetazione, dal disegno dell'isolamento e dalle condizioni meteorologiche locali (Shafique *et al.*, 2018; Eksi *et al.*, 2017).

Meno quantificati ma altrettanto rilevante è il contributo dei TV al sequestro del carbonio e al bilancio dei gas serra.

Infatti, i TV possono assorbire CO₂ mediante fotosintesi e accumulare materia organica nel substrato, oltre a ridurre indirettamente le emissioni legate al consumo energetico dell'edificio (Shafique *et al.*, 2020). Tuttavia, possono anche comportarsi sia come serbatoi sia come sorgenti di gas serra, in funzione dell'accumulo e della decomposizione della materia organica, della profondità e delle proprietà del substrato, della gestione idrica e della composizione vegetale (Halim *et al.*, 2022; Lugo-Arroyo *et al.*, 2024). I processi anaerobici in ambienti fortemente saturi possono generare emissioni di CH₄ e N₂O tramite metanogenesi e denitrificazione incompleta, mentre processi aerobici (inclusa la nitrificazione) possono produrre N₂O soprattutto dopo fertilizzazioni o pratiche di gestione (Dusza *et al.*, 2017; Mitchell *et al.*, 2018; Teemusk *et al.*, 2019). Poiché molti sistemi sono progettati per condizioni ossiche e buon drenaggio, questi aspetti negativi sono spesso limitati, sebbene condizioni di elevata umidità nel substrato, soprattutto in sistemi con specie di piante caratterizzate da bassi livelli di evapotraspirazione (es. *Sedum* spp.), possono accentuare le emissioni (Halim *et al.*, 2022).

La gestione delle acque meteoriche è un altro servizio chiave dei TV: a livello di edificio, esse possono ridurre il volume di deflusso annuale e ritardare il picco di deflusso durante eventi piovosi, contribuendo a ridurre il carico sulle infrastrutture di drenaggio e il rischio di allagamenti urbani (Versini *et al.*, 2020; Ouldboukhitine *et al.*, 2012). La capacità di ritenzione e detenzione idrica dipende dalla combinazione di vegetazione, profondità e porosità del

substrato, condizioni antecedenti di umidità e intensità dell'evento pluviometrico (Shafique *et al.*, 2018; Versini *et al.*, 2020).

Nonostante il crescente numero di studi, permangono lacune importanti: in che misura fattori di progetto e gestione (es. tipo di vegetazione, profondità del substrato, regimi irrigui) interagiscono per promuovere o ostacolare i diversi servizi ecosistemici forniti dai TV, e come tali effetti varino su base stagionale e climatica? Studi sperimentali con misure continue e analisi stagionali sono necessari per chiarire questi meccanismi e orientare scelte progettuali mirate (Lugo-Arroyo *et al.*, 2024; Halim *et al.*, 2022). Inoltre, l'eterogeneità delle condizioni locali e i possibili trade-off fra servizi (es. massimizzare la ritenzione idrica vs. minimizzare le emissioni di CO₂) richiedono un approccio di progettazione con obiettivi espliciti e contestualizzati piuttosto che soluzioni "one-size-fits-all" (Manso *et al.*, 2021).

Il presente lavoro si inserisce in questo quadro proponendo una valutazione sperimentale su mesocosmi di coperture estensive. L'obiettivo è quantificare come tipo di vegetazione, profondità del substrato e livello di irrigazione influenzino le emissioni di gas serra (CO₂, CH₄, N₂O), le temperature del substrato e il bilancio idrico su base stagionale e annua. Tali evidenze mirano a supportare decisioni progettuali e gestionali basate su dati empirici, per massimizzare i benefici climatici e idrologici dei TV e per identificare possibili compromessi tra servizi.

Materiali e Metodi

Lo studio è stato condotto presso l'azienda Sperimentale "L. Toniolo" dell'Università di Padova, situata a Legnaro (45°21'5.82" N, 11°57'2.44" E), e ha avuto come oggetto la caratterizzazione funzionale di tetti verdi estensivi. Le rilevazioni sono state effettuate su un arco temporale di un anno, da aprile 2022 a marzo 2023, utilizzando mesocosmi di TV allestiti nel 2020. La scelta del sito e la durata dell'esperimento hanno permesso di osservare le risposte stagionali dei sistemi, includendo una stagione estiva particolarmente calda e secca che ha influenzato la dinamica delle variabili misurate (Lugo-Arroyo *et al.*, 2024).

L'apparato sperimentale era costituito da 48 mesocosmi di TV in configurazione split-plot con tre repliche per trattamento. Il disegno sperimentale prevedeva due profondità del substrato (8 cm e 14 cm) e quattro tipologie di vegetazione: miscela di *Sedum* (Se), specie da tappeto erboso di microterme (Mi), specie da tappeto erboso di macroterme (Ma) e mix di specie da prato fiorito (Pf). I trattamenti di irrigazione costituivano il fattore a livello di plot principale, con due livelli: 1 L m⁻² giorno⁻¹ e 2 L m⁻² giorno⁻¹. L'irrigazione è stata applicata esclusivamente nella stagione estiva, con frequenza variabile in funzione degli eventi pluviometrici, così da simulare una gestione irrigua minimale e realistica per coperture estensive.

Tutti i mesocosmi erano dotati di un pacchetto di drenaggio/accumulo (Daku FSD 20) con una capacità dichiarata massima di 13.1 L m⁻², al fine di riprodurre realisticamente le condizioni di ritenzione idrica dei sistemi

di TV. Il substrato impiegato in tutte le unità sperimentali era Volcaflor ExtensiveTM (Europomice, Grosseto, Italia). Maggiori dettagli sulle specifiche dimensionali e strutturali dei mesocosmi e sulla composizione dettagliata delle miscele vegetali sono riportati in Lugo-Arroyo *et al.* (2024).

Le variabili meteorologiche (radiazione solare, temperatura dell'aria, precipitazioni, velocità del vento) sono state monitorate mediante una stazione ARPAV posta a circa 500 m dal sito sperimentale.

Le emissioni di gas serra (CO₂, CH₄, N₂O) sono state misurate settimanalmente nell'intero periodo sperimentale usando un analizzatore FTIR portatile (Gasmet DX4040) in combinazione con una camera statica-non stazionaria. Le misurazioni sono state effettuate nella fascia oraria 08:00–14:30 per assicurare comparabilità temporale tra i campionamenti. Per la stima del potenziale di riscaldamento climatico integrato (Global Warming Potential, GWP) è stata applicata la ponderazione dei singoli gas serra secondo le indicazioni IPCC (2013): $GWP = CO_2 + 34 \times CH_4 + 298 \times N_2O$, espressa in mg CO_{2-eq} m⁻² h⁻¹. Le temperature del substrato sono state monitorate con un termometro da suolo portatile tre volte al giorno (mattina 08:00–09:00, mezzogiorno 12:00–13:00, sera 17:00–18:00) su base settimanale; la sonda è stata inserita a circa 3 cm dalla base del substrato per misurare il regime termico prossimale alla superficie di interfaccia con il pacchetto drenante. Tale protocollo ha permesso di caratterizzare l'oscillazione termica giornaliera e stagionale in relazione ai trattamenti di profondità, vegetazione e irrigazione.

La prestazione idrologica è stata valutata mediante un semplice modello di bilancio idrico a scala di mesocosmo, considerando come ingressi precipitazione e irrigazione e come uscita l'acqua drenata raccolta e pesata dopo eventi pluviometrici significativi. La raccolta della frazione drenata è stata eseguita con cadenza variabile in funzione dell'intensità e della durata degli eventi, consentendo di stimare sia la capacità di ritenzione cumulativa stagionale sia la detenzione temporanea.

L'analisi statistica è stata condotta con R (versione 4.2.2). I dati GHG, non normalmente distribuiti, sono stati analizzati con test non parametrici (Kruskal-Wallis e Mann-Whitney). Le temperature del substrato, risultate normalmente distribuite, sono state investigate mediante ANOVA a tre vie per valutare gli effetti principali e le interazioni tra vegetazione, profondità e irrigazione. Le correlazioni tra emissioni, GWP e temperature del substrato sono state esplorate tramite correlazioni di Spearman.

Risultati e Discussione

I dati meteorologici registrati durante il periodo sperimentale hanno mostrato precipitazioni concentrate tra la tarda estate e l'inizio autunno, mentre primavera e primo periodo estivo sono stati particolarmente siccitosi, determinando una stagione di crescita anomala e secca nel 2022.

Le analisi dei flussi di gas serra hanno evidenziato un effetto significativo del tipo di vegetazione sulle emissioni di CO₂ in tutte le stagioni. In primavera tutte le unità

sperimentali si sono comportate come sorgenti nette di CO₂, con le medie più basse in Mi e le più alte in Pf. La profondità del substrato ha avuto un effetto marcato in questa stagione, poiché i mesocosmi con 14 cm di substrato hanno mostrato valori mediani di CO₂ significativamente superiori rispetto a quelli con 8 cm. Il flusso di CO₂ ha mostrato correlazioni positive con la temperatura del substrato. In estate la vegetazione ha continuato a guidare le emissioni di CO₂, con Pf a valori massimi e i Ma a valori minimi; CH₄ e N₂O hanno mostrato un valore mediano prossimo allo zero, sebbene profondità e irrigazione estiva abbiano incrementato la capacità complessiva dei sistemi di agire come sink per N₂O. In autunno solo il trattamento Se ha mantenuto flussi positivi di CO₂, mentre la profondità non ha influenzato significativamente le emissioni; i sistemi irrigati maggiormente in estate hanno mostrato una maggiore ossidazione di CH₄, suggerendo effetti ritardati della gestione irrigua. Nel periodo invernale tutte le tipologie vegetazionali hanno agito da sink di CO₂, con Mi e Pf che hanno fissato maggiormente; in questa stagione non si è osservato effetto significativo della profondità sui flussi gassosi, mentre il livello di irrigazione estiva ha evidenziato un effetto ritardato sui flussi di CO₂, con il livello inferiore di irrigazione associato a un sink invernale più marcato. A livello annuale la vegetazione ha influenzato tutti i flussi di gas serra: i valori mediani di CO₂ variavano da valori leggermente negativi per i Mi a valori positivi più elevati per Se; la profondità del substrato ha incrementato CO₂ e GWP su base annua, con valori mediani maggiori nei trattamenti a 14 cm rispetto agli 8 cm.

La valutazione del GWP ha mostrato come la dinamica sia dominata dalla CO₂: la vegetazione ha influenzato la GWP in tutte le stagioni e il substrato più profondo ha incrementato in maniera marcata il valore di GWP in primavera. L'irrigazione estiva ha mostrato effetti stagionali sul GWP ma impatti limitati sul GWP annuo complessivo nelle condizioni sperimentali analizzate.

Per quanto riguarda il regime termico del substrato, la profondità si è rivelata l'unico fattore significativo in tutte le stagioni: i trattamenti con 14 cm di substrato hanno ridotto l'escursione termica mattina-sera di 2–3 °C rispetto ai 8 cm. Inoltre, nella stagione estiva l'interazione tra profondità e irrigazione ha diminuito la variabilità interna tra repliche, indicando che combinazioni di maggiore profondità e apporto irriguo più elevato stabilizzano il regime termico.

La prestazione idrologica, valutata come capacità percentuale di ritenzione dell'acqua, è risultata influenzata su base annua sia dalla vegetazione sia dalla profondità del substrato. I trattamenti con Se e Pf hanno mostrato i valori mediani di ritenzione più elevati (59,5%), mentre Ma ha presentato la minore capacità di ritenzione; il substrato da 14 cm ha aumentato la ritenzione rispetto a 8 cm (66,4% vs. 57,2%). A scala stagionale la ritenzione è stata massima in primavera e minima in autunno/inverno, in relazione alla disponibilità di input idrici e al regime evaporativo. L'irrigazione estiva non ha alterato significativamente la capacità complessiva di ritenzione.

Conclusioni

Dai dati ottenuti non emerge una singola configurazione ottimale per ottimizzare simultaneamente tutti i servizi ecosistemici indagati in questo lavoro: la progettazione dei TV richiede la definizione di obiettivi specifici e il bilanciamento dei compromessi tra isolamento termico, ritenzione idrica e bilancio dei gas serra, oltre alla necessità di monitoraggi stagionali e a lungo termine per cogliere la variabilità interannuale e gli effetti di eventi climatici estremi.

Bibliografia

- Andenæs E., Kvande T., Muthanna T., Lohne, J., 2018. Performance of Blue-Green Roofs in Cold Climates: A Scoping Review. *Buildings*, 8(4), 55.
- Dusza Y., Barot S., Kraepiel Y., Lata J.-C., Abbadie L., Raynaud, X., 2017. Multifunctionality is affected by interactions between green roof vegetation type, substrate depth, and substrate type. *Ecology and Evolution*, 7(7), 2357–2369.
- Eksi M., Rowe D. B., Wichman I. S., Andresen, J. A., 2017. Effect of substrate depth, vegetation type, and season on green roof thermal properties. *Energy and Buildings*, 145, 174–187.
- Halim M. A., Vantellingen J., Gorgolewski A. S., Rose W. K., Drake J. A. P., Margolis L., Thomas, S. C., 2021. Greenhouse gases and green roofs: Carbon dioxide and methane fluxes in relation to substrate characteristics. *Urban Ecosystems*
- Han M., Zhu B., 2020. Changes in soil greenhouse gas fluxes by land use change from primary forest. *Global Change Biology*, 26(4), 2656–2667.
- Lugo-Arroyo A., Zanin G., Thompson A., Borin M., Maucieri C., 2024. Diurnal greenhouse gas emissions and substrate temperatures from blue-green roofs in north-eastern Italy during a dry-hot summer season. *Scientia Horticulturae*, 324, 112560.
- Manso M., Teotónio I., Silva C. M., Cruz, C. O., 2021. Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110111.
- Mitchell M. E., Hamilton T. L., Uebel-Niemeier C., Hopfensperger K. N., Buffam I., 2018. Nitrogen cycling players and processes in green roof ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 132, 114–125.
- Oberndorfer E., Lundholm J., Bass B., Coffman R. R., Doshi H., Dunnett N., Gaffin S., Köhler M., Liu K. K. Y., Rowe B., 2007. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience*, 57(10), 823–833.
- Ouldboukhite S. E., Belarbi R., Djedjig R., 2012. Characterization of green roof components: Measurements of thermal and hydrological properties. *Building and Environment*, 56, 78–85.
- Sanchez L., Reames T. G., 2019. Cooling Detroit: A socio-spatial analysis of equity in green roofs as an urban heat island mitigation strategy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 44, 126331.

- Shafique M., Kim R., Rafiq M., 2018. Green roof benefits, opportunities, and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 757–773.
- Shafique M., Xue X., Luo X., 2020. An overview of carbon sequestration of green roofs in urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 47, 126515.
- Teemusk A., Kull A., Kanal A., Mander Ü., 2019. Environmental factors affecting greenhouse gas fluxes of green roofs in temperate zone. *Science of The Total Environment*, 694, 133699.
- Versini P. A., Stanic F., Gires, A. Schertzer D., Tchiguirinskaia I., 2020. Measurements of the water balance components of a large green roof in the greater Paris area. *Earth System Science Data*, 12(2), 1025-1035.

MULTI-SCALE MONITORING OF HIGH-VALUE HERITAGE TREES UNDER CLIMATE VARIABILITY: THE CASE OF VILLA DEMIDOFF HISTORIC GARDEN (FLORENCE, ITALY)

MONITORAGGIO MULTI-SCALA DI ALBERI DI ALTO VALORE PAESAGGISTICO NELL'AMBITO DI VARIABILITÀ CLIMATICA: IL CASO DEL GIARDINO STORICO DI VILLA DEMIDOFF (FIRENZE, ITALIA)

Zammarchi F.^{1*}, Pollastrini M.¹, Carrari E.¹, Kasraoui J.¹, Argenti G.¹, Costafreda-Aumedes S.², Bartoloni N.¹, Vannella M.³, Moriondo M.², Dibari C.¹

¹ Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry, University of Firenze, P. le Cascine 18, 50144 Florence, Italy

² Institute of BioEconomy – CNR (CNR–IBE), via Madonna del Piano 10, Sesto Fiorentino, 50019, Florence, Italy

³ Città Metropolitana di Firenze – Parco Mediceo di Pratolino (Villa Demidoff), via Fiorentina 276, Vaglia, 50036, Florence, Italy

*francesco.zammarchi@unifi.it

Abstract

Historic gardens host centuries-old trees exposed to climate variability, ageing and stress factors. In Villa Demidoff (the Medici Park of Pratolino, Florence, Italy), inventories indicate that only 53% of trees recorded in 1999 were still alive in 2025. Within the CLIM4DEM project, a multi-scale monitoring approach was applied by combining an updated GIS-based census with leaf-level eco-physiological measurements, meteorological observations, and canopy- to stand-level indicators from UAV, Sentinel-2 and LiDAR. Eco-physiological monitoring included chlorophyll fluorescence, stomatal conductance, chlorophyll content and leaf structural traits, while atmospheric conditions contextualised short-term functional responses. Following Carrari et al. (2024), transformed NDVI (NDVIt), integrating Sentinel-2 imagery and LiDAR structural data at 10 × 10 m resolution, was used as a preliminary screening layer of canopy vigour. The framework provides a baseline for monitoring, calibration and adaptive management of the heritage trees in forest-like historic gardens.

Parole chiave

vigore della chioma; gestione del patrimonio verde; analisi di immagini; telerilevamento; ecofisiologia fogliare

Keywords

canopy vigour; green heritage management; image analysis; remote sensing; leaf ecophysiology

Introduction

Historic gardens host long-lived trees, providing several ecosystem functions and cultural services, including microclimate regulation, mitigation of thermal extremes, carbon storage, habitat provision and strong landscape identity (Livesley et al. 2016; Fineschi & Loreto 2020). Beyond their ecological role, old and veteran trees contribute to the historical, aesthetic and symbolic value of designed landscapes, representing irreplaceable elements of living heritage whose conservation is crucial for the preservation of historic gardens themselves (ICOMOS 1982; Goulty 2003; Sá Carneiro et al. 2012), not only due to technical issues related to tree health and safety, but also as a strategy for preserving and valorising their cultural landscapes (Carrari et al. 2024). In Mediterranean regions, the functions and values of historic gardens are increasingly threatened by climate extremes (e.g. more frequent heatwaves, prolonged summer droughts, intense windstorms, etc.) leading to increased susceptibility to pests, pathogens and decay, which, when exacerbated by the ageing processes, structural defects and repeated biotic and abiotic stresses will likely and progressively affect crown/trunk functionality and stability, and, in turn the safety for visitors and monuments. In this context, there is a growing need for smart, repeatable monitoring approaches able to capture how heritage trees

respond to uneven climatic conditions and to translate this information into operational tools for garden managers (Lausch et al. 2017; Bussotti et al. 2015; Carrari et al. 2022). The management of trees in historic gardens has traditionally relied on field inventories and visual assessments, which even remaining essential for describing tree identity, size, crown condition, structural defects and visible symptoms, is time-consuming, spatially discontinuous and only partly able to detect short-term functional responses to environmental stress. For this reason, field measurements increasingly need to be complemented by easy-to-retrieve functional and spatial indicators describing tree vitality, canopy functionality and patterns of response under changing environmental conditions, also to better spatially identify priority areas for further inspections.

Recent developments in eco-physiology and remote sensing technologies/applications allow field observations to be integrated into multi-level monitoring frameworks, linking individual-tree functional condition with canopy- and stand-scale patterns of greenness, structure and vigour. A recent example is the EFFORT framework developed by Carrari et al. (2024), which combined Sentinel-2 imagery, LiDAR-derived structural information and time-lapse imagery to support tree-health monitoring in historic gardens. In this framework, a transformed NDVI index (NDVIt) was introduced to demonstrate the potential of combining

spectral, structural and phenological indicators for adaptive tree management.

This issue is particularly evident in the Medici Park of Pratolino – Villa Demidoff, one of the most important and largest historic gardens in the Florentine area inserted in the World Heritage List of UNESCO, with a tree presence of exceptional landscape and cultural value (Gellini & Grossoni 1985; Dibari & Bussotti, 2002), where long-term observations highlight both a substantial loss of heritage trees and the persistence of surviving trees of remarkable landscape value, and the need for continuous in-depth monitoring to prevent further uneven losses.

The general objective of the CLIM4DEM project is to assess the condition of the arboreal heritage of Villa Demidoff in relation to climate variability by adapting the EFFORT framework for effective multi-scale monitoring of the arboreal and forest components of the historic garden. The project builds on the updated GIS-based census of trees of remarkable landscape value (RLV), which revised the 1980s–1990s inventories and provided the structural and health baseline for the monitored trees and stands (Grossoni 1983; Gellini & Grossoni 1985; Dibari & Bussotti 2002).

Specifically, CLIM4DEM aims to: i) investigate vitality, canopy functionality and short-term physiological regulation of selected heritage trees through seasonal eco-physiological measurements, crown-level observations and vapour pressure deficit (VPD) context; and ii) test the applicability of the EFFORT-derived NDVI_{It} approach as a park-scale indicator of canopy vigour in a historic garden with a large and heterogeneous forested component.

This paper presents preliminary results from the first year of activities carried out in Villa Demidoff. Specifically, it reports the seasonal eco-physiological responses of ten selected heritage trees and the summer 2025 application of NDVI_{It} for screening canopy vigour.

Materials and methods

The study was conducted in the Medici Park of Pratolino – Villa Demidoff (43.860° N, 11.276° E; Vaglia, Florence, central Italy). The park covers about 150 ha and includes an extensive arboreal component previously documented by periodic historical tree inventories (Grossoni 1983; Gellini & Grossoni 1985; Dibari & Bussotti 2002).

Within CLIM4DEM, the RLV census (dated back to 1999, Dibari & Bussotti 2002) was updated, i.e. information on the main reference for tree identity, location and previous dendrometric information, field records on species, tree code, dendrometric traits, crown condition, visible defects, structural alterations and elements relevant to safety management were collected and georeferenced. To this, the field form developed in 2002 (Dibari & Bussotti 2002) was used and adapted so as to have a diachronic picture of the state of the RLV. All the collected information was then entered into a GIS database, providing the baseline for selecting trees and plots for further tree stand monitoring analysis.

Specifically, the methodological framework (based and re-adapted on EFFORT project, Carrari et al. 2024) was designed to monitor the arboreal component of Villa

Demidoff at two complementary levels: i) selected heritage trees (selected among the RLV individuals), through seasonal eco-physiological measurements, local meteorological observations and crown-level vegetation indices; and ii) the whole forested component of the historic garden, by using the transformed NDVI (NDVI_{It}) approach, as a spatial indicator of canopy vigour.

Eco-physiological monitoring was carried out on ten mature to veteran trees representing the main genera, size classes and health conditions occurring in the central monumental area of the garden. Although their age is not known precisely, historical sources and previous inventories suggest that many censused trees may exceed one century of age (Grossoni 1983; Gellini & Grossoni 1985). The sample comprised six species: *Platanus acerifolia* (PN11), *Q. cerris* (BM42, PA7, W9), *Q. ilex* (Z4), *Q. pubescens* (PC1, PU2), *Q. robur* (PH6, PN12) and *Cedrus deodara* (PN9). Two seasonal campaigns were conducted on 25 July and 3 October 2025, representing summer and post-summer/autumn conditions. On each broadleaved tree, fully expanded and visually healthy leaves were sampled from accessible, well-lit outer-crown sectors with comparable exposure. Leaf-level measurements were performed using a LI-600 porometer/fluorometer for chlorophyll fluorescence and stomatal conductance, a portable SPAD meter for chlorophyll content, and image-based morphometric analysis for specific leaf area. Leaves were treated as repeated observations within each tree, while the individual tree was considered the independent biological unit. For *C. deodara*, only structural traits and canopy-level indices were considered, because its needle structure did not allow the same leaf-level physiological and biochemical measurements used for broadleaved species.

The eco-physiological assessment included chlorophyll fluorescence, stomatal conductance, chlorophyll content and leaf functional traits. Maximum quantum efficiency of PSII (F_v/F_m) was measured on dark-adapted leaves, while effective quantum yield of PSII (ΦPSII), electron transport rate (ETR, μmol e⁻ m⁻² s⁻¹) and stomatal conductance (g_{sw}, mmol m⁻² s⁻¹) were measured on light-adapted leaves using a LI-600 porometer/fluorometer (LI-COR Biosciences). Chlorophyll content was estimated using a portable SPAD meter. Specific leaf area (SLA, cm² g⁻¹) was calculated as the ratio between leaf area, obtained from high-resolution images processed with the software ImageJ, and dry mass measured after oven drying.

Meteorological conditions were monitored continuously with a Netsens automatic weather station which was installed inside the park. Air temperature and relative humidity recorded during the campaigns were used to derive vapour pressure deficit (VPD), considered the main atmospheric variable for interpreting short-term physiological responses, particularly stomatal regulation (Flexas et al. 2014). To link leaf-level measurements with crown-level signals, UAV multispectral orthomosaic images were acquired in summer and autumn field measurements over the same selected trees. For each tree and campaign, crown polygons were delineated to extract mean NDVI and related vegetation indices as crown-scale indicators of greenness, density and photosynthetic activity. At park scale, NDVI_{It} was derived

from Sentinel-2 imagery and airborne LiDAR following the approach proposed by Carrari et al. (2024). Summer Sentinel-2 Level-2A images acquired from June to September between 2017 and 2025 were processed in Google Earth Engine, applying cloud and quality masks and retaining arboreal pixels at 10×10 m resolution. NDVI was calculated from red and near-infrared bands and combined with LiDAR-derived canopy cover and maximum canopy height to compute NDVI_{It} as a structurally weighted vegetation index.

To account for the forest-like heterogeneity of Villa Demidoff, forested pixels were zoned into vegetation-type and density classes. The zonation was derived from satellite imagery and checked through image visual interpretation and field observations. Tree pixels were classified into three main vegetation types (broadleaf, evergreen and mixed trees) and each class was further divided according to stand density.

Field-based crown transparency was used to support the interpretation of NDVI_{It} patterns. A network of 10×10 m plots was surveyed in late summer 2025 to represent the main vegetation-type and density zones. In each plot, dominant species, stand structure and crown characteristics were recorded. Photosynthetically active radiation (PAR) was measured with an LP-80 ceptometer under the canopy and in nearby open conditions to estimate percentage crown transparency.

Agreement statistics and classification metrics were computed to explore alternative class-specific NDVI_{It} criteria, but were treated as an exploratory calibration step rather than as the main output of the contribution.

Eco-physiological and proximal-sensing data were organised at leaf, individual-tree and species level. Leaf-level records were used to describe within-tree variability and seasonal distributions, but not as independent species-level replication. At individual-tree level, medians were calculated for each variable and campaign, using the tree as the independent biological unit. Species-level summaries were interpreted descriptively, given the limited and unbalanced number of trees per species. Seasonal differences between July and October were explored using non-parametric tests, distinguishing leaf-level descriptive patterns from tree-level summaries. Relationships among eco-physiological variables, VPD and crown-level NDVI were explored as preliminary indicators of functional response. At park scale, NDVI_{It} was analysed as a continuous spatial layer, with summary statistics computed for all arboreal pixels and, where appropriate, for vegetation-type and density zones. Statistical analyses were performed in R/RStudio, while spatial processing was conducted in QGIS and Google Earth Engine.

Results and discussion

Heritage tree vitality

The first year of CLIM4DEM monitoring showed a seasonal signal in the selected heritage trees, detectable across several eco-physiological variables (Tab. 1). Non-parametric tests indicated July–October shifts for multiple traits, with different intensity depending on species and variable. Among the measured traits, Φ PSII and gsw captured the

clearest seasonal patterns (Tab. 1; Fig. 1). Fv/Fm remained generally within functional ranges in July and decreased slightly in October, suggesting seasonal modulation of maximum PSII efficiency rather than severe photochemical damage. Φ PSII showed a stronger seasonal decline and was therefore more informative for describing post-summer changes in operational photosynthetic performance. Stomatal conductance was highly variable, with lower and more dispersed values in July and higher but still heterogeneous values in October. SLA mainly reflected species-specific leaf strategies, while chlorophyll content remained relatively high in *Q. ilex* and *Q. cerris*, indicating that the observed seasonal shifts were not simply associated with advanced senescence.

At species level, the seasonal signal was expressed through different dominant traits rather than through a simple stress gradient. *Q. robur* showed the clearest integration between Φ PSII, crown-level NDVI and VPD, while *Q. pubescens* and *Q. cerris* showed more variable responses. *Q. ilex* displayed a more stable and conservative behaviour, consistent with its sclerophyllous evergreen leaf habit (Niinemets 2015). *Platanus acerifolia* and *Cedrus deodara* were interpreted descriptively because of limited replication and methodological constraints.

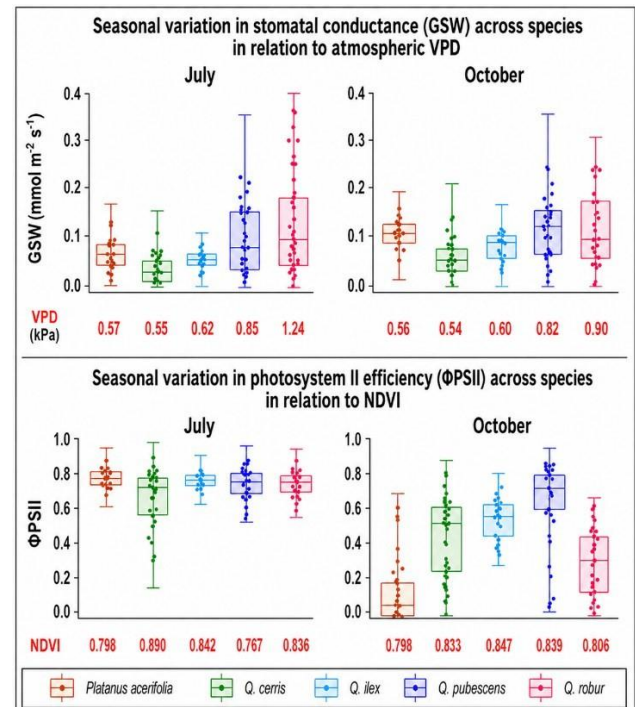


Fig. 1 – Variazione stagionale di Φ PSII e gsw nelle specie di Villa Demidoff a luglio e ottobre 2025, con valori associati di NDVI di chioma e VPD.

Fig. 1 – Seasonal variation of Φ PSII and gsw across species at Villa Demidoff in July and October 2025, with associated crown-scale NDVI and VPD values.

Tab. 1 – Valori medi $\pm$ deviazione standard di Fv/Fm, Φ PSII, ETR, conduttanza stomatica (gsw), indice di clorofilla (CHL, unità SPAD) e specific leaf area (SLA) per le principali specie monitorate a luglio e ottobre 2025 a Villa Demidoff.

Tab. 1 – Mean $\pm$ SD values of Fv/Fm, Φ PSII, ETR, stomatal conductance (gsw), chlorophyll index (CHL, SPAD) and specific leaf area (SLA) for the main monitored species in July and October 2025 at Villa Demidoff.

Species	Fv/Fm		Φ PSII		ETR		gsw (mmol m ⁻² s ⁻¹)		CHL (SPAD)		SLA (cm ² g ⁻¹)	
	July	Oct	July	Oct	July	Oct	July	Oct	July	Oct	July	Oct
<i>Platanus acerifolia</i>	0.81 $\pm$ 0.02	0.69 $\pm$ 0.05	0.75 $\pm$ 0.02	0.22 $\pm$ 0.16	6.29 $\pm$ 1.74	48.60 $\pm$ 22.71	0.05 $\pm$ 0.02	0.11 $\pm$ 0.02	29.2 $\pm$ 3.0	21.6 $\pm$ 2.3	122.6	126
<i>Q. cerris</i>	0.81 $\pm$ 0.02	0.72 $\pm$ 0.06	0.66 $\pm$ 0.08	0.47 $\pm$ 0.15	55.37 $\pm$ 10.73	100.32 $\pm$ 54.46	0.03 $\pm$ 0.02	0.07 $\pm$ 0.04	43.7 $\pm$ 3.5	45.4 $\pm$ 4.1	96.3	89.1
<i>Q. ilex</i>	0.79 $\pm$ 0.02	0.72 $\pm$ 0.04	0.73 $\pm$ 0.02	0.55 $\pm$ 0.16	25.97 $\pm$ 3.73	33.94 $\pm$ 57.44	0.05 $\pm$ 0.02	0.12 $\pm$ 0.09	54.1 $\pm$ 2.6	63.7 $\pm$ 16.2	54.3	48.7
<i>Q. pubescens</i>	0.82 $\pm$ 0.05	0.77 $\pm$ 0.04	0.72 $\pm$ 0.03	0.61 $\pm$ 0.12	47.21 $\pm$ 12.44	111.13 $\pm$ 64.73	0.09 $\pm$ 0.07	0.12 $\pm$ 0.05	41.0 $\pm$ 2.9	39.1 $\pm$ 2.8	85	94.8
<i>Q. robur</i>	0.82 $\pm$ 0.01	0.72 $\pm$ 0.04	0.73 $\pm$ 0.02	0.38 $\pm$ 0.15	37.66 $\pm$ 4.55	97.91 $\pm$ 58.76	0.12 $\pm$ 0.06	0.12 $\pm$ 0.07	35.6 $\pm$ 4.1	36.9 $\pm$ 4.8	86.4	92.9

Relationships with NDVI and VPD clarified the seasonal interpretation of the physiological data (Fig. 1). NDVI–physiology relationships were weak in July and became more structured in October, especially for Φ PSII–NDVI ($R^2 = 0.03$ in July; $R^2 = 0.24$ in October). Similarly, the gsw–VPD relationship increased from $R^2 = 0.01$ in July to $R^2 = 0.15$ in October, indicating that canopy condition and atmospheric demand became more informative in the post-summer phase.

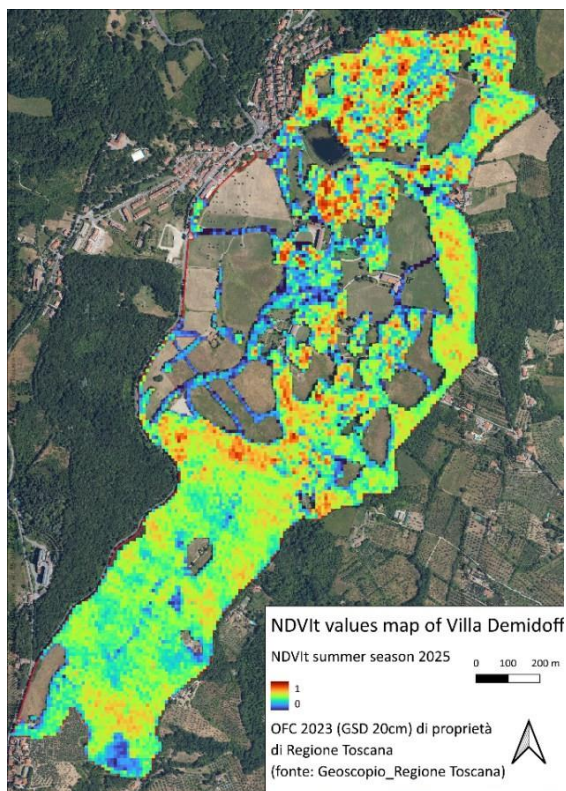


Fig. 2 – Mappa NDVI estiva 2025 di Villa Demidoff. I valori continui di NDVI rappresentano il vigore della chioma a scala di parco con risoluzione 10 $\times$ 10 m

Fig. 2 – Summer 2025 NDVI map of Villa Demidoff. Continuous NDVI values represent park-scale canopy vigour at 10 $\times$ 10 m resolution.

Canopy vigour (park scale)

At park scale, NDVI provided the main spatial result of the first-year monitoring (Fig. 2).

The NDVI map highlighted marked heterogeneity in canopy vigour across the arboreal component of Villa Demidoff. Higher values characterised sectors with greater spectral greenness, canopy cover and height, whereas lower values occurred in more open, sparse or structurally discontinuous areas.

Because NDVI values are influenced by both canopy structure and vegetation composition, they were interpreted within vegetation-type and density classes rather than through a single park-wide reference. This supported the comparison of broadleaf, evergreen and mixed stands under different density conditions.

The comparison with ceptometer-derived crown transparency provided a preliminary field check. Agreement was modest and varied among vegetation types, with higher accuracy in broadleaved plots (0.59) than in evergreen (0.44) and mixed plots (0.40). These values support the use of NDVI as a continuous park-scale indicator of canopy vigour, while further field campaigns are needed before defining operational binary classes.

Overall, CLIM4DEM produced complementary information at two monitoring levels: seasonal functional regulation in selected heritage trees and spatial variability of canopy vigour across the park.

Conclusions

Overall, CLIM4DEM applies and adapts the EFFORT framework to the larger and more wooded context of Villa Demidoff, shifting the focus from risk mapping alone to repeated monitoring of canopy vigour and functional condition. Preliminary results confirmed that monitoring heritage trees in Villa Demidoff requires the integration of individual-tree functional measurements and park-scale spatial indicators. Eco-physiological data revealed a seasonal signal, species-specific and variable-dependent rather than reducible to a single stress gradient. Overall, the analysed surviving heritage trees did not show evidence of generalized

functional collapse; instead, they showed different degrees of physiological regulation and persistence, with *Q. ilex* showing a more conservative functional behaviour, consistent with its evergreen sclerophyllous habit, and deciduous oaks displaying more variable post-summer responses. Photosystem II efficiency and stomatal conductance were the most informative variables for interpreting short-term functional responses, while crown-level NDVI and vapour pressure deficit provided essential canopy-level and atmospheric context.

At park scale, the transformed NDVI index offered a continuous representation of canopy vigour, highlighting the spatial heterogeneity of the arboreal component. Its interpretation, depending on vegetation type and stand density, confirms the need for zonation before comparing values across forested sectors. Crown transparency measured with the ceptometer provided useful field support, especially in broadleaved stands, but the first-year comparison was not sufficient to define a definitive binary classification of tree-health risk. Further field campaigns (in spring/summer/autumn 2026) are planned to better interpret the relationship among canopy-vigour stress, crown transparency and NDVI values, and to improve calibration. The results support the potential of smart arboreal monitoring in historic gardens, particularly where individual heritage-tree assessments need to be integrated with whole-park spatial indicators. Finally, the approach implemented in this study establishes a first operational baseline for future calibration, adaptive management and valorisation of the surviving heritage trees of Villa Demidoff and, once refined, may be replicated in other historic gardens.

Acknowledgements

This work was co-funded and supported by Regione Toscana through the Regional Programme FSE+ 2021–2027, 2024 Research Call, within the framework of the CLIM4DEM project (Un monitoraggio smart per mitigare gli effetti del cambiamento climatico nel Parco di Villa Demidoff; CUP: B83C24002330006), and by the Città Metropolitana di Firenze administration. The authors thank the technicians of Città Metropolitana di Firenze for their support during field activities, and Professor Paolo Grossoni for his valuable contribution to the historical knowledge of the arboreal heritage of Villa Demidoff.

References

Bussotti, F., Pollastrini, M., Salvati, L., Terzi, M., Borghi, M., et al. (2012). Early diagnosis of tree decline: A review of chlorophyll fluorescence and leaf spectral reflectance approaches. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 5, 26–37.

Bussotti, F., Pollastrini, M., Holland, V., & Brüggemann, W. (2015). Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change. *Environmental and Experimental Botany*, 111, 91–113.

Bussotti, F., & Pollastrini, M. (2021). Revisiting the concept of stress in forest trees at the time of global change and issues for stress monitoring. *Plant Stress*, 2, 100024.

Bussotti, F., Papitto, G., Di Martino, D., Cocciufa, C., Cindolo, C., Cenni, E., Bettini, D., Iacopetti, G., & Pollastrini, M. (2021). Defoliation, recovery and increasing mortality in Italian forests: Levels, patterns and possible consequences for forest multifunctionality. *Forests*, 12, 1476.

Bussotti, F., Bettini, D., Carrari, E., Selvi, F., & Pollastrini, M. (2023). Cambiamenti climatici in atto: Osservazioni sugli impatti degli eventi siccitosi sulle foreste toscane. *Forest@*, 20, 1–9.

Carrari, E., Aglietti, C., Bellandi, A., Dibari, C., Ferrini, F., Fineschi, S., et al. (2022). The management of plants and their impact on monuments in historic gardens: Current threats and solutions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 76, 127727.

Carrari, E., Bellandi, A., Costafreda-Aumedes, S., Dibari, C., Ferrini, F., Fineschi, S., Giuntoli, A., Manganelli Del Fa, R., Moriondo, M., Mozzo, M., Padovan, G., Riminesi, C., & Bindi, M. (2024). A novel framework of smart monitoring to face the challenges of tree management in historic gardens. *Environmental Research*, 241, 119790.

Castellaneta, M., Pollastrini, M., Puletti, N., Bussotti, F., Vanguelova, E., et al. (2024). Extreme climatic events, biotic interactions and species-specific responses driving recent crown defoliation in European forests. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 17, 1–12.

Dibari, C. & Bussotti, F. (2002). La valutazione visiva della qualità degli alberi nei Giardini Storici. In *Metodologie di studio per i Giardini Storici*, 14–16 maggio 1999, San Quirico d'Orcia (SI). *Archivio dell'Arte dei Giardini*.

Fineschi, S., & Loreto, F. (2020). A survey of multiple interactions between plants and the urban environment. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 30.

Flexas, J., Barbour, M. M., Brendel, O., Cabrera, H. M., Carriqui, M., Diaz-Espejo, A., Douthe, C., et al. (2014). Diffusional conductances to CO₂ as a target for increasing photosynthesis and photosynthetic water-use efficiency. *Photosynthesis Research*, 117, 45–59.

Gellini, R., & Grossoni, P. (1985). Alberi e arbusti dei giardini di Toscana. *Edizioni Regione Toscana*, Firenze.

Goult, S. M. (2003). *Heritage Gardens: Care, Conservation, Management*. Routledge, London.

Grossoni, P. (1983). Gli alberi monumentali del Parco Mediceo di Pratolino. *Provincia di Firenze*, Firenze.

ICOMOS. (1982). Historic Gardens (The Florence Charter 1981). *International Council on Monuments and Sites*. Lauscha, A., Erasmi, S., King, D. J., Magdon, P., & Heurich, M. (2017). Understanding forest health with remote sensing. Part I: A review of spectral traits, processes and remote-sensing characteristics. *Remote Sensing*, 9, 965.

Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calfapietra, C. (2016). The urban forest and ecosystem services: Impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale. *Journal of Environmental Quality*, 45, 119–124.

Niinemets, Ü. (2015). Is there a species spectrum within the world-wide leaf economics spectrum? Major variations in leaf functional traits in the Mediterranean sclerophyll *Quercus ilex*. *New Phytologist*, 205, 79–96.

- Sá Carneiro, A. R., da Silva, J. M., Veras, L. M. de S., & Silva, A. de F. (2012). The complexity of historic garden life conservation. In S. M. Zancheti & K. Similä (Eds.), *Measuring Heritage Conservation Performance* (pp. 33–41). *CECI/ICCROM*, Rome.
- Swoczyna, T., Kalaji, H. M., Pietkiewicz, S., Borucki, W., & Zatorska, B. (2022). Can chlorophyll a fluorescence and spectral indices be used to diagnose drought stress in urban trees? *Urban Forestry & Urban Greening*, 68, 127448.

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF METEOROLOGICAL TRENDS ON SOFT WHEAT FLOWERING DATE

VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DELL'ANDAMENTO METEOROLOGICO SULL'EPOCA DI FIORITURA DEL FRUMENTO TENERO

Leonardo Verdi¹, Lorenzo Arcidiaco², Anna Dalla Marta¹, Simone Orlandini¹, Francesca Nardi³, Patrizia Vaccino³, Marco Mancini¹

¹ Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry (DAGRI), University of Florence. Piazzale delle Cascine 18, 50144 - Florence, Italy

² Institute of Bioeconomy, National Research Council (IBE-CNR). Via Madonna del Piano 10, 50019 - Sesto Fiorentino, Italy

³ Council for Agricultural Research and Economics (CREA) - Research Centre for Cereal and Industrial Crops, s.s.11 to Torino, Km 2,5, 13100, Vercelli (VC), Italy

* leonardo.verdi@unifi.it

Abstract

Meteorological trends represent a crucial factor influencing the wheat growth cycle and are often decisive in determining the success or failure of the crop. In the present study, we assessed the effects of temperature and precipitation trends during the early growth stages on wheat flowering dates across four distinct macro-regions in Italy (North-East, North-West, Center, and South) over a 25-year period (2000–2025). Our findings highlight that both the individual and synergistic effects of these climatic factors significantly influence wheat phenology. Specifically, precipitation scarcity was found to delay flowering by approximately 7 days, while the occurrence of frost events also resulted in significant phenological delays. Conversely, rising average temperatures advanced the flowering date, with the most pronounced effects observed in Central and Southern Italy. This advancement was further corroborated by growing degree days (gdd) analysis, which showed a positive correlation with earlier anthesis. Overall, a widespread advancing trend in flowering dates across all regions underscores the tangible impact of climate change on wheat phenology. These results highlight critical shifts in crop development, emphasizing the urgent need for robust adaptation strategies to safeguard agricultural productivity and ensure food security in a changing climate scenario.

Parole chiave

Temperatura; Precipitazioni; Fenologia; Cambiamento Climatico

Keywords

Temperature; Precipitations; Phenology; Climate Change

Introduzione

Il frumento (*Triticum aestivum* L.) è una delle colture più diffuse a livello globale e la sua adattabilità ai diversi areali agricoli dipende in modo critico dalla capacità di sincronizzare l'epoca di fioritura (antesi) con le condizioni ambientali favorevoli (He et al., 2024). La temperatura è riconosciuta come il principale motore dello sviluppo fenologico, agendo come regolatore del ritmo di crescita della pianta (Wang et al., 2015; Węgrzyn et al., 2022). In linea generale, il riscaldamento globale sta portando a un significativo anticipo dell'epoca di antesi in molte regioni temperate. Studi recenti indicano come l'aumento di 1°C della temperatura media possa determinare un'anticipazione delle fasi fenologiche di circa 2,5 giorni (Rezaei et al., 2018; Skowera et al., 2024). Tuttavia, temperature eccessivamente elevate durante i mesi invernali possono ritardare o impedire il soddisfacimento del fabbisogno di vernalizzazione, portando paradossalmente a un ritardo nello sviluppo del frumento (Wang et al., 2015). Parallelamente, le precipitazioni esercitano un'influenza significativa sulla durata delle fasi fenologiche, sebbene in modo meno diretto rispetto alla temperatura (Skowera et al., 2024). È stato osservato che un'elevata frequenza di eventi piovosi e abbondanti

cumulati idrici tendono a prolungare la durata dello sviluppo vegetativo, spostando la fioritura verso epoche più tardive (Skowera et al., 2024). Al contrario, condizioni di stress idrico o siccità possono indurre la pianta ad accelerare il passaggio all'antesi come meccanismo adattivo per completare il ciclo vitale prima dell'esaurimento delle risorse idriche (Flohr et al., 2017; Chen et al., 2020).

L'obiettivo di questo studio è stato quello di valutare l'influenza dell'andamento meteorologico (temperature e precipitazioni), attraverso l'uso di indici agroclimatici, sull'epoca di fioritura del frumento tenero su scala nazionale.

Materiali e Metodi

L'area di studio ha coinvolto 4 siti (Nord-Est, Nord-Ovest, Centro e Sud) rappresentativi del contesto nazionale italiano (Fig. 1) su un periodo di 25 anni (2000 - 2025). I siti di prova rientrano all'interno della Rete Nazionale delle Prove Varietal del frumento tenero (Vitale et al., 2024) coordinata dal Centro di Ricerca Cerealicoltura e Colture Industriali (CREA), Vercelli. La gestione agronomica dei campi sperimentali ha seguito modelli simili in tutte le 4 località. La data di antesi è stata rilevata

utilizzando come riferimento la presenza delle antere visibili su almeno il 50% dell’apezzamento.

I dati climatici di temperatura dell’aria e di precipitazione sono stati ottenuti dal dataset Era5-Land (ECMWF/Copernicus) con risoluzioni 9km X 9km. Gli indici agroclimatici sono stati calcolati a partire dalla data del 1 gennaio di ogni anno fino alla data di antesi. Gli indici utilizzati sono stati:

- “frost days” – numero di giorni con temperature minime inferiori o uguali a 0°C
- “dry days” - numero di giorni siccitosi con precipitazioni inferiori a 2 mm
- “Tm” - temperature medie giornaliere
- “gdd” - somme termiche con temperature medie giornaliere superiori a 4°C



Fig. 1 - Posizione delle 4 macro-aree coinvolte nello studio

Fig. 1 - Locations of the 4 macro-regions involved within the study

Le relazioni tra indici agroclimatici e l'epoca di antesi del frumento sono state investigate tramite analisi di regressione lineare semplice. Per ogni serie storica (2000-2025), è stata calcolata l'equazione della retta di regressione per determinare il tasso di variazione annuo. La significatività statistica dei trend è stata valutata mediante il test F di Fisher, fissando un livello di probabilità critica inferiore a 0,05 e 0,01. La quota di variabilità spiegata dal modello è stata espressa tramite il coefficiente di determinazione (R^2).

Risultati e Discussione

L’effetto dei *dry days* ha avuto un ruolo significativo sul raggiungimento della data di antesi su tutti i siti. In generale, l’aumento dei valori di questo indice è risultato associato a un ritardo della data di antesi fino a 7 giorni rispetto alla media. La diminuzione dei *dry days* ha invece determinato un’anticipazione della data di antesi fino a 11

giorni. Insufficienti precipitazioni nel periodo immediatamente successivo alla semina possono portare ad un ritardo nell’emergenza che determina un effetto a catena sul ciclo biologico che risulta complessivamente ritardato (Wang et al., 2015; Flohr et al., 2017). In generale, condizioni di siccità determinano un accorciamento delle fasi fenologiche. Tuttavia, in specifiche condizioni, il ritardo dell’inizio del ciclo della coltura dovuto a condizioni sfavorevoli dopo la semina, possono mascherare questa accelerazione fisiologica.

I *frost days* hanno mostrato un impatto evidente sulla data di fioritura determinando un ritardo nel raggiungimento di questa fase fenologica in tutte le località (Tab. 1). Considerando che l'intervallo termico ottimale per il soddisfacimento del fabbisogno di vernalizzazione è tipicamente compreso tra 2 e 10 °C (Ogihara et al., 2016), l'occorrenza di giornate con temperature pari o inferiori allo zero termico può determinare un ritardo dell'antesi quantificabile in diversi giorni. Tale dinamica trova riscontro in letteratura per cui alcuni studi evidenziano come il processo possa completarsi, seppur con un'efficienza ridotta, in un range più ampio, compreso tra -1,3 e 15,7 °C (Kamran et al., 2014) o, secondo specifici modelli fenologici, tra -4 e 17 °C (Langer et al., 2014; Rezaei et al., 2018).

Tab.1 – Parametri della regressione lineare per la data di fioritura nelle quattro macro-regioni (2000-2025). I livelli di significatività $P < 0,05$, $P < 0,01$ e $P < 0,001$ sono indicati rispettivamente con *, ** e *** mentre NS indica risultati non significativi.

Tab. 1- Linear regression parameters for flowering date across four macro-regions (2000–2025). Significance levels $P < 0,05$, $P < 0,01$ and $P < 0,001$ are denoted by *, ** and *** respectively while NS indicates non-significant results.

Località	Variabile	m	R ²	P
Cigliano	Dry days	0,0184	0,0024	NS
	Frost days	0,1650	0,2567	*
	Tm	-2,0016	0,1445	NS
	gdd	0,0048	0,0043	NS
Basiliano	Dry days	0,2738	0,3850	**
	Frost days	0,2639	0,4726	***
	Tm	-3,7982	0,3107	**
	gdd	-0,0190	0,0400	NS
Cesa	Dry days	0,2581	0,3183	**
	Frost days	0,3076	0,4877	***
	Tm	-4,0640	0,2736	**
	gdd	-0,0068	0,0046	NS
Foggia	Dry days	0,3400	0,2001	**
	Frost days	0,5218	0,4101	*
	Tm	-4,8547	0,4059	***
	gdd	-0,0180	0,0453	NS
Totale	Dry days	0,2206	0,1295	***
	Frost day	0,2662	0,5285	***
	Tm	-3,6312	0,5439	***
	gdd	-0,0355	0,3137	***

L'andamento delle *Tm* ha mostrato un chiaro effetto sulla data di antesi, che risulta anticipata all'aumentare della temperatura. In particolare si osserva un'anticipazione della data di antesi fino a 23 giorni in corrispondenza di un aumento di 3,5°C rispetto alla media delle temperature del periodo in esame. Diversamente, stagioni caratterizzate da temperature medie inferiori (-2,5°C rispetto alla media del periodo) hanno mostrato un ritardo nel raggiungimento della data di antesi fino a 13 giorni. Queste osservazioni concordano con studi recenti che riportano per ogni grado Celsius di aumento della temperatura media un'anticipazione della data di fioritura di diversi giorni (Wiik et al., 2009). Ad esempio, studi in Polonia indicano che un aumento di 1°C accorcia il periodo dalla levata alla spigatura di circa 2,5-2,8 giorni (Skowera et al., 2024). Analogamente, l'analisi dei *gdd* ha evidenziato una correlazione con la data di antesi che risulta anticipata all'aumentare dei valori di questo indice agroclimatico. Tuttavia, un effetto significativo dei *gdd* è stato osservato solo sull'intero dataset mentre non sono state osservate variazioni significative nelle singole località (Tab. 1).

Conclusioni

L'andamento meteorologico gioca un ruolo cruciale sullo sviluppo del frumento tenero e in particolare sul raggiungimento della fase di antesi. Sebbene temperature e precipitazioni rappresentino i principali driver fenologici, sia singolarmente che in sinergia, le nostre osservazioni confermano la predominanza del fattore termico. L'incidenza di stagioni caratterizzate da medie termiche elevate o al contrario, l'insistenza di numerosi eventi con basse temperature possono anticipare o ritardare in modo significativo la data di antesi nel frumento. Queste evidenze offrono spunti fondamentali per la comprensione delle interazioni tra variabili meteorologiche e sviluppo colturale, fornendo basi conoscitive per l'elaborazione di strategie di adattamento ai cambiamenti climatici volte a salvaguardare la produttività agricola del frumento.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il Dott. Andrea Pilati (Capac Piemonte), il Dott. Maurizio Martinuzzi (ERSA Friuli), il Dott. Luigi Fabbrini (Ente Terre Regionali Toscane, Tenuta di Cesa) e il Dott. Antonio Troccoli (CREA-CI Foggia) per il supporto nella fase di raccolta dei dati fenologici del frumento.

Bibliografia

Chen, C., Fletcher, A. L., Ota, N., Flohr, B. M., Lilley, J. M., & Lawes, R. A. (2020). Spatial patterns of estimated optimal flowering period of wheat across the southwest of Western Australia. *Field Crops Research*, 247, 107710.

Flohr, B. M., Hunt, J. R., Kirkegaard, J. A., & Evans, J. R. (2017). Water and temperature stress define the optimal flowering period for wheat in south-eastern Australia. *Field Crops Research*, 209, 108-119.

He, Y., Xiong, W., Hu, P., Huang, D., Feurtado, J. A., Zhang, T., Hao, C., DePauw, R., Zheng, B., Hoogenboom, G., Dixon, L. E., Wang, H., & Challinor, A. J. (2024). Climate change enhances stability of wheat-flowering-date. *Science of The Total Environment*, 917, 170305.

Kamran, A., Iqbal, M., & Spaner, D. (2014). Flowering time in wheat (*Triticum aestivum* L.): a key factor for global adaptability. *Euphytica*, 197(1), 1-26.

Langer, S. M., Longin, C. F. H., & Würschum, T. (2014). Flowering time control in European winter wheat. *Frontiers in plant science*, 5, 537.

Ogihara, Y., Takumi, S., & Handa, H. (2016). Advances in wheat genetics: From genome to field: Proceedings of the 12th international wheat genetics symposium. Springer Nature.

Rezaei, E. E., Siebert, S., Hüging, H., & Ewert, F. (2018). Climate change effect on wheat phenology depends on cultivar change. *Scientific reports*, 8(1), 4891.

Skowera, B., Kulig, B., Ziernicka-Wojtaszek, A., Grygierzec, W., Ziolkowska, E., & Lepiarczyk, A. (2024). The effect of meteorological conditions on the course of development stages and yield of winter wheat in southern Poland. *Journal of Water and Land Development*, (60), 157-166.

Vitale, P., Crossa, J., Vaccino, P., & De Vita, P. (2024). Defining the target population of environments for wheat (*Triticum aestivum* L.) breeding in Italy based on historical data. *Plant Breeding*, 143(4), 518-533.

Wang, B., Li Liu, D., Asseng, S., Macadam, I., & Yu, Q. (2015). Impact of climate change on wheat flowering time in eastern Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 209, 11-21.

Węgrzyn, A., Klimek-Kopyra, A., Dacewicz, E., Skowera, B., Grygierzec, W., Kulig, B., & Flis-Olszewska, E. (2022). Effect of selected meteorological factors on the growth rate and seed yield of winter wheat—A case study. *Agronomy*, 12(12), 2924.

Wiik, L., & Ewaldz, T. (2009). Impact of temperature and precipitation on yield and plant diseases of winter wheat in southern Sweden 1983–2007. *Crop protection*, 28(11), 952-962.

TESTING THE REPLICABILITY OF THE BEEADAPT FRAMEWORK FOR ASSESSING CLIMATE-CHANGE RISK TO BUTTERFLIES

TEST DELLA REPLICABILITÀ DEL FRAMEWORK BEEADAPT PER VALUTARE IL RISCHIO CLIMATICO PER LE FARFALLE

Marina Baldi^{1*}, Dino Biancolini¹

¹ National Research Council of Italy, Institute of BioEconomy, CNR-IBE

* marina.baldi@cnr.it

Abstract

LIFE BEEadapt supports climate-change adaptation by increasing ecosystem resilience for wild pollinators and promoting evidence-based conservation planning. We tested the replicability of the BEEadapt framework for assessing climate-change risk to butterflies across six additional Mediterranean sites. We compiled species records from online biodiversity databases and calibrated bias-corrected bioclimatic species distribution models (SDMs) within the ecoregions occupied by each species. We projected SDMs to 2050 under two contrasting climate scenarios and stacked binarised outputs to estimate changes in potential butterfly richness. Results matched previous BEEadapt findings. Under the lower-emission scenario, richness responses were mixed, with stable or positive patterns in several lowland and hilly contexts. Under high emissions, losses became stronger in climatically or geographically constrained settings, especially in montane, island and riverine landscapes.

Parole chiave

Farfalle; cambiamento climatico; modelli di distribuzione; rischio climatico; LIFE BEEadapt

Keywords

Butterflies; climate change; species distribution models; climate risk; LIFE BEEadapt

Introduction

Climate change is reshaping species distributions, community composition and the functioning of ecosystems that depend on pollination (Hill et al., 2021). Butterflies provide useful indicators of these changes because they are short-lived ectotherms whose occurrence, phenology and population dynamics respond strongly to temperature and precipitation. In Mediterranean landscapes, rising temperatures and altered seasonal rainfall can intensify climatic constraints on butterfly grouping, especially in islands and mountain environments, where dispersal opportunities, climatic refugia and compensatory range shifts may be limited (Hill et al., 2021).

Species distribution models (SDMs) provide a spatially explicit framework for estimating how climatic conditions associated with species occurrences may shift under future scenarios (Guisan et al., 2017). Within LIFE BEEadapt, this approach has been used to support climate-adaptation planning for pollinators in four different areas in Central Italy, while here we test the replicability of the BEEadapt modelling framework across six additional sites, focusing on changes in potential butterfly richness.

Materials and Methods

We focused on six LIFE BEEadapt replication sites as study areas: the Island of Gozo (GOZ), Jesi (JES), the Alto Molise MAB Reserve (MAB), Pollino National Park (POL), the Tronto River mouth (SBT) and the Lombard Ticino Valley Natural Park (TIC) (Fig. 1, Tab. 1). These sites cover island, agricultural, coastal, riverine and mountain settings across different ecoregions.



Fig. 1 - Location of the LIFE BEEadapt replication sites within Italian ecoregions (<https://ecoregions.appspot.com/>).

Fig. 1 - Ubicazione dei siti di replicazione del Progetto LIFE BEEadapt all'interno delle ecoregioni (<https://ecoregions.appspot.com/>).

We obtained species records from the Global Biodiversity Information Facility (GBIF, <https://www.gbif.org/>) and removed spatial errors,

duplicates and repeated records within the same 1 x 1 km climatic cell (Zizka et al., 2019). We built species distribution models (SDMs) only for species with at least 20 unique records (Guisan et al., 2017), using the Maxnet algorithm implemented in Biomod2 (Phillips et al., 2017; Thuiller et al., 2023). The number of modelled species ranged from 28 in GOZ to 109 in POL, with intermediate-sized databases for MAB, TIC, JES and SBT (Tab. 1). To reduce sampling bias, we selected background points using a target-group approach (Barber et al., 2022). We defined calibration areas within the ecoregions occupied by each species (Fig. 1), reducing niche truncation and improving transferability under future scenarios (Chevalier et al., 2021).

Tab. 1 – Replication sites with ecological contexts and the number of butterfly species

Tab. 1 – Siti di replicazione con indicati i contesti ecologici ed il numero di specie di farfalle

Replication site	Context	N
Island of Gozo (GZ)	Mediterranean island system	28
City of Jesi (JS)	Agricultural and hilly urban context	50
Alto Molise Reserve (MAB)	Mountain forest and semi-open landscapes	40
Pollino National Park (POL)	Mediterranean mountain protected area	109
Tronto River mouth (SBT)	Coastal and retro-coastal plain with residual wetlands	97
Ticino Valley Natural Park (TIC)	Riverine protected area in the western Po Plain	44

To build SDMs, we used WorldClim 2.1 bioclimatic variables at approximately 1 km resolution (Fick and Hijmans, 2017), focusing on temperature seasonality, maximum temperature of the warmest month, precipitation of the driest month and precipitation seasonality, which summarize climatic constraints relevant to butterflies. We projected models to 2041-2060 under SSP1-2.6 and SSP5-8.5 (O'Neill et al., 2017). We converted continuous projections into binary suitable-unsuitable outputs using the maximum sensitivity plus specificity threshold (Guisan et al., 2017). We then stacked binarised maps across species to estimate current and future potential richness, and calculated future-minus-present rasters to map per-cell richness change (Guisan et al., 2017).

Results and Discussion

Under SSP1-2.6, butterfly richness responses were not uniform across sites (Fig. 2). JES and SBT showed several cells with stable or increasing potential richness, consistent

with the greater role of lowland, hilly or thermophilic assemblages.

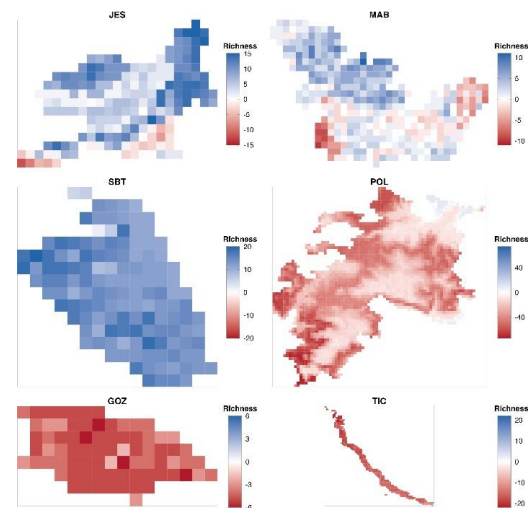


Fig. 2 - Spatial change in butterfly potential richness under SSP1-2.6. Values represent future-minus-present richness obtained by stacking SDMs.

Fig. 2 - Variazione spaziale della potenziale ricchezza di farfalle per lo scenario SSP1-2.6. I valori rappresentano la ricchezza futura meno quella presente, ottenuta combinando i modelli di distribuzione delle specie.

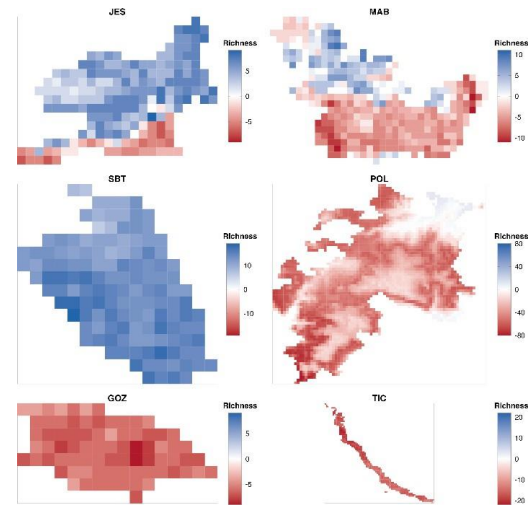


Fig. 3 - Spatial change in butterfly potential richness under SSP5-8.5. Values represent future-minus-present richness obtained by stacking SDMs.

Fig. 3 - Variazione spaziale della potenziale ricchezza di farfalle per lo scenario SSP5-8.5. I valori rappresentano la ricchezza futura meno quella presente, ottenuta combinando i modelli di distribuzione delle specie.

In contrast, GZ, TIC and parts of POL showed clear negative signals, indicating stronger exposure where insularity or mountain topography may limit compensatory redistribution. Under SSP5-8.5, losses became more pronounced in the most constrained contexts (Fig. 3). POL showed broad negative richness change, GZ remained almost entirely negative, and TIC showed a marked decline along the riverine system.

MAB shifted from a mixed response toward stronger local losses, whereas JS and SBT retained more positive or mixed patterns. Gains should not be interpreted as guaranteed conservation benefits, because they may reflect community turnover, increased climatic compatibility for generalist or thermophilic species, and novel assemblage configurations.

The distribution of per-cell richness change confirms these spatial patterns (Fig. 4). POL had the widest spread and the strongest negative median, especially under SSP5-8.5, while GZ and TIC showed consistent losses. SBT showed positive richness change in both scenarios, and JS showed a mixed but generally less negative response.

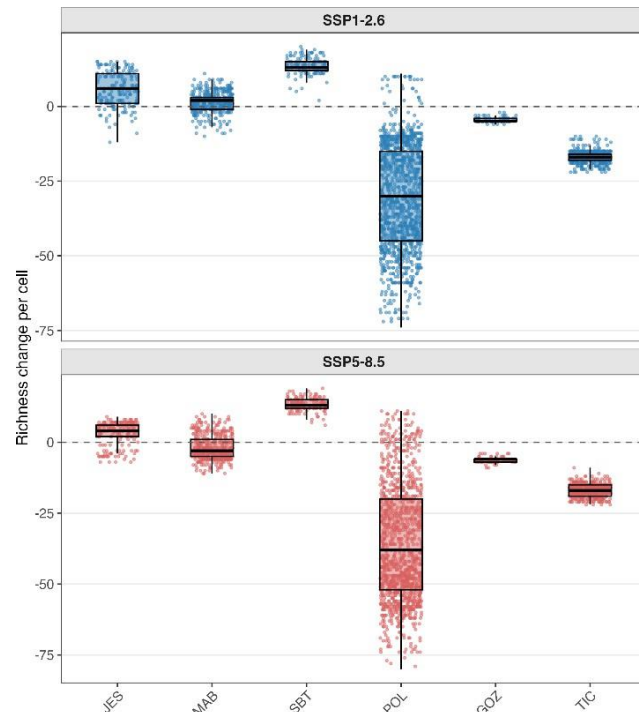


Fig. 4 - Per-cell butterfly richness change across replication sites under SSP1-2.6 and SSP5-8.5. Points are raster cells and boxes summarise future-minus-present richness values.

Fig. 4 - Variazione della ricchezza di farfalle per cella nei siti di replicazione in base a SSP1-2.6 e SSP5-8.5. I punti rappresentano le celle raster e i riquadri riassumono i valori di ricchezza futuri meno quelli attuali.

Conclusions

Testing the LIFE BEEadapt framework across six additional sites confirms its replicability for identifying spatially explicit climate-change risks to butterflies. The

results are broadly consistent with previous LIFE BEEadapt study sites, showing stronger vulnerability in climatically or geographically constrained contexts such as POL, GOZ and TIC, and more stable or positive richness patterns in JES, MAB and SBT. SDMs can inform proactive conservation, helping to identify where adaptation measures and habitat management need to be prioritised to ensure butterfly persistence.

Acknowledgments

This work was supported by LIFE21-CCA-IT-LIFE BEEadapt/101074591, LIFE BEEadapt: A pact for pollinator adaptation to climate change (<https://www.lifebeeadapt.eu/en/>).

References

- Barber, R. A., Ball, S. G., Morris, R. K. A., & Gilbert, F. 2022. Target-group backgrounds prove effective at correcting sampling bias in Maxent models. *Diversity and Distributions*, 28(1), 128–141.
- Chevalier, M., Broennimann, O., Cornuault, J., & Guisan, A. 2021. Data integration methods to account for spatial niche truncation effects in regional projections of species distribution. *Ecological Applications*, 31(7), e02427.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315.
- Guisan, A., Thuiller, W., & Zimmermann, N. E. 2017. *Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R*. Cambridge University Press, Cambridge, 478 pp.
- Hill, G. M., Kawahara, A. Y., Daniels, J. C., Bateman, C. C., & Scheffers, B. R. 2021. Climate change effects on animal ecology: butterflies and moths as a case study. *Biological Reviews*, 96(5), 2113–2126.
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., & van Vuuren, D. P. 2017. The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169–180.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudik, M., Schapire, R. E., & Blair, M. E. 2017. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887–893.
- Thuiller, W., Georges, D., Gueguen, M., Engler, R., Breiner, F., Lafourcade, B., & Patin, R. 2023. biomod2: Ensemble Platform for Species Distribution Modeling. R package version 4.2-4. The Comprehensive R Archive Network.
- Zizka, A., Silvestro, D., Andermann, T., Azevedo, J., Duarte Ritter, C., Edler, D., Farooq, H., Herdean, A., Ariza, M., Scharn, R., Svantesson, S., Wengström, N., Zizka, V., & Antonelli, A. 2019. CoordinateCleaner: standardized cleaning of occurrence records from biological collection databases. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(5), 744–751.

GOVERNANCE OF EMERGENCIES IN THE AGRICULTURAL, FORESTRY AND LIVESTOCK DOMAIN: TOWARDS OPERATIONAL PROTOCOLS AND INTEGRATION BETWEEN FARMS, KNOWLEDGE AND PROFESSIONS

GOVERNANCE DELLE EMERGENZE NEL DOMINIO AGRARIO, FORESTALE E ZOOTECNICO: VERSO PROTOCOLLI OPERATIVI E INTEGRAZIONE TRA AZIENDE, CONOSCENZA E PROFESSIONI

Stefano Cesco^{1*}, Lucia Bailoni², Pietro Buzzini³, Monica Cairolì⁴, Giuseppe Corti⁵, Marco Marchetti⁶, Giacomo Scarascia Mugnozza⁷, Simone Orlandini⁸, Fabrizio Mazzetto^{1,9*}

¹ Faculty of Agricultural, Environmental and Food Sciences, Free University of Bozen-Bolzano, Bolzano, Italy

² Department of Comparative Biomedicine and Food Science, University of Padua, Padua, Italy

³ Department of Agricultural, Food and Environmental Sciences, University of Perugia, Perugia, Italy

⁴ Climate and Environment Department, National Council of Agronomists and Forestry Doctors, Rome, Italy

⁵ Department of Agricultural, Food and Environmental Sciences, Marche Polytechnic University, Ancona, Italy

⁶ Department of Architecture and Design, Sapienza University of Rome, Rome, Italy

⁷ Polytechnic University of Bari, Bari, Italy

⁸ Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry, University of Florence, Florence, Italy

⁹ Competence Center for Mountain Innovation Ecosystems, Free University of Bozen-Bolzano, Bolzano, Italy

stefano.cesco@unibz.it, simone.orlandini@unifi.it, fabrizio.mazzetto@unibz.it

Abstract

Extreme hydro-meteorological events are increasingly affecting agricultural, forestry and livestock systems, generating impacts on production continuity, accessibility and territorial resilience. Despite the growing availability of meteorological and hydrological warning systems, the early post-event phase within the agricultural, forestry and animal production (AFA) domain still lacks structured operational activation frameworks. This contribution discusses the need for integrated governance approaches capable of linking agrometeorological information, emergency activation and territorial coordination. Building on a preliminary warning-to-action framework developed for biologically constrained livestock systems exposed to flooding, the work explores how hazard severity escalation, operational thresholds, ecosystem prerequisites and interoperability among technical and institutional actors may support anticipatory response capacity. Particular attention is devoted to the role of agrometeorology as a support for coordinated emergency activation and continuity management within rural and mountain territories.

Parole chiave

Agrometeorologia; gestione emergenze; governance territoriale; warning-to-action; resilienza

Keywords

Agrometeorology; emergency management; territorial governance; warning-to-action; resilience

Introduzione

Gli eventi estremi associati al cambiamento climatico stanno producendo impatti crescenti sui sistemi agrari, forestali e zootecnici (AFA), con effetti che coinvolgono non soltanto le produzioni ma anche la funzionalità territoriale, l'accessibilità, la continuità operativa e la resilienza dei contesti rurali e montani (IPCC, 2023; FAO, 2021). Negli ultimi anni, eventi *flood-related*, precipitazioni estreme e dissesti idrogeologici hanno evidenziato la particolare vulnerabilità del dominio AFA rispetto alla gestione delle emergenze nella fase immediatamente successiva all'evento. Le evidenze disponibili mostrano come, nel dominio AFA, la gestione attuale delle emergenze sia ancora caratterizzata da una significativa frammentazione delle competenze, da limitata interoperabilità tra attori territoriali e dalla sostanziale assenza di *framework warning-to-action* specificamente orientati ai sistemi biologicamente vincolati (Cesco et al., 2024; Kuller et al., 2021). Tale criticità risulta particolarmente evidente nei sistemi zootecnici intensivi, dove continuità alimentare, approvvigionamento idrico,

mungitura e gestione sanitaria devono essere mantenuti anche in condizioni emergenziali. In questi contesti, la perdita di una singola funzione critica può rapidamente compromettere la continuità dell'intero sistema produttivo, generando effetti sistemici e *cascading impacts* difficilmente reversibili (Gaviglio et al., 2021).

Una situazione analoga emerge anche nel settore delle produzioni vegetali, dove *flooding*, erosione e perdita di fertilità possono compromettere rapidamente la capacità produttiva, così come nel settore forestale, dove eventi estremi come la tempesta Vaia hanno mostrato la presenza di effetti sistemici protratti nel tempo. In tutti questi casi, il problema appare non soltanto operativo, ma anche metodologico, poiché la fase *early post-event* risulta frequentemente priva di protocolli strutturati, *framework* decisionali e sistemi interoperabili di attivazione. In questo senso, il rafforzamento dell'integrazione tra *preparedness*, coordinamento multi-attore e sistemi di attivazione anticipatoria rappresenta oggi uno degli elementi centrali dei

moderni approcci alla *disaster risk reduction* e alla *resilience governance* (UNDRR, 2015).
 Parallelamente, i sistemi di allertamento meteorologico e idrologico risultano oggi prevalentemente orientati alla protezione civile generale, mentre appare ancora limitata la loro traduzione in strumenti operativi direttamente applicabili ai contesti produttivi del dominio AFA (Perez et al., 2016; Mitheu et al., 2023). In questo contesto emerge quindi la necessità di sviluppare modelli integrati capaci di collegare informazione agrometeorologica, interpretazione operativa del rischio, attivazione progressiva delle misure emergenziali e coordinamento territoriale.

Materiali e Metodi

Il lavoro propone un *framework* preliminare *warning-to-action* sviluppato a partire da un *Dairy Flood Scenario* (DFS), utilizzato come caso studio operativo ad alta complessità per l’analisi delle dinamiche di *emergency activation* nel dominio AFA. Il DFS rappresenta un sistema zootecnico intensivo esposto a *flooding* progressivo, caratterizzato da deterioramento crescente di accessibilità, funzionalità infrastrutturale, continuità biologica e capacità logistica. Questo caso studio è stato selezionato in quanto i sistemi zootecnici intensivi rappresentano uno dei contesti maggiormente biologicamente vincolati del dominio AFA, nei quali la continuità delle funzioni operative essenziali deve essere mantenuta anche in condizioni emergenziali e all’interno di finestre temporali estremamente limitate. All’interno del *framework* proposto, la severità dell’evento viene interpretata secondo una logica *impact-based* e non esclusivamente idrologica. La progressione dell’emergenza è quindi associata a differenti livelli di attivazione operativa, coordinamento territoriale e mobilitazione logistica, in funzione della riduzione progressiva della continuità operativa del sistema. In questa prospettiva, la severità dipende non soltanto dall’intensità dell’hazard ma anche dalla capacità del sistema di mantenere le proprie funzioni critiche in condizioni emergenziali. La struttura progressiva dei livelli di severità è finalizzata a supportare il passaggio da condizioni orientate prevalentemente al monitoraggio a forme di attivazione coordinata e supporto emergenziale esterno, evidenziando la progressiva riduzione dei margini decisionali e operativi disponibili.
 Il *framework warning-to-action* integra livelli progressivi di severità, indicatori agrometeorologici, soglie operative e prerequisiti ecosistemici all’interno di una struttura di attivazione progressiva orientata alla continuità dei sistemi biologicamente vincolati. Tra gli indicatori considerati rientrano precipitazioni previste, livelli di allerta idrologica, saturazione del suolo, tempi stimati di propagazione del *flooding* e scenari di perdita di accessibilità. L’integrazione di indicatori meteorologici, idrologici e logistico-operativi consente di interpretare il warning non soltanto come informazione previsionale, ma come possibile trigger per l’attivazione anticipatoria delle misure emergenziali. Particolare attenzione è stata dedicata al concetto di *ecosystem prerequisites*, definiti come l’insieme delle condizioni organizzative, logistiche e territoriali necessarie affinché le procedure emergenziali possano risultare

concretamente attivabili. In questa prospettiva, *preparedness* e interoperabilità vengono interpretate come componenti strutturali della capacità di risposta territoriale e non esclusivamente come misure preventive isolate. Tali prerequisiti includono, ad esempio, la disponibilità di infrastrutture di *backup*, accordi pre-evento, reti professionali territoriali e capacità di coordinamento multi-attore, considerati elementi essenziali per garantire la continuità operativa durante la fase *early post-event*.
 La struttura preliminare dei livelli di severità proposta in Tabella 1 è finalizzata a rappresentare la progressiva transizione da condizioni prevalentemente orientate al monitoraggio e alla *preparedness* verso scenari caratterizzati da crescente attivazione operativa, riduzione dei margini decisionali disponibili e maggiore dipendenza dal coordinamento multi-attore e dal supporto emergenziale esterno. In questa prospettiva, il passaggio tra differenti livelli di severità non riflette esclusivamente l’intensificazione dell’hazard, ma anche il deterioramento progressivo della capacità del sistema di mantenere le proprie funzioni operative essenziali.

Tab.1 - Livelli preliminari di severità operativa nel framework warning-to-action.

Tab.1 - Preliminary operational severity levels within the warning-to-action framework.

Level	Operational condition	Required action
0	Normal conditions	Routine monitoring
1	Early warning	Increased surveillance
2	Moderate hazard	Preventive measures
3	Severe hazard	Emergency activation
4	Critical hazard	Multi-actor coordination
5	System collapse	Full emergency response

La struttura proposta non deve essere interpretata come protocollo operativo definitivo, ma come schema preliminare orientato a supportare processi di warning-to-action e coordinamento progressivo nel dominio AFA.

Discussione

Il framework sviluppato evidenzia come l’efficacia della risposta emergenziale nel dominio AFA dipenda non soltanto dalla disponibilità di sistemi previsionali, ma soprattutto dalla capacità di tradurre tempestivamente il *warning* in attivazione coordinata. In questo contesto, l’agrometeorologia assume un ruolo operativo attivo contribuendo non solo all’identificazione dell’hazard, ma anche alla definizione delle priorità di intervento, del *timing* di attivazione e delle esigenze di coordinamento territoriale. L’approccio proposto contribuisce inoltre a spostare il ruolo dell’informazione agrometeorologica da semplice supporto al monitoraggio verso un possibile *activation trigger* capace di supportare processi di *decision-making* anticipatorio e attivazione operativa progressiva.
 Inoltre, l’approccio *warning-to-action* proposto consente di interpretare l’emergenza come un processo dinamico di *escalation* progressiva nel quale l’aumento della severità determina il passaggio da misure di *preparedness* interna a

forme di coordinamento multi-attore fino a condizioni di supporto emergenziale esterno. Tale struttura appare particolarmente rilevante nei sistemi biologicamente vincolati, dove il tempo operativo disponibile risulta estremamente limitato e dove ritardi decisionali possono compromettere rapidamente la continuità produttiva e il benessere animale (Bissett et al., 2018). In questa prospettiva, il caso dell'allevamento da latte non deve essere interpretato come ambito applicativo esclusivo del *framework*, ma come caso studio ad alta complessità utilizzato per evidenziare criticità operative e logiche di attivazione potenzialmente trasferibili all'intero dominio agrario, forestale e zootecnico.

Il framework mette inoltre in evidenza il ruolo strategico dell'interoperabilità tra aziende agricole, professionisti del settore AFA, veterinari, enti territoriali, servizi tecnici e protezione civile. All'interno di tale ecosistema, i professionisti del dominio agrario, forestale e zootecnico possono rappresentare una componente operativa particolarmente rilevante, in quanto capaci di interpretare il rischio nel contesto reale del funzionamento aziendale, identificare le priorità operative e facilitare i processi di coordinamento durante la fase *early post-event*. In assenza di prerequisiti ecosistemici adeguati, anche sistemi di *warning* avanzati possono infatti risultare insufficienti a garantire una risposta efficace entro finestre temporali biologicamente compatibili. In questo senso, il *framework* evidenzia come il protocollo operativo, da solo, non risulti sufficiente in assenza di un ecosistema territoriale già predisposto comprendente accordi pre-evento, infrastrutture di supporto, reti professionali, disponibilità logistiche e capacità di coordinamento multi-attore. In emergenza, infatti, la rete operativa non viene costruita ex novo, ma deve poter essere rapidamente attivata. In questa prospettiva, il dominio AFA richiede modelli di governance specifici capaci di superare la tradizionale separazione tra protezione civile e protezione delle produzioni.

AGRICULTURAL, FORESTRY AND LIVESTOCK DOMAIN (AFA)

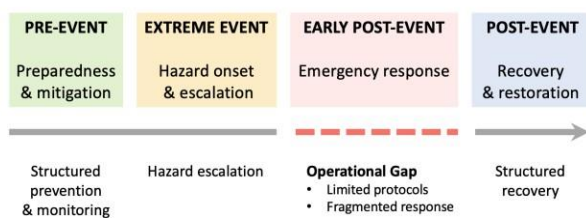


Fig.1 - Rappresentazione concettuale del gap operativo nella fase *early post-event* nel dominio agrario, forestale e zootecnico.

Fig.1 – Conceptual representation of the operational gap during the *early post-event* phase within the agricultural, forestry and livestock domain.

L'approccio proposto contribuisce quindi a estendere il ruolo dell'agrometeorologia da strumento di monitoraggio e previsione a componente attiva dei processi di governance operativa delle emergenze nei territori rurali e montani. Il framework non deve essere interpretato come protocollo

definitivo, ma come struttura metodologica preliminare orientata allo sviluppo di sistemi interoperabili di *emergency activation* nel dominio AFA.

Conclusioni

Il contributo evidenzia la necessità di superare la tradizionale separazione tra protezione civile e protezione delle produzioni, promuovendo modelli integrati di governance capaci di collegare servizi agrometeorologici, *preparedness* territoriale, sistema professionale e gestione operativa delle emergenze.

Il framework *warning-to-action* proposto rappresenta una possibile base metodologica per futuri sviluppi applicativi orientati alla costruzione di protocolli interoperabili nel dominio agrario, forestale e zootecnico, con particolare riferimento alla fase *early post-event*. In questa prospettiva, il rafforzamento dell'integrazione tra sistema produttivo, mondo accademico, professioni e attori territoriali appare una condizione essenziale per migliorare la capacità di risposta e la resilienza dei territori rurali e montani rispetto agli eventi estremi.

Pur rimanendo preliminare e non ancora validato attraverso applicazioni operative o esercitazioni sul campo, l'approccio proposto potrà costituire una base utile per future attività di simulazione, co-progettazione e sviluppo di strumenti decisionali integrati con i servizi agrometeorologici.

Ringraziamenti

Questa ricerca è stata svolta nell'ambito di:

-) le attività di ricerca del PNRR del consorzio iNEST (*Interconnected North-East Innovation Ecosystem*), finanziato dall'Unione Europea – *NextGenerationEU* (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), Missione 4, Componente 2, Investimento 1.5, D.D. 1058 del 23 giugno 2022, ECS_00000043), in particolare relativamente a Fabrizio Mazzetto.

-) le attività di ricerca del PNRR del Centro Nazionale di Ricerca Agritech (*Agritech National Research Center*), finanziato dall'Unione Europea – *NextGenerationEU* (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) – Missione 4, Componente 2, Investimento 1.4, D.D. 1032 del 17 giugno 2022, CN00000022), in particolare relativamente a Stefano Cesco e Fabrizio Mazzetto.

Il presente manoscritto riflette esclusivamente le opinioni e i punti di vista degli autori, né l'Unione Europea né la Commissione Europea possono essere ritenute responsabili per il suo contenuto.

Bibliografia

- Bissett N., Huston C., Christine B. Navarre, 2018. Preparation and Response for Flooding Events in Beef Cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 34(2), 309-324.
- Cesco S, Ascoli D, Bailoni L, Bischetti GB, Buzzini P, Cairoli M, Celi L, Corti G, Marchetti M, Scarascia Mugnozza G, Orlandini S, Porceddu A, Gigliotti G, Mazzetto F, 2024. Smart management of emergencies in the agricultural, forestry, and animal production domain: Tackling evolving risks in the climate change era.

- International Journal of Disaster Risk Reduction 114 (105015). FAO, 2021. The impact of disasters on agriculture and food security. FAO, Rome.
- Gaviglio A, Corradini A, Marescotti ME, Demartini E, Filippini R, 2021. A Theoretical Framework to Assess the Impact of Flooding on Dairy Cattle Farms: Identification of Direct Damage from an Animal Welfare Perspective. *Animals*, 11(1586).
- IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 35-115.
- Kuller M, Schoenholzer K, Lienert J, 2021. Creating effective flood warnings: A framework from a critical review. *Journal of Hydrology* 602(126708).
- Mitheu F, Stephens E, Petty C, Ficchi A, Tarnavsky E, Cornforth R, 2023. Impact-Based Flood Early Warning for Rural Livelihoods in Uganda. *Weather Climate and Society*, 15, 525–539.
- Perez EC, van den Hurk B, van Aalst M K, Amuron I, Bamanya D, Hauser T, Jongma B, Lopez A, Mason S, Mendler de Suarez J, Pappenberger F, Rueth A, Stephens E, Suarez P, Wagemaker J, Zsoter E, 2016. Action-based flood forecasting for triggering humanitarian action, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 3549–3560.
- UNDRR, 2015. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva.

EVALUATION OF MICROCLIMATIC IMPACTS ON THE PHENOLOGY AND PHYSIOLOGY OF THE TIMORASSO GRAPE VARIETY THROUGH ADVANCED NUMERICAL MODELING

VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI MICROCLIMATICI SULLA FENOLOGIA E FISILOGIA DEL VITIGNO TIMORASSO TRAMITE MODELLISTICA NUMERICA AVANZATA

Claudio Cassardo^{12*}, Valentina Andreoli¹, Federico Isnardi¹, Sandro Zilli¹

¹ Dipartimento di Fisica, Università di Torino, Torino

² Centro NATRISK, Università di Torino, Torino

* claudio.cassardo@unito.it

Abstract

This work analyzes the effects of climate variability and global warming on the phenology and physiology of the Timorasso grape variety, a prized native cultivar of southeastern Piedmont. Through the integration of the UTOPIA surface model and the IVINE crop model, a continuous hourly simulation was conducted for the period 2004–2024. Results show a robust ability of the model system to predict the main phenological phases (RMSE ~3–4 days), while highlighting a clear trend in earlier budbreak and harvest dates. However, analysis of more recent vintages (2019–2024) reveals a systematic discrepancy in the leaf area index (LAI), with a tendency for the model to overestimate during extreme heat waves. This study highlights the importance of refining the model's physiological responses to acute heat stress to improve the accuracy of precision viticulture in rapidly changing climates.

Parole chiave

Agricoltura di precisione; WRF; downscaling; aumento di risoluzione spaziale; reti neurali

Keywords

Precision agriculture; WRF; downscaling; resolution enhancement; neural networks

Introduzione

Il settore vitivinicolo globale sta affrontando sfide senza precedenti a causa dell'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi. In Piemonte, una delle regioni viticole più prestigiose al mondo, il vitigno Timorasso (*Vitis vinifera* L.) rappresenta un caso studio di eccezionale interesse. Riscoperto e valorizzato negli ultimi decenni nel distretto dei Colli Tortonesi, il Timorasso è noto per la sua vigoria, la struttura acida e l'elevata capacità di invecchiamento, caratteristiche che gli hanno valso l'appellativo di "Barolo Bianco".

Tuttavia, la gestione agronomica di questo vitigno richiede una comprensione profonda della sua interazione con il microclima locale. La fenologia della vite è infatti guidata principalmente dalla temperatura, ma è influenzata in modo non lineare dalla disponibilità idrica e dalla radiazione solare. In un'era di riscaldamento antropogenico, identificare con precisione il timing delle fasi biologiche (germogliamento, fioritura, invaiatura, maturazione) non è solo un esercizio accademico, ma una necessità pratica per ottimizzare i trattamenti fitosanitari, la gestione della chioma e la pianificazione della vendemmia.

Questo studio utilizza la catena modellistica UTOPIA-IVINE per ricostruire la storia feno-fisiologica del Timorasso negli ultimi 21 anni, fornendo una base quantitativa per valutare la resilienza di questa cultivar.

Area di studio e dataset

L'area di studio è situata nel comune di Tortona (AL), presso l'azienda agricola "La Colombera", sito rappresentativo per la produzione del Timorasso DOCG. Il clima è temperato sub-continentale, ma negli ultimi due decenni ha mostrato segni evidenti di estremizzazione, con estati caratterizzate da ondate di calore prolungate (es. 2003, 2017, 2022).

Il set di dati meteorologici di input per i modelli è stato meticolosamente compilato integrando registrazioni ad alta risoluzione provenienti da due fonti regionali primarie:

- La Rete Agrometeorologica Regionale (RAM);
- La rete idrometeorologica di ARPA Piemonte.

Le variabili forzanti includono: temperatura dell'aria (2m), umidità relativa, velocità del vento, pressione atmosferica e precipitazioni. Per garantire la continuità del dataset necessario a IVINE, i "gap" temporali sono stati colmati mediante tecniche di interpolazione statistica e correlazione con stazioni limitrofe, assicurando la conservazione dei trend locali.

Per garantire una serie temporale continua e robusta per le simulazioni del modello IVINE nello specifico sito di studio a Tortona, i valori mancanti sono stati ricostruiti utilizzando un algoritmo di interpolazione dedicato e specifico per il sito. Questa metodologia opera su un approccio a doppio criterio:

Materiali e metodi

- (1) Prossimità geografica: priorità ai dati provenienti dalle stazioni disponibili più vicine per mantenere la coerenza spaziale;
- (2) Correlazione statistica: selezione del modello di regressione lineare ottimale tra stazioni vicine per massimizzare la rappresentatività dei dati interpolati rispetto alle tendenze microclimatiche locali.



Fig. 1 - Stazioni meteorologiche di ARPA Piemonte e della rete agrometeorologica situate nella provincia di Alessandria (fonte: Google Earth).

Fig. 1 – Meteorological stations of ARPA Piemonte and agrometeorological network located in Alessandria province (source: Google Earth).

Le variabili dinamiche relative ai livelli di sottosuolo (temperatura, contenuto volumetrico di acqua e potenziale idrico) sono state ricavate da una simulazione preliminare effettuata utilizzando il modello di *land surface* UTOPIA. I dati relativi alla tessitura del suolo e al contenuto organico di carbonio sono stati ottenuti preliminarmente dal database SoilGrids.

Per garantire la coerenza scientifica nella fase di validazione, le osservazioni relative ai vigneti sul campo sono state analizzate e contestualizzate utilizzando Gemini AI (Google), che ha facilitato la traduzione tecnica, la sintesi e l'interpretazione comparativa delle serie temporali pluridecennali. Questo approccio collaborativo ha permesso un confronto dettagliato tra i risultati del modello (IVINE-UTOPIA) e i dati storici, evidenziando l'impatto dell'accelerazione climatica sulla cultivar di Timorasso.

Il modello di land surface UTOPIA

Dato che i dati di umidità del suolo e i flussi energetici non sono sempre disponibili in situ, è stato impiegato il modello UTOPIA (University of Torino land surface Process Interaction model in Atmosphere). Si tratta di un modello diagnostico "big leaf" che simula gli scambi di energia, massa e quantità di moto tra la superficie e l'atmosfera. Il suolo è modellato come un sistema multi-strato (fino a 10 livelli), con proprietà idrauliche e termiche dipendenti dalla tessitura del terreno.

Il modello colturale IVINE

IVINE (Italian Vineyard Integrated Numerical model for Estimating physiological values) è un modello deterministico che simula i principali processi biologici della vite. Il modello opera su base oraria, permettendo di catturare le risposte fisiologiche rapide alle fluttuazioni diurne (es. chiusura stomatica pomeridiana durante i picchi termici). La simulazione dei processi fisiologici si basa su variabili meteorologiche orarie. Il modello descrive lo sviluppo della pianta seguendo rigorosamente la codifica internazionale delle fasi fenologiche della vite (scala BBCH), come codificato nel lavoro cardine di Lorenz et al. (1995). L'utilizzo di questa scala permette di standardizzare i risultati simulati (dal germogliamento alla maturazione fisiologica) rendendoli confrontabili con le osservazioni agronomiche standardizzate a livello globale.

Le componenti principali di IVINE includono:

- Fenologia: basata sulla scala BBCH, utilizza sommatorie termiche (GDD e GDH) calibrate specificamente per il Timorasso.
- Accrescimento vegetativo: calcola l'evoluzione della *Leaf Area Index* (LAI) e della biomassa;
- Fotosintesi e respirazione: descritte tramite equazioni biofisiche che dipendono dalla radiazione fotosinteticamente attiva (PAR), dalla temperatura e dallo stato idrico;
- Dinamica degli zuccheri: simula l'accumulo di solidi solubili nell'acino durante la maturazione.

In questa ricerca, è stata testata l'efficacia dell'integrazione di strumenti di AI (Gemini) per la sintesi dei risultati e la traduzione dei parametri biologici complessi in indicatori agronomici leggibili.

Risultati delle simulazioni e validazione

Il modello IVINE è stato preliminarmente calibrato in Isnardi (2026) per il Timorasso, usando le osservazioni condotte presso l'azienda agricola "La Colomba" a Vho, nel tortonese. La presenza di un database più lungo ha permesso una miglioria della calibrazione, i cui coefficienti sono riportati in Tab. 1. Lo stesso dataset è anche stato usato per la simulazione. Si è preferito non dividere il ventunennio in sottoinsiemi in quanto i dati meteorologici di input evidenziano gli effetti del cambiamento climatico, e questo avrebbe rischiato di ripercuotersi sulla calibrazione.

L'analisi della simulazione sui 21 anni di dati evidenzia una variabilità interannuale significativa nei parametri di uscita del modello IVINE, ma lascia intravedere anche trend chiari e preoccupanti legati al cambiamento climatico.

Tab. 1 – parametri del modello IVINE ottenuti dopo la calibrazione (per il dettaglio, si veda Andreoli et al., 2019).
Tab. 1 - IVINE model parameters obtained after calibration (for details, see Andreoli et al., 2019)..

Parametro	Significato	Valore
CC	Chilling units Uscita dalla dormienza	100
Gc	Germogliamento	5500
GDD_F	GDD fioritura	220
GDD_FS	GDD allegagione	250
GDD_M	GDD inizio maturazione	700
GDD_I	GDD invaiatura	90
GDD_H	GDD raccolto	350
CZM	Cont. max di zucchero	23
MAX_BRIX	Valore del max zuccherino di cultivar	23
MAT_BRIX	Valore zuccherino alla maturazione	23.5
SIGMAX	Parametro per la doppia sigmoide	25
GDD_HA	GDD al raccolto	800
EMG	Parametro per la doppia sigmoide	0.1
EC	Parametro per la doppia sigmoide	3
LMG	Parametro per la doppia sigmoide	0.1
LC	Parametro per la doppia sigmoide	3

Analisi fenologica e trend temporali

La validazione delle fasi fenologiche (confronto tra dati osservati in campo e simulati) ha mostrato una precisione eccellente per tutte le fasi principali, con un errore quadratico medio (RMSE) complessivo dell'ordine di 3,4 giorni:

- Germogliamento (Bud burst): Si osserva un netto anticipo di questa fase, che negli ultimi anni tende a verificarsi stabilmente nella prima metà di aprile, con punte anticipate alla fine di marzo in anni eccezionalmente caldi.

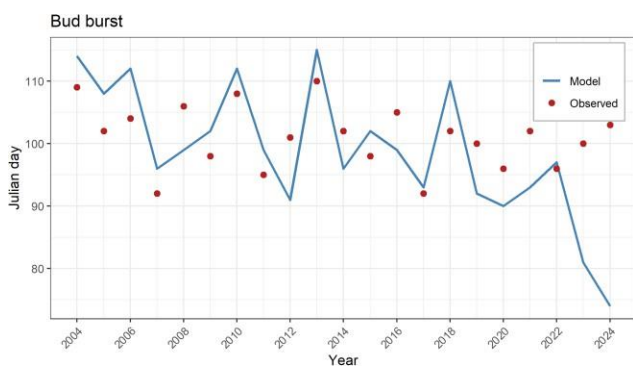


Fig. 2 - Andamento temporale della fase fenologica di germogliamento simulata (linea blu) e osservata (punti rossi).

Fig. 2 – Time trends of simulated (blue line) and observed (red dots) phenological phase of bud burst.

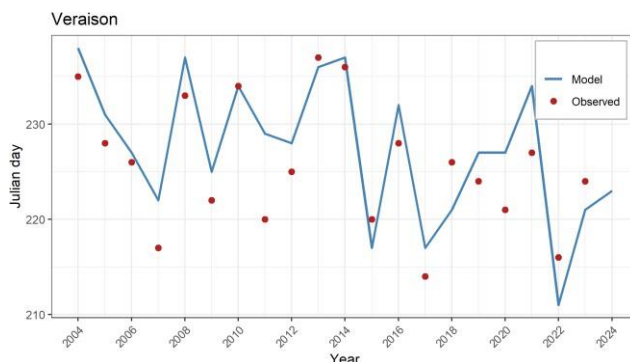


Fig. 3 - Andamento temporale della fase fenologica di invaiatura simulata (linea blu) e osservata (punti rossi).

Fig. 3 – Time trends of simulated (blue line) and observed (red dots) phenological phase of veraison.

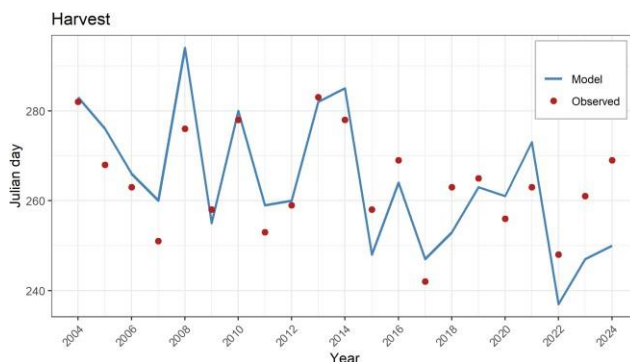


Fig. 4 - Andamento temporale della fase fenologica del raccolto simulata (linea blu) e osservata (punti rossi).

Fig. 4 – Time trends of simulated (blue line) and observed (red dots) phenological phase of harvest.

- Invaiatura (Veraison): Il modello cattura bene il momento in cui l'acino cambia colore e inizia l'accumulo di zuccheri. Il grafico delle simulazioni mostra un trend decrescente (anticipo) nel tempo. L'annata 2022 rappresenta il punto di minimo storico, con l'invaiatura avvenuta in anticipo di circa 15 giorni rispetto alla media del decennio 2004-2014.
- Vendemmia (Harvest): Anche la data di raccolta simulata mostra un anticipo significativo. Se nei primi anni 2000 la vendemmia del Timorasso avveniva tipicamente a fine settembre, nelle simulazioni più recenti essa si è spostata stabilmente verso la prima e seconda decade di settembre.

Dinamica dei parametri fisiologici

Le simulazioni del LAI, della biomassa e dello contenuto zuccherino massimo seguono un andamento cosiddetto "a dente di sega", riflettendo le variazioni relative alle annate più o meno favorevoli, in termini di piovosità e di andamento termico.

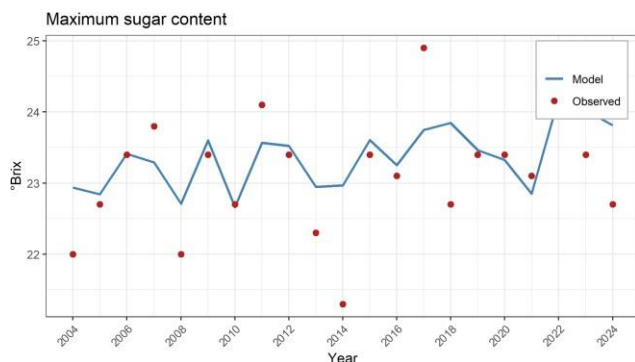


Fig. 5 - Andamento temporale del contenuto zuccherino massimo simulato (linea blu) e osservato (punti rossi).
Fig. 5 – Time trends of simulated (blue line) and observed (red dots) maximum sugar content.

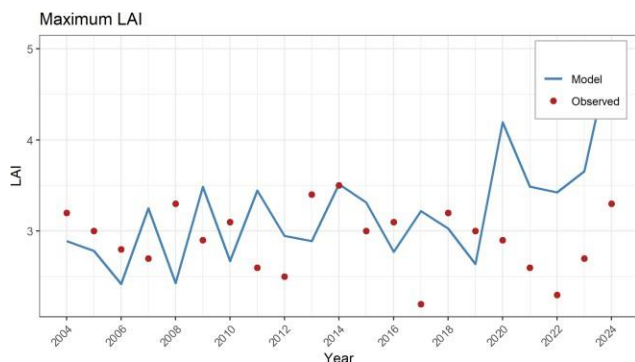


Fig. 6 - Andamento temporale dell'indice di area foliare (LAI) simulato (linea blu) e osservato (punti rossi).
Fig. 6 – Time trends of simulated (blue line) and observed (red dots) Leaf Area Index (LAI).

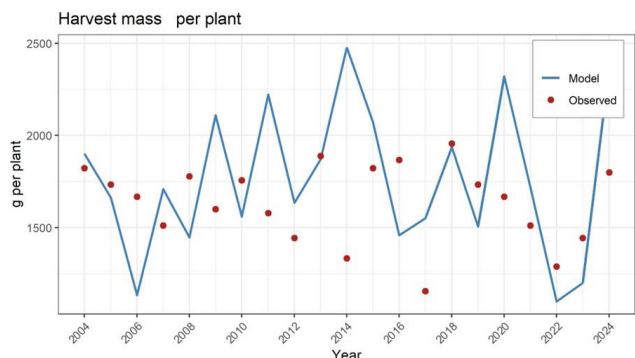


Fig. 7 - Andamento temporale della massa raccolta durante la vendemmia simulata (linea blu) e osservata (punti rossi).
Fig. 7 – Time trends of simulated (blue line) and observed (red dots) harvest mass.

In particolare:

- Contenuto zuccherino: nonostante una maggiore variabilità, in parte dovuta al fatto che il contenuto zuccherino è stato dedotto dal grado alcolico, la simulazione coglie la risposta del vigneto alle mutevoli condizioni climatiche nell'arco dei 20 anni simulati, anche in annate estreme (come il 2014, il 2017 e il 2022);

- LAI: questo parametro fondamentale nel modello IVINE è previsto con buona accuratezza nel periodo 2004-2018, cogliendo con successo le fasi alternate di elevata e bassa vigoria vegetativa. Tuttavia, negli anni più recenti, il modello mostra una significativa sovrastima;
- Massa: il vigneto presenta un range di resa tipico compreso tra 1200 e 2000 g per pianta. Il modello cattura efficacemente l'andamento a "dente di sega" della variabilità interannuale determinata dalle fluttuazioni delle condizioni meteorologiche, e riproduce con successo cali di produzione significativi, come nel 2022, anno particolarmente rappresentativo della grave siccità e dello stress termico registrati nella regione, nonché anni di sovrapproduzione, seppur con alcune sovrastime.

Discussione

In questa sede, ci preme sottolineare come la validazione del modello IVINE trovi ulteriore riscontro nei confronti effettuati sui dati dell'azienda La Colomba per il quadriennio 2021-2024. Tali analisi (i cui risultati completi sono consultabili in Isnardi, 2026) evidenziano una coerenza statistica del tutto analoga a quella ottenuta nel presente studio attraverso l'integrazione dei dati derivati da Gemini IA.

La sovrapposibilità delle metriche di performance non solo conferma l'affidabilità predittiva del modello, ma suggerisce che il dataset osservativo generato tramite intelligenza artificiale presenti una plausibilità fenomenologica e una robustezza statistica tali da renderlo un surrogato affidabile dei rilievi in campo. Ci preme qui ricordare che l'uso di tale dataset ha permesso di allungare il periodo di raffronto da 4 a 21 anni, permettendo anche di ottenere valori quasi climatici per le variabili, nonché di intravedere dei trend sul periodo.

D'altra parte, il confronto modello-osservazioni mostra che, mentre per il periodo 2004-2018 il modello IVINE è stato estremamente preciso nel descrivere l'andamento dei parametri feno-fisiologici, a partire dal 2019 si sono osservate crescenti sovrastime o sottostime per alcuni di essi (segnatamente per le fasi fenologiche e per il LAI). In particolare, durante le ondate di calore più intense, il modello tende a simulare una crescita fogliare che la pianta reale non mostra.

Questo fenomeno sembra indicare che le attuali parametrizzazioni del modello potrebbero non tenere ancora pienamente conto degli effetti di "shutdown" fisiologico che avvengono durante stress termici acuti combinati agli stress idrici. Nel Timorasso, la pianta potrebbe adottare strategie di risparmio idrico più aggressive di quanto previsto (es. senescenza precoce delle foglie basali o arresto totale dell'espansione fogliare) quando le temperature superano stabilmente i 35-37 °C. Questa discrepanza suggerisce la necessità di introdurre nel codice di IVINE nuovi coefficienti di inibizione legati alla temperatura estrema, per riflettere meglio la realtà biologica delle estati "nuova norma".

Conclusioni e sviluppi futuri

Lo studio sui ventuno anni condotto sulla cultivar Timorasso dimostra che:

- La catena modellistica UTOPIA-IVINE si dimostra affidabile: con un errore di circa 3 giorni su un arco di 21 anni per le fasi fenologiche, il modello è uno strumento potente per la pianificazione a lungo termine;
- Nonostante la forte variabilità interannuale in quasi tutti i grafici, il cambiamento climatico risulta visibile in ognuno di essi, anche se non è sempre statisticamente significativo. L'anticipo fenologico risulta sistematico e richiede nuovi approcci nelle modalità di gestione del vigneto (es. diversa gestione del terreno per conservare l'umidità, oppure cambiamenti nelle cimature e diramamenti);
- Necessità di affinamento: le sovra- e sottostime di alcuni parametri negli ultimi 5 anni potrebbe segnalare che stiamo entrando in un regime climatico "estremo" per il quale i modelli tradizionali devono essere ricalibrati.

La prossima fase della ricerca prevede l'estensione della validazione ad altri siti del Piemonte per verificare la portabilità spaziale del modello. Inoltre, l'integrazione con gli scenari di proiezione climatica CMIP6 potrebbe permettere di simulare il comportamento del Timorasso fino al 2050, fornendo ai viticoltori indicazioni cruciali su come e dove coltivare questo prezioso vitigno nei prossimi decenni.

Ringraziamenti

Si ringrazia il personale dell'Azienda "La Colombera", e segnatamente il dott. Davide Ferrarese, per la fornitura di alcuni preziosi dati utili per la calibrazione del modello IVINE.

Bibliografia

- Andreoli, V., et al. (2019). Description and Preliminary Simulations with the Italian Vineyard Integrated Numerical Model for Estimating Physiological Values (IVINE). *Agronomy*, 9(2), 94.
- Cassardo, C., Andreoli, V. (2023). On the Representativeness of UTOPIA Land Surface Model for Creating a Database of Surface Layer, Vegetation and Soil Variables. *Applied Sciences*, 13(15), 8880.
- Isnardi, F. (2026). *Climatic analysis of the phenophysiological processes of the Timorasso grape variety* (in Italian). Bachelor thesis in Physics, University of Turin, Italy. Available from the corresponding author.
- Lorenz, D. H., et al. (1995). Growth stages of the grapevine: Phenological growth stages of the grapevine. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 1(2), 79-83. (Riferimento per la scala BBCH).

AGRO-CLIMATIC CHARACTERIZATION OF THE CILIEGIOLO GRAPE VARIETY

CARATTERIZZAZIONE AGROCLIMATICA DEL VITIGNO CILIEGIOLO

Marco Mancini ^{1*}, Giulia Galli ³, Lorenzo Arcidiaco ², Leonardo Verdi ¹, Silvia Mangani ⁴, Giacomo Buscioni ⁴, Damiano Barbato ⁴, Simone Orlandini ^{1,3}

¹ Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry (DAGRI), University of Florence. Piazzale delle Cascine 18, 50144 - Florence, Italy

² Institute of Bioeconomy, National Research Council (IBE-CNR). Via Madonna del Piano 10, 50019 - Sesto Fiorentino, Italy

³ Climate and Sustainability Foundation. Via Giovanni Caproni 8, 50145 - Florence, Italy

⁴ FoodMicroteam. Via di Santo Spirito 14, 50125 Florence, Italy

* Corresponding author: marco.mancini@unifi.it

Abstract

Ciliegiolo is a black grape variety native to Tuscany, which has seen a resurgence in recent years thanks to monovarietal vinification. Empirical observations have demonstrated its nature as an early-ripening variety. The agro-climatic characterization of the Tuscan Maremma region has shown that the sum of active temperatures between March and August, from 1990 to 2025, averages approximately 1600 GDD; however, in the last two years, approximately 1800 GDD have been recorded. An important distinction exists between the coastal area and the inland hills, with the latter being "cooler," though this difference has been narrowing over the years. Regarding precipitation, the coastal area is characterized by useful rainfall of 191 mm, while the inland hilly areas receive 278 mm, showing no significant trends over time. The inland hilly areas also exhibit fewer tropical nights ($T > 20^{\circ}\text{C}$) and a higher cumulative summer diurnal temperature variation compared to the coastal area.

Parole chiave

Cambiamento climatico; agrometeorologia; somma temperature attive (STA); somma escursioni termiche (SET); ciliegiolo

Keywords

Climate change; agrometeorology; active temperature sum (ATS); sum of diurnal temperature variations (SDTV); ciliegiolo

Introduzione

L'andamento meteorologico influenza direttamente lo sviluppo, la crescita e la produzione della vite sia in termini quantitativi che qualitativi. La lunghezza del ciclo di una pianta può essere misurata in termini di "necessità termiche", essendo la temperatura dell'aria uno dei principali parametri da cui dipendono i processi fisiologici delle piante (Huglin 1986; Larcher 1995; Cameron et al. 2022). La temperatura dell'aria incide con differenti modalità anche sulla qualità delle uve (Tarara et al. 2008; Cohen et al. 2012; Ramos et al. 2024).

Le elevate temperature sono causa di varie manifestazioni fisiologiche non desiderate. Per molti vitigni la soglia critica è rappresentata da 32-34 °C, oltre i quali si hanno l'aumento dei fenomeni ossidativi, l'aumento del tasso di respirazione e il decremento dell'efficienza fotosintetica, proporzionali all'ampiezza dello scostamento della temperatura dai valori normali (Winkler et al. 1974; Greer e Weedon 2012). Le escursioni termiche assumono importanza durante i processi di maturazione favorendo la traslocazione degli zuccheri dalle foglie agli acini (Winkler et al. 1974; Huglin, 1986). Le precipitazioni cumulate nei periodi e sottoperiodi del ciclo vegeto-produttivo forniscono un riferimento utile sia per comprendere le dinamiche produttive e qualitative, sia per definire meglio gli interventi culturali idonei a far fronte alle differenti stagioni agroclimatiche (Fregoni 1985; Matese et al. 2010).

L'obiettivo del presente studio è stato caratterizzare, attraverso indici agroclimatici, il territorio di coltivazione del vitigno ciliegiolo nell'areale della Maremma grossetana.

Materiali e Metodi

L'area di studio, la Maremma toscana, è caratterizzata da un clima mite mediterraneo che impatta sul ciclo vegeto-produttivo della vite determinando un anticipo delle fasi fenologiche. Il ciliegiolo è un vitigno a maturazione abbastanza precoce. Ne risulta che molti dei descrittori delle caratteristiche agroclimatiche utilizzati per la viticoltura in Centro-Nord Italia e nel resto d'Europa siano temporalmente inadeguati, in quanto considerano la stagione vegeto-produttiva fra aprile e ottobre o aprile e settembre. Nel caso del ciliegiolo, risulta corretto comprendere il ciclo fra marzo e agosto, in considerazione del fatto che è un vitigno precoce e negli ultimi anni, a fronte del riscaldamento globale, la maturazione piena si verifica attorno ai primissimi di settembre. Inoltre, l'area ha un clima mite e la ripresa vegetativa è precoce.

Per l'inquadramento agroclimatico sono state utilizzate tre differenti fonti di dati:

1) 5 stazioni termoisigrometriche collocate presso altrettanti vigneti di ciliegiolo nell'areale maremmano, con acquisizione di dati orari per il periodo 11 luglio 2023 - 07 settembre 2025;

2) 4 stazioni termo-pluviometriche della Regione Toscana con dati giornalieri di temperatura minima, massima e precipitazioni, per il periodo 1990 - 2025;
 3) dati di rianalisi giornalieri del database europeo Era5.
 L'analisi agroclimatologica si è basata su 2 criteri principali:
 1) un'analisi della variabilità temporale, che ha avuto l'obiettivo di mettere in evidenza i trend temporali di variazioni dei principali indicatori basandosi su serie storiche;
 2) un'analisi spaziale volta a collocare l'areale di studio nel contesto italiano e a rilevare le differenze fra i 5 siti di studio.



Fig. 1 - Area di studio con indicate le posizioni delle 5 stazioni termo-igrometriche (stelle) e delle 4 stazioni meteorologiche di Regione Toscana (cerchio).

Fig.1 - Study area and the locations of the 5 thermo-hygrometric stations (stars) and the 4 Tuscany Region meteorological stations (circles).

Gli indici calcolati sono stati: somma delle temperature attive (STA), numero di giorni con temperature minime sotto la soglia di 20 °C, numero di giorni con temperature massime sopra la soglia di 33 °C, precipitazioni utili cumulate, somma delle escursioni termiche (SET).

Per la somma delle temperature attive come soglia di sviluppo è stato considerato 10 °C. Sono state considerate utili le precipitazioni giornaliere uguali o inferiori a 30 mm.

Risultati e Discussione

L'analisi delle anomalie della STA medie dei 3 anni di coltivazione, svolta su scala nazionale, ha evidenziato che nel periodo marzo-agosto si sono avuti mediamente 140 gradi giorno (GG) in più rispetto al periodo di riferimento 1991-2020 (Fig. 2). La STA calcolata nelle 4 stazioni meteorologiche posizionate nell'area d'indagine ha evidenziato come, dal 1990 al 2025, si abbiano in media circa 1600 GG.

Nelle aree collinari interne, tuttavia, si è registrata una tendenza all'aumento delle disponibilità termiche di 9,86 GG/anno, a fronte delle aree costiere ove l'incremento medio è di 0,44 GG/anno (Fig. 3). Il 2024 ed il 2025 si collocano rispettivamente come terzo e quarto anno con maggiori disponibilità termiche in termini di gradi giorno cumulati.

Average Cumulate Active Temperature Sum (ATS) Anomaly. Period: Mar-Aug - Year 2023,2024,2025

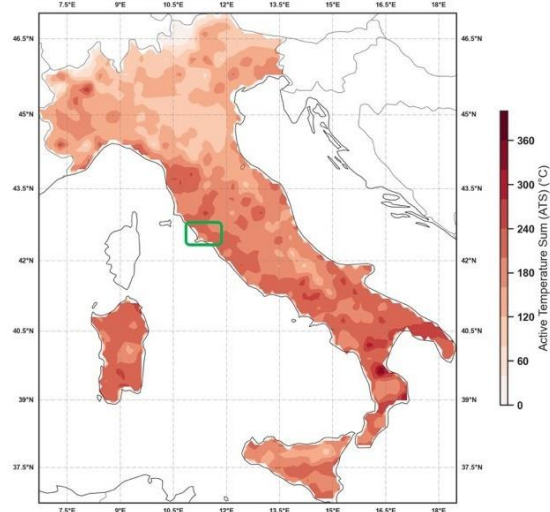


Fig. 2 - Anomalie medie della STA nel periodo marzo-agosto negli anni 2023, 2024 e 2025.

Fig. 2 - Average ATS anomalies for March–August (2023, 2024, and 2025).

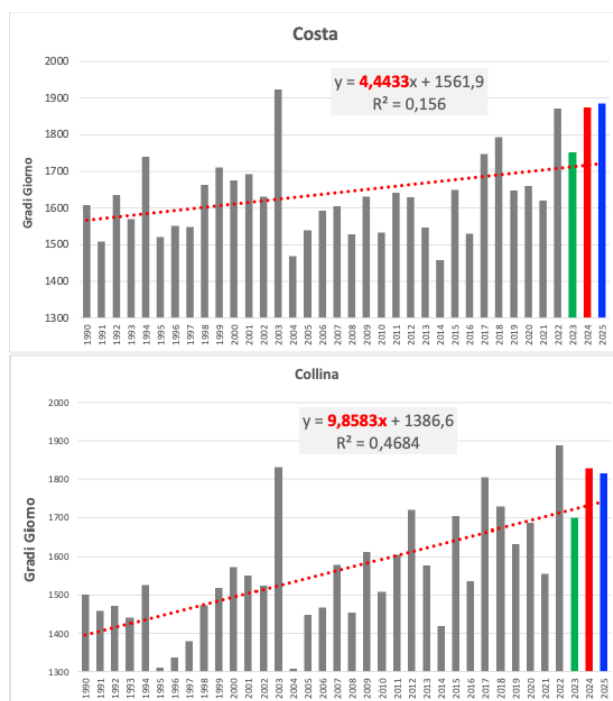


Fig. 3 - STA dell'area di coltivazione del ciliegio - zona costiera e collinare.

Fig. 3 - ATS of the ciliegio growing area - coastal and hilly zones.

Le precipitazioni cumulate nella stagione vegeto-produttiva marzo-agosto, nei tre anni di studio, sono risultate superiori alla media del periodo di riferimento 1991-2020. La distinzione fra area costiera e area collinare interna ha evidenziato una sensibile differenza fra i cumulati medi, nel

periodo 1990-2025, con 191 mm per le aree litoranee e 278 mm per quelle collinari (Fig. 4).

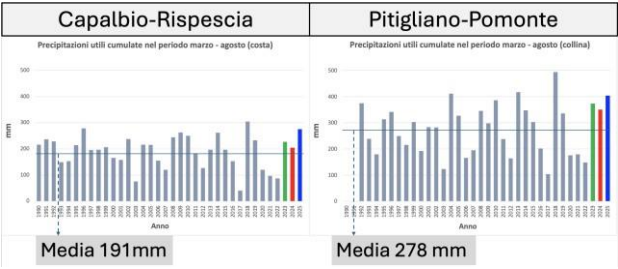


Fig. 4 - Precipitazioni utili cumulate nell'area costiera e collinare.

Fig. 4 - Sum of effective precipitation in the coastal and the hilly zones.

La STA calcolata nei 5 differenti vigneti ha mostrato che le posizioni prossime alla costa hanno cumulati termici maggiori rispetto a quelle collinari, con una differenza di oltre 200 GG fra il vigneto più caldo e quello più freddo. L'STA media è stata di circa 1800 GG (Tab. 1).

Tab. 1 - Somma delle temperature attive (GG) base 10°C nel periodo marzo-agosto nei 5 vigneti di cilieggiolo.
Tab. 1 - Active temperature sum (GDD) with a 10 °C base for the March–August period across the 5 cilieggiolo vineyards.

	1	2	3	4	5	MEDIA
STA mar-ago	1849	1738	1911	1812	1708	1804
STA 11lug -31ago	833	808	865	821	803	826

Tab. 2 - Numero di notti tropicali (T>20 °C) nel periodo 11 luglio - 07 settembre (anni 2023, 2024 e 2025) registrate nei 5 vigneti di cilieggiolo.

Tab. 2 - Number of tropical nights (T >20 °C) during the period July 11 – September 07 (2023, 2024, and 2025) recorded in the 5 cilieggiolo vineyards.

Anno	1	2	3	4	5	Media
2023	23	19	32	28	15	23
2024	28	17	48	29	10	26
2025	12	7	20	11	5	11
Media	21	14	33	23	10	20

Il numero di giorni con temperature massime sopra 33 °C è risultato abbastanza omogeneo nelle medie (fra 26 e 28 giorni), eccetto il vigneto 3, situato lungo il mare e senza rilievi intermedi tra esso e la costa, che ha mostrato estremi termici decisamente inferiori (solo 17 giorni) (Tab. 3).

Tab. 3 - Numero di giorni con temperature massime sopra 33 °C nel periodo 11 luglio - 07 settembre (anni 2023, 2024 e 2025) registrate nei 5 vigneti di cilieggiolo

Tab. 3 - Number of days with maximum temperatures above 33 °C during the period July 11 – September 07 (2023, 2024, and 2025) recorded in the 5 cilieggiolo vineyards.

Anno	1	2	3	4	5	Media
2023	23	23	26	20	27	24
2024	43	43	42	24	41	39
2025	13	17	14	6	12	12
Media	26	28	27	17	27	25

L'analisi delle temperature minime nel periodo 11 luglio – 07 settembre ha evidenziato un elevato numero di “notti tropicali” (T>20 °C) nel vigneto 3, situato lungo il mare e senza rilievi intermedi tra esso e la costa. Le stazioni più interne hanno evidenziato un numero di notti tropicali sensibilmente inferiore (Tab. 2).

In merito alla differenza fra i tre anni d'indagine, il 2024 ha avuto 39 giorni con massime elevate (Tmax>33 °C), mentre il 2025 ha avuto solamente 12 giorni sopra soglia.

Le escursioni termiche sono state maggiori nelle due aree collinari interne (vigneti 2 e 5) (Fig. 5). Le differenze fra i tre anni sono state contenute, con un minimo 470 GG nel 2023 ed un massimo di 503 nel 2025.

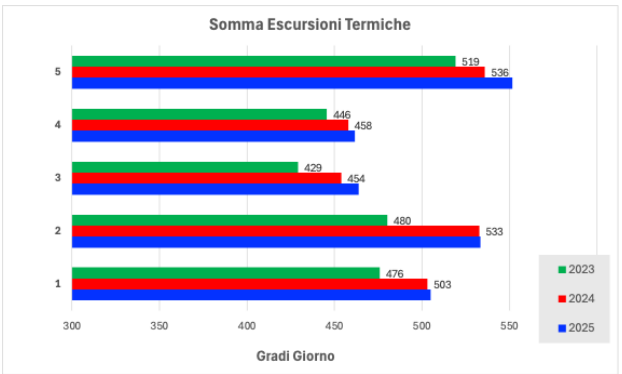


Fig. 5 - Somma delle escursioni termiche del periodo 11 luglio - 07 settembre (anni 2023, 2024 e 2025) registrate nei 5 vigneti di cilieggiolo.

Fig. 5 - Sum of diurnal temperature variations during the period July 11 – September 07 (2023, 2024, and 2025) recorded in the 5 cilieggiolo vineyards.

Conclusioni

L'analisi della variabilità temporale ha evidenziato che:

- la tendenza al riscaldamento è in atto maggiormente nelle aree interne, con le aree collinari che stanno progressivamente allineandosi alle aree costiere in termini di disponibilità termiche;
- il regime delle precipitazioni non indica variazioni importanti e gli ultimi anni sono stati più piovosi della media. Le piogge utili in agosto sono state molto abbondanti nel 2025;

L'analisi della variabilità spaziale ha evidenziato che:

- le disponibilità termiche per la crescita e la maturazione sono più elevate lungo la costa e meno elevate all'interno;
- le temperature massime in luglio e agosto sono elevate ovunque tranne che nelle aree in cui la temperatura è direttamente influenzata dal mare;
- le notti tropicali sono numerose lungo la costa e basse nel vitigno situato più internamente (vitigno 5);
- il 2024 è risultato un anno molto caldo per i diversi indici viticolo-climatici, in particolare per il numero di giorni con temperature sopra la soglia critica;
- la somma delle escursioni termiche assume valori maggiori nelle aree collinari e si riduce progressivamente procedendo verso la costa.

In estrema sintesi, le differenze fra gli anni sono importanti al pari delle differenze fra le sotto-aree, soprattutto per quanto riguarda gli indicatori di stress termico.

Ringraziamenti

Attività svolte nell'ambito del progetto "Ciliegiolo" bando della Regione Toscana DEFR 2022. Si ringrazia Agri4 per il sostegno alle attività progettuali. Si ringrazia la Fondazione Cassa di Risparmio di Firenze per il contributo agli studi svolti. Si ringrazia Terre dell'Etruria per il costante supporto alle attività di rilievo delle informazioni.

Bibliografia

Cameron W., Petrie P. R., Barlow E. W. R., 2022. The effect of temperature on grapevine phenological intervals: Sensitivity of budburst to flowering. *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 315, 108841, ISSN 0168-1923. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108841>.
Cohen S. D., Tarara J. M., Gambetta G. A., Matthews M. A., Kennedy J. A., 2012. Impact of diurnal temperature

variation on grape berry development, proanthocyanidin accumulation, and the expression of flavonoid pathway genes. *J Exp Bot.*, Apr 63(7):2655-65. doi: 10.1093/jxb/err449. Epub 2012 Jan 20. PMID: 22268158; PMCID: PMC3346226.

Fregoni M., 1985. *Viticoltura Generale. Compendi didattici e scientifici*. REDA, Roma, 728 pp.

Greer Dennis H., Weedon Mark M., 2012. Modelling photosynthetic responses to temperature of grapevine (*Vitis vinifera* cv. Semillon) leaves on vines grown in a hot climate. *Plant, Cell & Environment*, 35 – 6 - 0140-7791. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02471.x>

Huglin P., 1986. *Biologie et écologie de la vigne*. Payot Lousanne, Parigi, 371 pp.

Larcher W., 1995. *Physiological plant ecology*. Springer, 506 pp.

Matese A., Di Gennaro F., Genesio L., Vaccari F. P., Sabatini F., Pieri M., 2010. Importanza del monitoraggio micro-meteorologico nella caratterizzazione del terroir, VIII INTERNATIONAL TERROIR CONGRESS, pp. 84-89.

Ramos M. C., Ibáñez Jara M. A., Rosillo L., Salinas M. R., 2024. Effect of temperature and water availability on grape phenolic compounds and their extractability in Merlot grown in a warm area. *Scientia Horticulturae*, Volume 337, 2024, 113475, ISSN 0304-4238. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113475>.

Tarara J. M., Jungmin L., Spayd S. E., Scagel C. F., 2008. Berry Temperature and Solar Radiation Alter Acylation, Proportion, and Concentration of Anthocyanin in Merlot Grapes. *American Journal of Enology and Viticulture*, 59, 235-247. 10.5344/ajev.2008.59.3.235.

Winkler A., Cook J. A., Kliewer W. M., Lider L. A., 1962. *General Viticulture*. University of California press, 543 pp.

THE MONTHLY VITICULTURAL AGROMETEOROLOGY BULLETIN FROM THE MAGAZINE 'L'ENOLOGO' *IL BOLLETTINO MENSILE DI AGROMETEOROLOGIA VITICOLA DELLA RIVISTA L'ENOLOGO*

Luigi Mariani¹, Simone Gabriele Parisi^{2*}, Gabriele Cola³

¹ DICATAM – Università degli Studi di Brescia - Via Branze, 43, 25123 Brescia

² DIAGRAM S.p.A - Via Cavicchini 9, 44037 Jolanda di Savoia (FE)

³ DISAA, Università degli Studi di Milano - Via Celoria 2, 20133 Milano

* s.parisi@diagramgroup.it

Abstract

Founded in 1893 under the name “L'Enotecnico,” the magazine boasts 133 years of history and is the world's oldest periodical in the wine industry. In 2000, the publication adopted its current name “L'Enologo”, in accordance with Law 129/1991, which regulates the profession of enologist in Italy. Since 2014, the magazine has published viticultural agrometeorological bulletins: issues from 2018 to 2022 are available online on the Assoenologi website, while the most recent issues and those prior to 2018 are available only in print.

The bulletins analyze, for each past month, the main agrometeorological characteristics: atmospheric circulation, temperature, total precipitation and rainy days, relative humidity, winds, global solar radiation, and water content of a standard soil (AWC of 150 mm), highlighting their impact on the vegetative and productive state of the vine through detailed tables and maps. The analysis covers the national level and three macro-regions (North, Central, and South), for which the reference scales are the synoptic and mesoscale; climatological and phenological comparisons for grapevines are based on the 2001–2020 climate norm. For years, the primary source of data was NOAA's GSOD system, which was decommissioned in August 2024. Consequently, a transition was made to the Civil Protection Department's Radar-DPC_v2 Platform, which provides temperature and precipitation data on a high-resolution spatial and temporal grid. The presentation will highlight the potential of this product for viticultural agrometeorology, the challenges encountered during its implementation, and a broader discussion on the status and prospects of this type of bulletin.

Parole chiave

Agrometeorologia; viticoltura; bollettini agrometeo; raster meteo; vocazionalità

Keywords

Agrometeorology; viticulture; agrometeorological bulletin; meteorological grid; suitability

Introduzione

I bollettini agrometeorologici sono supporti informativi che descrivono ed analizzano le condizioni meteorologiche (passate, pregresse e/o previste) e il loro impatto sulle produzioni agrarie. Le condizioni meteorologiche vengono in genere confrontate con le normali climatiche, che secondo l'Organizzazione Meteorologica mondiale si ottengono sottoponendo ad analisi statistica i dati degli ultimi 30 anni. I bollettini sono strutturati in funzione delle esigenze degli utenti di riferimento che posso ad esempio essere imprenditori agricoli o Enti deputati alla gestione del territorio.

A livello storico occorre considerare che da quando nei primi anni 70 del XX secolo si sono sviluppati in Italia i primi bollettini agrometeorologici, i mezzi di diffusione dell'informazione (media) hanno giocato un ruolo cruciale nel determinarne la struttura, i contenuti e la frequenza di emissione. In passato si è fatto ricorso ad avvisi affissi in apposite bacheche, a quotidiani, al sistema postale, al telefax (es: fax on demand) o ancora a strumenti quali il sistema telematico Videotel, antenato di internet. Con l'avvento di internet i bollettini agrometeorologici sono stati gradualmente trasferiti sul nuovo sistema e oggi la massima

parte di essi viene diffusa unicamente in rete ed è accessibile tramite personal computer o smartphone.

Viene qui presentato il bollettino pubblicato sulla rivista L'Enologo, che presenta cadenza mensile e copertura estesa all'intero areale viticolo italiano. Il prodotto ha lo scopo supportare la corrente stagione viticola, analizzando l'andamento del mese precedente ed i suoi effetti per la viticoltura. Il bollettino viene diffuso all'interno di una sezione dedicata della rivista L'Enologo di Assoenologi.

Ad integrazione del bollettino viene poi prodotto con cadenza annuale il commento all'annata viticola che viene emesso nel mese di settembre e che fa da supporto alle previsioni vendemmiali emesse da Assoenologi.

Materiali e Metodi

Il bollettino per l'Enologo prevede anzitutto l'analisi circolatoria sinottica giornaliera riferita alle carte giornaliere di altezza del livello barico di 850 hPa per l'areale euro-atlantico (da 30 a 70° di latitudine Nord e da -40 a 40° di longitudine Est) provenienti dal dataset della NOAA (<https://psl.noaa.gov/data/histdata/>). Le carte del livello barico di 850 hPa sono state adottate in quanto descrivono con efficacia gli effetti dell'orografia alpina e appenninica

sulla circolazione rispetto a carte riferite ad altitudini maggiori, consentendo così di individuare le strutture circolatorie che nella loro frequenza e persistenza sono i determinanti fondamentali delle variabili atmosferiche al suolo. L'analisi di frequenza dei diversi tipi di tempo viene svolta utilizzando un sistema di classificazione a 17 tipi sviluppato a partire dal sistema di Borghi e Giuliacci (Colangelo et al, 2022).

A ciò segue l'analisi dei campi termo-pluviometrici giornalieri ottenuti da dati meteorologici osservativi e dataset climatologici di riferimento, con l'obiettivo di produrre campi spazialmente coerenti e ad elevata risoluzione per applicazioni agrometeorologiche nel settore vitivinicolo italiano. Si tratta di una procedura recentemente riprogettata e resa operativa da gennaio 2026 per adeguare il sistema alla uscita dall'operatività del sistema NOAA - GSOD da cui venivano in precedenza attinti i dati termici mentre quelli pluviometrici venivano già da alcuni anni attinti dai dataset dei servizi meteorologici regionali.

Nella versione attualmente operativa i raster giornalieri di temperatura massima, temperatura minima e precipitazione cumulata sono derivati dalle osservazioni orarie e sub-orarie rese disponibili attraverso la Piattaforma Radar della Protezione Civile. L'acquisizione dei dati avviene in modo completamente automatizzato mediante interrogazione dei servizi API messi a disposizione dall'infrastruttura del Dipartimento di Protezione Civile. Le procedure di download e aggiornamento dei dataset sono state implementate tramite workflow automatizzati basati su GitHub Actions, consentendo l'esecuzione schedulata delle operazioni e la gestione continuativa delle elaborazioni. I dati scaricati vengono giornalmente archiviati su infrastruttura cloud Google Drive, garantendo l'accessibilità dei dataset utilizzati nelle elaborazioni operative.

La climatologia di riferimento è stata costruita utilizzando la banca dati SCIA di ISPRA relativi al periodo climatico standard 2001–2020. I campi originari SCIA, disponibili a risoluzione spaziale di 5 km, sono stati sottoposti a una procedura di downscaling spaziale finalizzata alla produzione di raster climatici a 1 km di risoluzione. La metodologia implementata si basa sull'utilizzo di modelli digitali del terreno (DEM) e sulla stima giornaliera di gradienti termici verticali locali (lapse rates), distinti per temperatura minima e massima, al fine di rappresentare correttamente le differenti dinamiche termo-altimetriche associate ai due parametri.

Per la produzione degli indicatori climatici destinati al bollettino mensile, le elaborazioni raster vengono successivamente aggregate considerando esclusivamente i pixel ricadenti all'interno delle aree viticole italiane. L'utilizzo di maschere territoriali dedicate (shapefile WINEMAP by Eurac research – Candiago et al., 2022) consente di escludere superfici non vocate alla viticoltura, aumentando la rappresentatività agroclimatica degli indicatori sintetici prodotti e migliorando la coerenza delle analisi rispetto alle effettive aree di coltivazione della vite.

I flussi informativi

Il sistema sviluppato definisce una catena operativa completamente automatizzata per l'acquisizione, il processamento, l'archiviazione e la distribuzione di dati meteorologici e climatologici ad alta risoluzione spaziale destinati al monitoraggio agroclimatico delle aree viticole italiane.

Il workflow implementato integra procedure di data ingestion automatica, elaborazione geospaziale avanzata e produzione automatizzata di indicatori territoriali.

Il flusso informativo si articola in una sequenza strutturata di moduli operativi. La prima fase riguarda l'acquisizione automatica dei dati osservativi dalla piattaforma radar della Protezione Civile tramite servizi API. Gli script eseguiti tramite GitHub Actions effettuano interrogazioni periodiche ai servizi remoti, scaricano i dataset meteorologici disponibili e ne verificano la consistenza temporale e spaziale. I dati vengono quindi organizzati secondo una struttura gerarchica di archiviazione e sincronizzati automaticamente su Google Drive, garantendo ridondanza e disponibilità continua dell'archivio operativo.

A valle della produzione dei raster meteorologici giornalieri ad alta risoluzione spaziale, il workflow implementato prevede una fase dedicata alla derivazione automatica di indicatori agroclimatici sintetici finalizzati al monitoraggio delle condizioni meteorologiche nei comprensori vitivinicoli italiani. Le elaborazioni vengono effettuate esclusivamente sui pixel ricadenti all'interno delle aree vitate, mediante applicazione di maschere territoriali derivate da cartografia tematica delle superfici viticole nazionali, al fine di garantire la rappresentatività agroclimatica degli indicatori prodotti. Gli indicatori vengono inizialmente calcolati a scala giornaliera a partire dai raster di temperatura minima, temperatura massima e precipitazione cumulata. Per ciascun giorno vengono prodotte statistiche spaziali aggregate delle principali variabili meteorologiche, comprendenti media areale delle temperature, cumulati di precipitazione sulle aree viticole considerate. Tali elaborazioni consentono la costruzione di serie temporali continue adatte sia all'analisi operativa sia alla caratterizzazione climatica stagionale.

Successivamente, il sistema realizza aggregazioni temporali automatiche su scala decadale e mensile. Le decadi vengono definite secondo la suddivisione convenzionale del calendario meteorologico (1–10, 11–20 e fine mese), mentre gli aggregati mensili vengono ottenuti mediante sintesi completa dei dati giornalieri appartenenti al medesimo mese. Per le variabili termiche vengono calcolate medie temporali di Tmax e Tmin, mentre per le precipitazioni vengono derivati cumulati decadali e mensili.

Particolare rilevanza assume il calcolo delle anomalie climatiche. Per ciascun pixel e per ciascuna unità temporale (giorno, decade e mese) vengono calcolate anomalie relative. Nel caso delle temperature, le anomalie vengono espresse come differenza rispetto alla media climatica del periodo di riferimento, mentre per le precipitazioni vengono calcolati sia scarti assoluti sia anomalie percentuali rispetto ai cumulati climatologici attesi. Questa procedura consente di identificare rapidamente condizioni di surplus o deficit termico e pluviometrico nei territori vitivinicoli monitorati.

Il workflow include inoltre il calcolo automatico del numero di giorni piovosi. Tale indicatore viene derivato conteggiando, per ciascun pixel e per ciascun intervallo temporale di aggregazione, il numero di giorni con precipitazione superiore a una soglia prefissata (≥ 1 mm/giorno). I valori vengono successivamente aggregati spazialmente sulle aree viticole e confrontati con la frequenza climatologica attesa, consentendo di valutare eventuali anomalie nella distribuzione temporale delle precipitazioni. Oltre ai cumulati pluviometrici, questo approccio permette infatti di distinguere tra eventi concentrati ad alta intensità e regimi pluviometrici caratterizzati da precipitazioni frequenti ma moderate, elemento particolarmente rilevante nelle applicazioni agrofenologiche e fitosanitarie.

Gli indicatori prodotti alimentano infine il sistema di reportistica automatizzata del bollettino agroclimatico per il settore enologico. Le elaborazioni comprendono mappe tematiche (Fig.3), serie temporali aggregate, anomalie spaziali e indicatori sintetici territoriali, consentendo il monitoraggio continuo delle condizioni meteorologiche e climatiche nelle principali aree vitivinicole italiane. L'automazione completa della pipeline garantisce aggiornamento operativo continuo, riproducibilità scientifica delle elaborazioni e possibilità di estensione del sistema verso ulteriori indicatori agroambientali e bioclimatici.

Considerazioni climatologiche sugli areali viticoli

L'analisi spaziale e climatologica sviluppata nell'ambito del bollettino meteorologico per l'enologo ha consentito di validare quantitativamente il concetto di vocazionalità delle aree viticole, evidenziando come la distribuzione geografica delle aree DOC/DOCG sia strettamente correlata alla presenza di condizioni microclimatiche favorevoli alla coltivazione della vite. Attraverso l'integrazione di dati raster meteorologici ad alta risoluzione, modelli digitali del terreno (DEM) e analisi zonali su differenti areali territoriali, è stato possibile confrontare il comportamento termico delle aree effettivamente vitate con quello di aree territoriali più ampie, mantenendo in entrambi i casi il vincolo altimetrico inferiore ai 700 m s.l.m., così da eliminare l'effetto diretto delle quote più elevate sulla variabilità termica.

L'analisi delle temperature minime medie mensili mostra con chiarezza che le aree viticole presentano una significativa attenuazione degli estremi minimi termici rispetto agli areali territoriali più ampi. In particolare, i valori minimi registrati all'interno delle superfici vitate risultano mediamente meno accentuati, mentre la distribuzione delle temperature evidenzia una maggiore stabilità e una riduzione della variabilità spaziale. Al contrario, negli areali più estesi, pur limitati alle medesime condizioni altimetriche, persistono valori minimi più estremi e una maggiore frequenza di condizioni termiche sfavorevoli. Questo comportamento suggerisce la presenza di fattori microclimatici locali – quali esposizione, ventilazione, morfologia del versante, prossimità a corpi idrici e capacità drenante dei suoli – che contribuiscono a mitigare le

condizioni termiche nelle zone storicamente selezionate per la viticoltura.

In particolare, le distribuzioni percentuali delle temperature minime relative agli areali viticoli mostrano una distribuzione traslata verso valori termici più elevati, con una minore frequenza di temperature estreme basse e una riduzione significativa della componente appartenente ai percentili inferiori (P10). Al contrario, negli areali non viticoli si osserva una maggiore presenza di valori minimi accentuati, indicativa di condizioni microclimatiche più fredde e potenzialmente maggiormente esposte al rischio di stress termico e gelate (Esempio Febbraio 2026 in Fig. 2).

I risultati ottenuti evidenziano quindi come la localizzazione delle aree viticole rappresenti l'esito di un processo di selezione territoriale di lungo periodo, nel quale la componente climatica assume un ruolo determinante. La minore incidenza degli estremi termici, in particolare delle basse temperature potenzialmente associate a fenomeni di gelata tardiva o stress fisiologico della vite, costituisce infatti uno degli elementi chiave della vocazionalità enologica di un territorio. In questo contesto, l'utilizzo di strumenti geospaziali e di analisi meteorologiche ad alta risoluzione consente non solo di descrivere tali dinamiche, ma anche di quantificarle in modo oggettivo e riproducibile.

L'approccio metodologico adottato dimostra inoltre il valore operativo della bollettistica meteorologica evoluta come supporto alle attività enologiche e viticole. L'integrazione tra dati climatici, analisi raster, modelli altimetrici e delimitazione degli areali vitati permette infatti di costruire indicatori territoriali utili sia per il monitoraggio delle condizioni produttive sia per la pianificazione agronomica e la gestione del rischio climatico.

Conclusioni e prospettive future

La prima domanda che viene spontaneo porsi è se il bollettino mensile pubblicato sulla rivista l'Enologo abbia un reale appeal per la categoria degli enologi e su questo sarebbe opportuno che Assoenologi svolgesse un rilevamento specifico. In ogni caso riteniamo che per incrementare l'efficacia del prodotto sarebbe utile che il bollettino venisse diramato ai soci in tempo reale così come sarebbe importante poter ricevere dai soci di Assoenologi informazioni relative alla fenologia e alle avversità biotiche e abiotiche per alcune cultivar di riferimento, cosa fin qui rivelatasi impraticabile. In termini più generali è anche utile domandarsi quale sarà in futuro il destino dei bollettini agrometeorologici. Al riguardo possiamo ipotizzare che un ruolo sempre più importante lo avranno i servizi personalizzati in grado di rispondere a domande del tipo: "che trattamento antiperonosporico (prodotto, dosi, momento di intervento) devo eseguire nel mio vigneto che si trova allo stadio fenologico BBCH 11-12 (1 - 2 foglie distese) (Lorenz et al., 1995), a fronte di un determinato andamento meteorologico pregresso misurato da stazione meteorologica aziendale o previsto tramite modelli previsionali". La risposta a una richiesta di questo genere dev'essere supportata da modelli di infezione e potrà essere facilitata dalla disponibilità di sistemi di intelligenza artificiale (IA) in grado di interpretare con rapidità e accuratezza i dati disponibili.

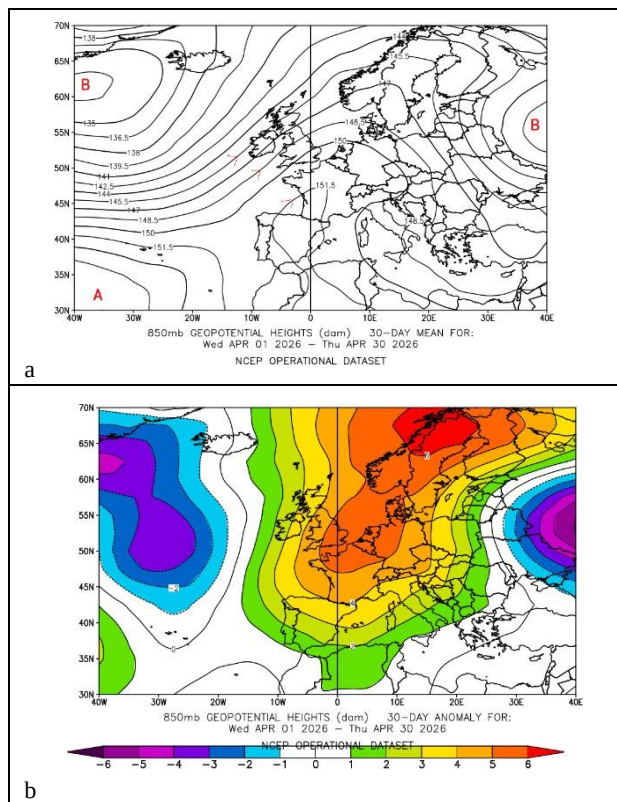


Fig. 1 - La carta circolatoria media di aprile 2026 (Fig. 1a) riferita al livello di pressione di 850 hPa evidenzia come principale determinante del tempo atmosferico sull'areale italiano un promontorio anticiclonico da Sudovest che influenza il settentrione impedendo l'accesso alle perturbazioni atlantiche e apportando masse d'aria mite dall'areale subtropicale africano e del vicino Atlantico. Ne è conseguita una sensibile anomalia termica positiva associata a una sensibile anomalia pluviometrica negativa. Sul sud peninsulare e sulla Sicilia ha predominato invece una circolazione depressionaria alimentata da correnti fredde da Nordest che ha dato luogo al prevalere di variabilità perturbata. La carta di anomalia del livello di pressione di 850 hPa (Fig. 1b) conferma tale analisi, evidenziando una sensibile anomalia positiva al Nord (area giallo e arancio) che si associa a un nucleo di anomalia positiva centrato sul Nord della Scandinavia, segno che l'anomalia ha le sue radici nella circolazione generale.

Fig. 1 - The average circulation map for April 2026 (Fig. 1a), referring to the 850 hPa pressure level, highlights a southwesterly anticyclonic ridge as the primary determinant of weather conditions over Italy. This ridge influences the north, blocking the passage of Atlantic disturbances and bringing mild air masses from the African subtropics and the nearby Atlantic. This resulted in a significant positive temperature anomaly associated with a significant negative precipitation anomaly. Over the southern peninsula and Sicily, however, a low-pressure circulation dominated, fed by cold northeasterly winds, which led to predominantly unsettled weather. The 850 hPa pressure level anomaly map (Fig. 1b) confirms this analysis, showing a significant

positive anomaly in the north (yellow and orange areas) associated with a positive anomaly centered over northern Scandinavia, indicating that the anomaly has its roots in the general circulation.

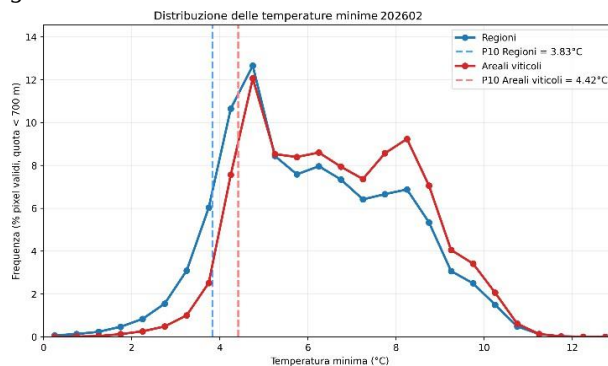


Fig. 2 - Diagramma di frequenza delle temperature minime registrate nel mese di febbraio 2026 a quote inferiori a 700 m slm per tutti i pixel del territorio nazionale (Regioni) e per i soli pixel contenuti negli areali viticoli DOC/DOCG . Si noti che gli areali vitati presentano una distribuzione delle temperature minime traslata verso destra e dunque verso condizioni meteo-climatiche più favorevoli alla coltura della vite.

Fig. 2 - Frequency diagram of minimum temperatures recorded in February 2026 at elevations below 700 m above sea level for all pixels across the country (Regioni) and for pixels located within DOC/DOCG wine-growing areas only. Note that the vineyard areas show a shift in the distribution of minimum temperatures to the right, and thus toward weather and climate conditions more favorable to grape cultivation.

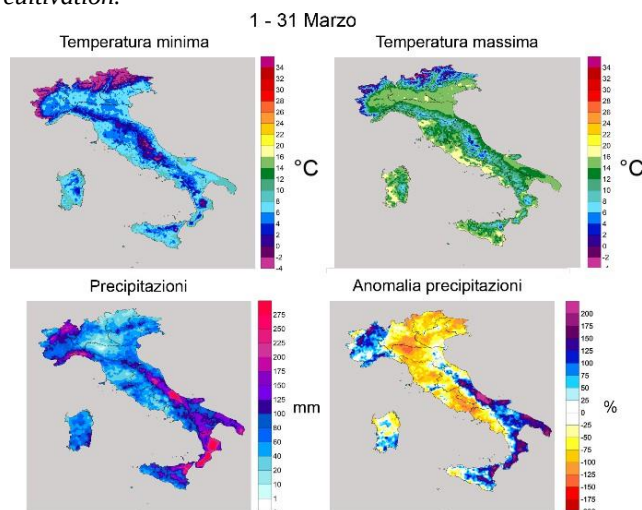


Fig. 3 – Esempio delle carte delle temperature medie delle massime e delle minime (°C) delle precipitazioni totali (mm) e dell'anomalia pluviometrica (percentuale rispetto alla norma) per il periodo 1-31 Marzo 2026. Le anomalie sono state ricavate confrontando i dati del mese con la media del ventennio 2001-2020.

Fig. 3 – Example of maps showing average maximum and minimum temperatures (°C), total precipitation (mm), and precipitation anomalies (percentage relative to the norm) for the period

March 1–31, 2026. The anomalies were calculated by comparing the monthly data with the 20-year average for 2001–2020 period.

È altresì chiaro che strumenti di questo tipo richiederanno anche una capacità autonoma di verifica da parte del viticoltore che lo metta al riparo da eventuali errori. In sostanza stiamo parlando di sistemi di supporto alle decisioni (Decision Support Systems - DSS) supportati dall'IA e non di strumenti che sostituiscono in toto l'imprenditore agricolo.

Bibliografia

- Colangelo, G.; Sanesi, G.; Mariani, L.; Parisi, S.G.; Cola, G. A Circulation Weather Type Analysis of Urban Effects on Daily Thermal Range for Milan (Italy). *Atmosphere* 2022, 13, 1529. <https://doi.org/10.3390/atmos13091529>
- Candiago, S., Tscholl, S., Bassani, L. et al. A geospatial inventory of regulatory information for wine protected designations of origin in Europe. *Sci Data* 9, 394 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01513-0>
- Lorenz, D. H., Eichhorn, K. W., Bleiholder, H., Klose, R., Meier, U., & Weber, E. (1995). Phenological growth stages of the grapevine (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*). *Viticulture and Enology Science* (precedentemente *Wein-Wissenschaft*), 50, 151-155.

USING GLOBAL CLIMATE DATA TO SUPPORT THE PREDICTION OF AFLATOXIN CONTAMINATION IN CORN

IMPIEGO DI DATI CLIMATICI GLOBALI A SUPPORTO DELLA PREVISIONE DELLE CONTAMINAZIONI DA AFLATOSSINE IN MAIS

Balkova¹, D., Raj², R., Rieder², H., Camardo Leggieri¹, M., and Battilani^{1*}, P.

¹Department of Sustainable Crop Production (DI.PRO.VE.S.), Faculty of Agricultural, Food and Environmental Sciences, Research Center Plant Health Modelling, Università Cattolica del Sacro Cuore, 29122 Piacenza, Italy

²Institute of Meteorology and Climatology, University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Vienna, Austria,

* paola.battilani@unicatt.it

Abstract

La contaminazione da aflatossine nel mais, causata principalmente da *Aspergillus flavus*, è fortemente influenzata dalle condizioni meteorologiche. Modelli meccanicistici come AFLA-maize è un modello meccanicistico che stima il rischio di contaminazione a supporto delle strategie di gestione. L'impiego del modello dipende dalla disponibilità di dati meteorologici, ma ha come limite l'assenza di una componente previsionale. Questo studio valuta se dataset climatici globali liberamente accessibili, quali ERA5-Land che include la componente previsionale, possano alimentare AFLA-maize in modo affidabile e fornire stime del rischio durante la stagione culturale. E' stata adottata una strategia ibrida in cui i dati disponibili sono stati valutati come alternativa alle osservazioni da stazioni meteorologiche, mentre le previsioni stagionali sono state introdotte in diversi momenti della stagione culturale del mais. Sono state applicate correzioni di bias per migliorare l'accuratezza delle variabili meteorologiche e allineare i dataset previsionali ai dati osservati. Le simulazioni basate sulle previsioni sono state confrontate con quelle ottenute utilizzando dati raccolti da stazione meteorologiche in 10 località dell'Emilia-Romagna. I risultati mostrano che i dati di ERA5-Land possono fungere da input alternativi per AFLA-maize, riproducendo le simulazioni basate su stazione con buona concordanza, dopo la correzione del bias. Le previsioni stagionali consentono di stimare il rischio di aflatossine 3–8 settimane prima della raccolta, con coerenza rispetto ai pattern storici a seconda del momento di inizializzazione. Le inizializzazioni precoci offrono maggiore anticipo decisionale, ma presentano maggiore incertezza, mentre quelle tardive garantiscono precisione. L'impiego di ensemble previsionali permette di rappresentare differenti traiettorie climatiche plausibili, supportando valutazioni probabilistiche del rischio. Questo approccio migliora la capacità di prevedere il rischio di contaminazione da aflatossine e può fungere da strumento di allerta precoce per supportare agricoltori e stakeholder nella gestione della contaminazione in un contesto di crescente variabilità climatica.

Parole chiave

Aflatossine, dati climatici, previsione

Keywords

Aflatoxin, climate data, forecast

Riferimenti:

Balková, D., Raj, R., Rieder, H. E., Camardo Leggieri, M., Battilani, P. 2026. Predicting aflatoxin risk with seasonal meteorological forecast. Environ. Res. Lett. 21: 024016. DOI: 10.1088/1748-9326/ae3629

OPTIMIZATION OF DEFICIT IRRIGATION IN MAIZE: THE ROLE OF AGROMETEOROLOGICAL DRIVERS IN THE YIELD-WUE TRADE-OFF

OTTIMIZZAZIONE DELL'IRRIGAZIONE DEFICITARIA DEL MAIS: IL RUOLO DEI DRIVER AGROMETEOROLOGICI NEL TRADE-OFF TRA RESA E WUE

Andrea Carli*, Leonardo Verdi, Anna Dalla Marta

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali (DAGRI) – Università degli Studi di Firenze, Piazzale delle Cascine 18, 50144, Firenze

*andrea.carli@unifi.it

Abstract

Deficit irrigation (DI) is a key strategy for the sustainability of maize (*Zea mays* L.), but its effectiveness depends on agro-meteorological factors. A global meta-analysis of 108 field studies conducted over the last 15 years assessed the trade-off between grain yield (GY) and water use efficiency (WUE). Yield decreases with the intensity of stress: -4.7% with low deficit (>75% ET_c), -18.5% with moderate deficit (55-75% ET_c) and -32.9% with severe deficit (<55% ET_c), whereas WUE increases by 9.5% with low deficit and does not vary significantly with more intense deficits. Among management factors, the irrigation method played a key role, with sharp reductions in yield and WUE under surface irrigation during severe deficit. Loamy soils mitigated the negative effects of moderate and severe deficits, whilst also improving WUE. DI performs well in environments with low potential evapotranspiration demand (ET₀), but under conditions of high ET₀ (>1600 mm/year) and severe deficit, it reduces yield by over 40%. For maize, tropical and arid areas are less suited to severe water deficits, whilst temperate and continental areas show an increase in WUE (+6.3%) even under severe stress.

Parole chiave

Produttività idrica, domanda evaporativa, stress idrico, resa in granello

Keywords

Water productivity, evaporative demand, water stress, grain yield

Introduzione

Il mais (*Zea mays* L.) è uno dei pilastri della sicurezza alimentare globale, ma la sua produttività è messa a dura prova dalla crescente scarsità d'acqua e dai cambiamenti climatici (Rezaei *et al.*, 2023). In questo scenario, l'agricoltura è chiamata a una gestione più efficiente dell'acqua, passando dalla massimizzazione della resa per unità di superficie a quella per unità di acqua consumata. Una sintesi globale degli studi sul mais pubblicati tra il 1980 e il 2015 ha mostrato che una riduzione del 40% dell'acqua disponibile può comportare una diminuzione della resa superiore al 39% (Daryanto *et al.*, 2016). L'irrigazione deficitaria (DI) rappresenta una strategia agronomica chiave per rispondere a questa sfida. Essa consiste nell'applicare volumi irrigui inferiori al fabbisogno evapotraspirativo della coltura (ET_c), accettando una lieve riduzione della resa a fronte di un significativo risparmio idrico e di un potenziale incremento dell'efficienza d'uso dell'acqua (WUE). Sebbene la DI nel mais sia stata ampiamente studiata, l'eterogeneità dei risultati sperimentali suggerisce che l'efficacia di questa pratica dipenda strettamente dall'interazione di molteplici fattori, quali il metodo irriguo, le proprietà idrauliche del suolo e le condizioni climatiche locali. Poiché nell'ultimo decennio gli studi sull'irrigazione nel mais sono aumentati in modo sostanziale, era necessario analizzare e sintetizzare quantitativamente gli effetti di diversi livelli di deficit irriguo su questa coltura. La presente meta-analisi ha selezionato 108 studi pubblicati negli ultimi 15 anni per identificare le soglie ottimali di deficit idrico, valutando come le variabili

agronomiche e ambientali modulino la resa in granello (GY) e la WUE, fornendo linee guida operative per una gestione irrigua sostenibile.

Materiali e Metodi

È stata condotta una ricerca bibliografica nelle banche dati Scopus e Web of Science per individuare gli studi pubblicati negli ultimi 15 anni (2011-2025) che analizzano gli effetti dell'irrigazione deficitaria sulla resa in granello (GY) e sull'efficienza nell'uso dell'acqua (WUE) nel mais. La stringa di ricerca utilizzata conteneva le seguenti parole chiave: (“deficit irrigation” OR “irrigation strategies” OR “irrigation regimes” OR “water-saving irrigation”) AND (“yield” OR “productivity”) AND (“water use efficiency” OR “WUE”) AND (“maize” OR “Zea mays” OR “corn”). La ricerca è stata condotta in conformità alle linee guida PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), con gli studi selezionati tramite uno screening sequenziale di titoli, abstract e testi completi. Sono stati esaminati in totale 1099 articoli e, dopo aver rimosso i duplicati e gli articoli che non soddisfacevano i criteri di inclusione, ne sono stati selezionati 108 per la meta-analisi. Sono stati inclusi nella meta-analisi gli studi che soddisfacevano tutti i seguenti criteri:

1. Tipo di esperimento e definizione del controllo: sono state incluse solo le prove condotte in campo (escludendo studi in vaso e in ambiente controllato) che prevedevano un confronto diretto tra irrigazione al 100% dell'evapotraspirazione colturale (ET_c) (controllo) e regimi

deficitari quantificabili. Sono stati inclusi studi condotti sia in monocultura che in rotazione, mentre sono stati esclusi i sistemi di consociazione.

2. Disponibilità di confronti e definizione delle variabili: doveva essere riportato almeno un confronto tra il trattamento con deficit idrico e il controllo per almeno una variabile tra GY e WUE. La WUE è stata definita come il rapporto tra la resa in granella e l'acqua consumata durante la stagione di crescita (kg m^{-3}). La media, la dimensione del campione e un indicatore di variabilità (deviazione standard, errore standard o intervallo di confidenza) o la significatività statistica dovevano essere disponibili sotto forma di dati numerici o ricavabili dai grafici.

Al fine di indagare sulle cause dell'eterogeneità, sono stati presi in considerazione i seguenti fattori moderatori, definiti in base alla rilevanza agronomica e alla letteratura:

1. Livello di deficit idrico (% rispetto al controllo): basso (> 75%); moderato (55-75%); severo (< 55%).

2. Metodo irriguo: superficiale (furrow irrigation, border irrigation, basin irrigation, flood irrigation); aspersione (center pivot, linear move, solid-set sprinkler, hand-move/wheel-line sprinkler); micro (drip irrigation, subsurface drip irrigation, micro-sprinkler/microjet).

3. Tessitura del suolo: grossolana (sand, loamy sand, sandy loam); media (loam, silty loam, silt, sandy clay loam); fine (clay, silty clay, clay loam, silty clay loam, sandy clay).

4. Zona climatica (Köppen-Geiger): tropicale (Af, Am, Aw); arido (BWh, BWk, BSh, BSk); temperato/continentale (Cfa, Csa, Cwa, Cfb, Dfa, Dwa, Dwb) (Beck *et al.*, 2018).

5. Evapotraspirazione potenziale (ET_0 , mm): bassa (< 1200); moderata (1200-1600); elevata (> 1600).

6. Indice di aridità (CGIAR, Consortium for Spatial Information): arido ($AI < 0,2$); semi-arido ($0,2 \leq AI \leq 0,5$); umido ($AI > 0,5$) (Zomer *et al.*, 2022).

Laddove i dati erano presentati in forma grafica, i valori numerici sono stati estratti tramite digitalizzazione utilizzando WebPlotDigitizer versione 5. Tutte le variabili sono state convertite in unità standard prima dell'analisi: GY in t ha^{-1} e WUE in kg m^{-3} .

L'effetto dei diversi moderatori su GY e WUE è stato calcolato come logaritmo del rapporto di risposta ($\ln RR$) tra la media del trattamento in deficit e del controllo:

$$\ln RR = \ln \left(\frac{X_{\text{deficit}}}{X_{\text{controllo}}} \right)$$

Le stime sono state successivamente riconvertite in variazioni percentuali per facilitarne l'interpretazione biologica:

$$\% \Delta = (e^{\ln RR} - 1) \times 100$$

La varianza associata a ciascuna dimensione dell'effetto è stata calcolata come:

$$v_i = \frac{SD_{\text{deficit}}^2}{n_{\text{deficit}} \times X_{\text{deficit}}^2} + \frac{SD_{\text{controllo}}^2}{n_{\text{controllo}} \times X_{\text{controllo}}^2}$$

Quando le deviazioni standard (SD) non erano presenti o ricavabili, queste sono state imputate utilizzando il coefficiente di variazione (CV) medio, calcolato separatamente per i gruppi di trattamento e di controllo.

Sono state condotte analisi di sensibilità per valutare la robustezza dei risultati relativi all'imputazione dei dati mancanti. Le analisi statistiche sono state condotte utilizzando il software R (versione 4.3.1; R Core Team, 2023) ed il pacchetto metafor.

Risultati e Discussione

La resa in granella diminuisce progressivamente con l'intensità del deficit irriguo (Fig. 1A), con riduzioni statisticamente significative per tutti i livelli analizzati. Rispetto a quanto osservato per la resa in granella, i diversi livelli di deficit hanno un effetto contrastante sulla WUE. Infatti, un deficit basso migliora la WUE del mais mediamente del 9,5%, mentre deficit moderati (+2,9%, IC 95%: -0,1; 6,1) e severi (+1,9%, IC 95%: -1,3; 5,3) non aumentano significativamente la WUE (Fig. 1B).

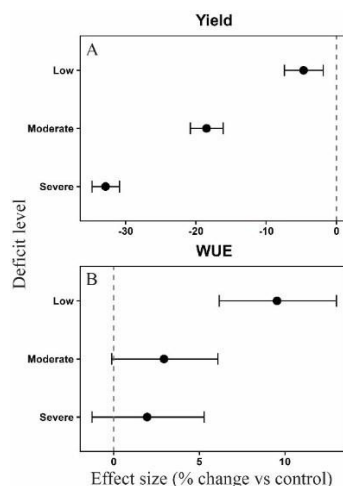


Fig. 1 – Effetto di tre livelli di irrigazione deficitaria su resa in granella (A) ed efficienza d'uso dell'acqua (B). La linea sullo 0 indica assenza di effetto rispetto al trattamento di controllo (irrigazione piena).

Fig. 1- Effect of three levels of water deficit on grain yield (A) and water use efficiency (B). The line at 0 indicates no effect compared with the control treatment (full irrigation).

Questi risultati suggeriscono che una DI con volumi non inferiori al 75% delle richieste consente di ridurre il consumo idrico migliorando la WUE con perdite di resa limitate. Risultati in linea con studi precedenti dove la DI ottimizzata ha permesso di mantenere rese elevate incrementando significativamente la produttività dell'acqua (Wang *et al.*, 2023). Al contrario, deficit severi con riduzioni del volume apportato di oltre il 45% rispetto all'irrigazione piena possono impattare fortemente sulla resa, con riduzioni superiori al 30%.

L'effetto dell'irrigazione deficitaria sulla resa del mais è risultato fortemente modulato dal sistema irriguo. Sotto

deficit basso, le perdite di resa sono risultate contenute nei sistemi microirrigui (-3,1%) e sprinkler (-1,3%), mentre sono risultate significativamente più elevate nei sistemi a irrigazione superficiale (-6,8%) (Fig. 2A). Questo suggerisce che, in condizioni di basso deficit idrico, i sistemi più efficienti nella distribuzione dell'acqua non comportano riduzioni significative di resa in granella nel mais. Anche con deficit moderato, le perdite maggiori sono state osservate nei sistemi superficiali (-21,2%) seppur con differenze ridotte rispetto ad un deficit basso. In condizioni di deficit moderato, il sistema irriguo, seppur mostrando differenze tra metodi più o meno efficienti, non è significativamente determinante per la resa. Sotto deficit severo, i sistemi microirrigui e quelli in pressione hanno mostrato le medesime performance, con perdite poco superiori al 31%, mentre nei sistemi superficiali la riduzione è risultata significativamente più elevata, raggiungendo circa il 38%. Risultati inaspettati sono stati ottenuti per la WUE nel mais con basso deficit, con gli incrementi significativamente superiori osservati per i sistemi sprinkler (+25,4%).

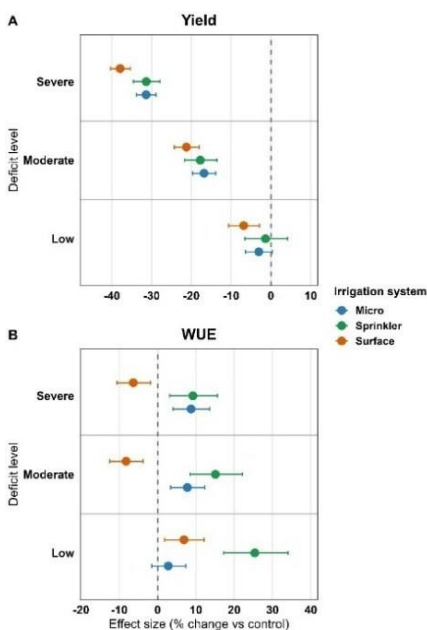


Fig. 2 – Effetto di tre livelli di irrigazione deficitaria e del sistema irriguo su resa (A) e WUE (B).

Fig. 2 - Effect of three deficit irrigation levels and irrigation systems on yield (A) and WUE (B).

La Figura 2B evidenzia come sotto deficit basso, i sistemi microirrigui non consentono un aumento significativo della WUE (+2,8%, IC 95%: -1,58; 7,32); mentre i sistemi superficiali hanno evidenziato aumenti significativi (+6,9%). A partire da deficit idrici moderati, il comportamento rispetto alla WUE si modifica sostanzialmente. Sotto deficit moderato, infatti, gli incrementi di WUE sono risultati pari a 7,8% nei sistemi microirrigui e 15,1% nei sistemi sprinkler, mentre nei sistemi superficiali si è osservata una riduzione significativa dell'8,2%. Sotto deficit severo, la WUE è aumentata nei sistemi microirrigui (+8,7%) e sprinkler (+9,2%) con prestazioni comparabili, mentre nei sistemi

superficiali è stata osservata una significativa riduzione del 6,4%. Nel complesso, questi risultati evidenziano che i sistemi microirrigui e sprinkler garantiscono una maggiore resilienza della resa rispetto all'irrigazione superficiale, in particolare sotto condizioni di deficit basso e severo. La letteratura afferma che lo stress idrico, a causa della chiusura stomatica, può aumentare la temperatura della pianta, accelerando la senescenza fogliare (Purushothaman *et al.*, 2015). L'elevata WUE dei sistemi sprinkler potrebbe quindi dipendere dall'effetto benefico di raffreddamento della parte epigea della pianta che limita le perdite di acqua per traspirazione.

Oltre ai quantitativi e ai metodi di distribuzione dell'acqua, anche il contesto pedo-climatico gioca un ruolo cruciale. Nello specifico, la tessitura del suolo ha influenzato in modo significativo la resa, con risultati distinti a seconda dei diversi livelli di deficit. In condizioni di deficit basso, il suolo non rappresenta un fattore determinante per la resa (Fig. 3A), sebbene le perdite inferiori siano state osservate nei suoli a tessitura fine (-4,4%). Sotto deficit moderato e severo, i suoli a medio impasto hanno tamponato significativamente le perdite di resa che sono state rispettivamente del 5,4% e 21,3%. Viceversa, nei suoli con spiccata presenza di argilla o sabbia le perdite sono risultate molto superiori, raggiungendo il 37,2% nei suoli grossolani. La capacità dei suoli a tessitura media di tamponare gli effetti del deficit idrico può essere spiegata dall'equilibrio tra capacità di ritenzione idrica e conducibilità idraulica. I suoli con alta componente di argilla possono limitare la disponibilità effettiva per le piante a causa di potenziali matriciali troppo negativi e fenomeni di asfissia radicale. Al contrario, i suoli composti in gran parte da sabbia presentano una bassa capacità di ritenzione idrica con l'acqua di irrigazione che diventa rapidamente indisponibile a causa della percolazione profonda. Inoltre, è stato dimostrato che nei suoli franchi il potenziale idrico a cui avviene la chiusura stomatica è molto più negativo rispetto ai suoli prevalentemente sabbiosi, permettendo alla pianta di continuare la traspirazione anche in condizioni di scarsa disponibilità idrica (Koehler *et al.*, 2022). La WUE, così come per la resa, è stata influenzata dalla classe di suolo con risposte eterogenee tra i diversi livelli di deficit irriguo (Fig. 3B). Sotto deficit basso, la WUE è aumentata significativamente del 5,3% nei suoli fini e del 12% nei suoli grossolani. Nei suoli franchi è stato invece osservato un aumento non significativo del 5,1%. La risposta cambia con deficit irriguo più intenso. In particolare, con deficit severo la WUE aumenta esclusivamente nei suoli a tessitura intermedia, registrando un +13,7%, mentre non ha mostrato variazioni significative nei suoli grossolani e fini. Anche per la WUE, soprattutto con forti limitazioni irrigue, i suoli franchi hanno offerto le migliori prestazioni. In aggiunta alle caratteristiche pedologiche, anche l'areale di coltivazione influenza l'efficacia della DI nel mais.

In particolare, con deficit basso la resa è diminuita dell'8,4% nelle regioni temperate/continentali e del 4,5% nelle regioni aride, mentre nelle regioni tropicali non c'è stata riduzione significativa (Fig. 4A).

Sotto deficit moderato, la tendenza cambia con le perdite di resa maggiori nelle aree aride (-20,2%), a seguire nelle

regioni aride (-19,8%) e temperate/continentali (-15,7%), senza differenziarsi in modo significativo.

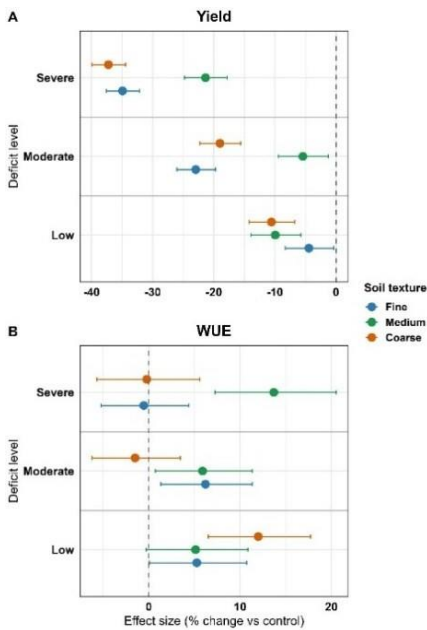


Fig. 3 – Effetto di tre livelli di irrigazione deficitaria e della tessitura del suolo su resa (A) e WUE (B).
Fig. 3 - Effect of three deficit irrigation levels and soil texture on yield (A) and WUE (B).

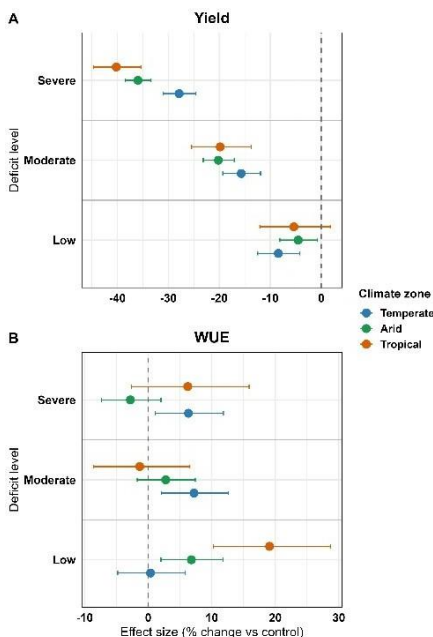


Fig. 4 – Effetto di tre livelli di irrigazione deficitaria e della zona climatica su resa (A) e WUE (B).
Fig. 4 - Effect of three deficit irrigation levels and climate zone on yield (A) and WUE (B).

Infine, il deficit severo ha significativamente penalizzato le rese nelle zone climatiche tropicali (-40,2%) e aride (-40%) rispetto a quelle temperate e continentali (-27,9%). Con deficit basso, la WUE è aumentata significativamente nelle

regioni tropicali (+19,1%) e aride (+6,8%), mentre non ha mostrato variazioni nelle regioni temperate (Fig. 4B). La risposta della WUE in condizione di deficit moderato è risultata opposta rispetto a deficit lievi con incrementi esclusivamente nelle regioni temperate (+7,2%). Sotto deficit severo, la WUE è diminuita nelle regioni aride (-2,8%), mentre è aumentata in modo significativo nelle regioni temperate/continentali (+6,3%) e con maggior variabilità in quelle tropicali (+6,2%).

La risposta della resa al deficit idrico è stata fortemente influenzata dalla domanda evapotraspirativa atmosferica (ET_0). L'applicazione di un deficit basso ha ridotto significativamente la resa in presenza di una domanda evaporativa moderata (-14%), mentre non sono state rilevate perdite significative in presenza di ET_0 bassa ed elevata (Fig. 5A). Sotto deficit moderato, la perdita di resa è stata proporzionale alla domanda evaporativa con perdite del 23,1%, del 16% e del 10,8% rispettivamente per alta, moderata e bassa ET_0 . In presenza di deficit severo, la resa è stata ridotta in modo sostanziale negli ambienti ad elevata ET_0 con perdite medie del 42,6%.

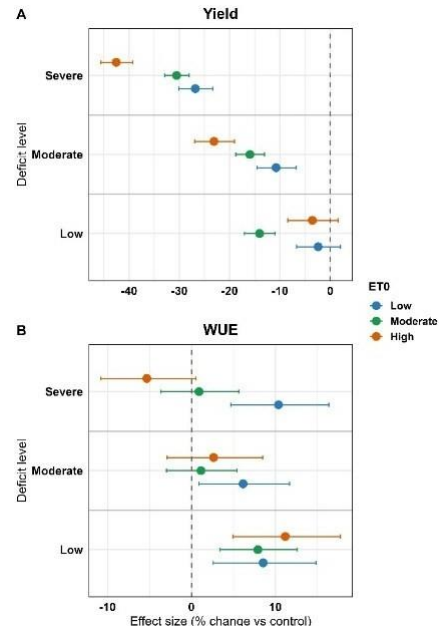


Fig. 5 – Effetto di tre livelli di irrigazione deficitaria e dell'evapotraspirazione potenziale su resa (A) e WUE (B).
Fig. 5 - Effect of three deficit irrigation levels and potential evapotranspiration on yield (A) and WUE (B).

Apportare volumi irrigui inferiori al 55% delle richieste irrigue del mais in ambienti con ET_0 annua di oltre 1600 mm, può quindi compromettere fortemente la produzione non rendendo sostenibile la coltivazione del mais. In condizioni di deficit idrico basso, la WUE è aumentata significativamente in tutte le classi di domanda evapotraspirativa (Fig. 5B). Con un deficit moderato, invece, la WUE è aumentata significativamente del 6,2% solo in presenza di ET_0 bassa. Questa differenza aumenta con deficit irriguo severo, con incrementi medi di WUE del 10,4% negli ambienti a bassa ET_0 . Non sono state osservate differenze

significative in presenza di ET_0 moderata (+0,9%) e seppur in modo non significativo, una tendenza alla diminuzione in ambienti ad alta ET_0 . Nel complesso, le risposte della WUE al deficit idrico sono state fortemente modulate dalla domanda evapotraspirativa, con aumenti consistenti in presenza di bassa ET_0 e risposte progressivamente più deboli o negative in condizioni di ET_0 più elevata.

La riduzione di resa più marcata con deficit basso è stata osservata negli ambienti con AI intermedio, ovvero semi-aridi (-12%), mentre negli ambienti più umidi non sono state osservate riduzioni significative di resa (Fig. 6A). In presenza di un deficit moderato, le perdite di resa sono state significative per tutti gli ambienti, seppur senza differenze sostanziali tra loro. Sotto deficit severo, le differenze tra ambienti aridi (-34,4%) e semi-aridi (-37,7%) rispetto a quelli umidi (-27,2%) sono state nette.

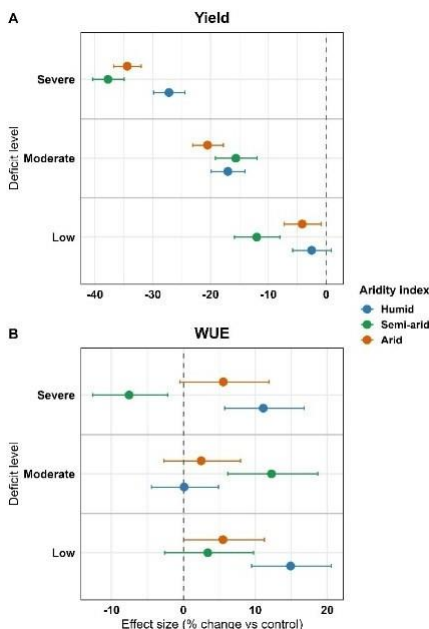


Fig. 6 – Effetto di tre livelli di irrigazione deficitaria e dell'indice di aridità su resa (A) e WUE (B).

Fig. 6 - Effect of three deficit irrigation levels and aridity index on yield (A) and WUE (B).

In generale le zone semi-aride hanno mostrato la sensibilità più elevata sia in condizioni di deficit basso che severo, mentre gli ambienti più umidi hanno mostrato costantemente le riduzioni di resa minori.

Il maggior incremento di WUE è stato osservato con deficit idrico basso (Fig. 6B) negli ambienti a basso indice di aridità (+14,9%), mentre aumenti contenuti sono stati osservati in quelli aridi (+5,5%).

Nelle aree semi-aride, un deficit contenuto non ha avuto effetto sulla WUE. Con deficit idrico severo, gli ambienti umidi hanno incrementato significativamente la WUE dell'11,1%, mentre è stata osservata una diminuzione significativa nei sistemi semi-aridi (-7,5%). Questi risultati confermano che l'efficacia della DI nel massimizzare la WUE aumenta al diminuire dell'aridità ambientale, rendendo i contesti temperati e continentali i più favorevoli per questa strategia.

Conclusioni

L'irrigazione deficitaria nel mais rappresenta uno strumento di resilienza climatica efficace solo se applicato in modo mirato. Un deficit basso (>75% ET_0) rappresenta l'opzione più affidabile per migliorare l'efficienza d'uso dell'acqua senza penalizzare la resa. L'efficacia della DI non è però universale, necessitando di sistemi irrigui efficienti, suoli franchi e ambienti a bassa ET_0 per tradursi in un reale aumento della WUE. Poiché i benefici svaniscono in contesti ad alta domanda evapotraspirativa o con deficit intensi, la DI deve essere adottata come parte di una gestione agronomica integrata e sito-specifica, essenziale per mantenere la stabilità produttiva in scenari di scarsità idrica.

Bibliografia

- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific data*, 5(1), 180214.
- Daryanto, S., Wang, L., & Jacinthe, P. A. (2016). Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. *PLoS one*, 11(5), e0156362.
- Koehler, T., Moser, D. S., Botezatu, Á., Murugesan, T., Kaliamoorthy, S., Zarebanadkouki, M., ... & Ahmed, M. (2022). Going underground: soil hydraulic properties impacting maize responsiveness to water deficit. *Plant and Soil*, 478(1), 43-58.
- Purushothaman, R., Thudi, M., Krishnamurthy, L., Upadhyaya, H. D., Kashiwagi, J., Gowda, C. L. L., & Varshney, R. K. (2015). Association of mid-reproductive stage canopy temperature depression with the molecular markers and grain yields of chickpea (*Cicer arietinum* L.) germplasm under terminal drought. *Field Crops Research*, 174, 1-11.
- Rezaei, E. E., Webber, H., Asseng, S., Boote, K., Durand, J. L., Ewert, F., ... & MacCarthy, D. S. (2023). Climate change impacts on crop yields. *nature reviews earth & environment*, 4(12), 831-846.
- Wang, F., Meng, H., Xie, R., Wang, K., Ming, B., Hou, P., ... & Li, S. (2023). Optimizing deficit irrigation and regulated deficit irrigation methods increases water productivity in maize. *Agricultural Water Management*, 280, 108205.

ET₀ ESTIMATION USING AI MODELS IN CLIMATICALLY HETEROGENEOUS AREAS UNDER LIMITED DATA CONDITIONS

STIMA DELL'ET₀ CON MODELLI DI AI IN AREE CLIMATICAMENTE ETEROGENEE E CONDIZIONI DI DATI LIMITATI.

Giorgia Raimondi^{1*}, Jacopo Bonato², Carmelo Maucieri³

¹ Department for the Promotion of Human Science and Quality of Life, San Raffaele Open University, Via di Val Cannuta, 247, 00166 Rome, Italy

² Data Science Group, Prometeia S.p.A

³ Department of Agronomy, Food, Natural Resources, Animals and Environment – DAFNAE, University of Padua, Agripolis Campus, Viale dell'Università 16, Legnaro, PD, Italy.

* giorgia.raimondi@uniroma5.it

Abstract

Reference evapotranspiration (ET₀) estimation is often limited by the high data requirements of the FAO-56 Penman–Monteith equation, making simpler methods such as Hargreaves common under data-limited conditions. This study assessed linear and non-linear AI models using daily data from 16 weather stations in climatically heterogeneous Veneto, Italy, from 1994 to 2022, testing full and reduced input sets and their spatial and temporal transferability.

SVR, XGBoost, and ANN performed best, with R² and NSE values near 0.96 and strong generalization across climatic areas. Temporal transferability caused only slight performance losses. Solar radiation and air temperature were the main predictors, while relative humidity and precipitation were less influential. Overall, the models matched or exceeded the Veneto-calibrated Hargreaves equation, even with minimal inputs, providing accurate and transferable ET₀ estimates under limited data availability.

Parole chiave

Evapotraspirazione di riferimento; Intelligenza Artificiale; SVR; modelli di ET₀ con minimi input; trasferibilità spazio-temporale

Keywords

Reference evapotranspiration; Artificial Intelligence; SVR; minimal input ET₀ modelling; Spatio-temporal transferability

Introduzione

L'evapotraspirazione di riferimento (ET₀) è un parametro fondamentale per la pianificazione irrigua, la valutazione del bilancio idrico, la modellizzazione colturale e il monitoraggio della siccità (Barrera et al., 2023; Elbeltagi et al., 2022, 2023; Salahudin et al., 2023). Sebbene l'equazione di Penman–Monteith riportata nel paper 56 della FAO rappresenti la modalità standard di calcolo, il suo impiego operativo è spesso limitato dalla necessità di disporre di dataset meteorologici completi e affidabili. Pertanto, metodi empirici semplificati, come l'equazione di Hargreaves, sono ampiamente utilizzati in condizioni di limitata disponibilità di dati meteo; tuttavia, la loro accuratezza è spesso dipendente dal clima e dal sito e richiede una calibrazione locale (Berti et al., 2014; Fang et al., 2024).

I modelli di machine learning (ML) rappresentano un'alternativa promettente, poiché consentono di stimare l'ET₀ utilizzando dataset di input ridotti e di descrivere relazioni non lineari tra variabili meteorologiche (Gocić and Arab Amiri, 2021; Kumar et al., 2024; Makwana et al., 2023; Reis et al., 2019). Tuttavia, le loro prestazioni, i requisiti minimi di input e la capacità di generalizzazione tra aree climatiche diverse rimangono ancora incerti (Raza et al., 2021a, 2021b). Questo aspetto è particolarmente rilevante in regioni climaticamente eterogenee come il Veneto, dove la presenza di lacune nei dati e la variabilità spaziale limitano la robustezza degli approcci convenzionali (Di Nunno et al., 2023).

Questo studio affronta tali criticità confrontando modelli lineari, tree-based, kernel-based e neural-network per la stima dell'ET₀, utilizzando dati meteorologici giornalieri di lungo periodo provenienti dal Veneto. Vengono valutate l'accuratezza dei modelli, la generalizzazione spaziale, la trasferibilità temporale, le prestazioni con configurazioni di input ridotte e il confronto con l'equazione di Hargreaves calibrata per il Veneto, in scenari caratterizzati da limitata disponibilità di dati.

Materiali e Metodi

La Regione Veneto è stata selezionata come area di studio per la sua eterogeneità morfologica e climatica, comprendente pianure, aree costiere, zone collinari, prealpine e alpine. Sono stati analizzati dati meteorologici giornalieri relativi a 16 stazioni ARPAV distribuite lungo i principali gradienti altitudinali e climatici regionali, per il periodo 1994–2022. Le variabili considerate includevano temperatura dell'aria, radiazione solare, precipitazione, umidità relativa ed ET₀, quest'ultima calcolata mediante equazione FAO-56 di Penman–Monteith e assunta come riferimento.

Il framework metodologico ha previsto un'analisi esplorativa delle relazioni tra predittori meteorologici ed ET₀ mediante Mutual Information, t-SNE, correlazioni di Spearman e Variance Inflation Factor. Successivamente, nove modelli di ML sono stati implementati per la stima di ET₀: regressioni lineari e regolarizzate, modelli ad albero ed

ensemble, SVR e reti neurali artificiali. La capacità di generalizzazione spaziale è stata valutata mediante validazione incrociata a cinque fold su stazioni indipendenti, mentre la trasferibilità temporale è stata testata addestrando i modelli sui dati fino al 2019 e validandoli sul periodo 2020–2022. Le prestazioni sono state inoltre analizzate in condizioni di ridotta disponibilità di input meteorologici e confrontate con l'equazione di Hargreaves calibrata per la regione in analisi (Berti et al., 2014). L'accuratezza predittiva è stata quantificata mediante metriche complementari di errore, accordo e robustezza statistica, tra cui R^2 , RMSE, MAE, KGE, d, NSE e sMAPE.

Risultati e Discussioni

I risultati confermano che la marcata eterogeneità geografica e climatica del Veneto costituisce un contesto adeguato per valutare la capacità di generalizzazione dei modelli di stima dell' ET_0 (Di Nunno et al., 2023). L'analisi t-SNE ha distinto in cluster associati al gradiente altitudinale: stazioni di pianura, stazioni a quota intermedia e siti montani. L'unica eccezione rilevante è stata Valeggio, che, pur trovandosi a quota intermedia, si è aggregata alle stazioni di bassa quota, verosimilmente per l'influenza microclimatica del Lago di Garda. La distribuzione delle 16 stazioni lungo gradienti altitudinali, latitudinali e longitudinali ha quindi consentito di includere condizioni microclimatiche contrastanti, rafforzando la robustezza della validazione spaziale (Mota et al., 2018).

L'analisi delle relazioni tra variabili meteorologiche ha mostrato forti correlazioni positive tra radiazione solare e temperatura, mentre la radiazione è risultata negativamente associata a precipitazione e umidità relativa. La Mutual Information ha confermato che tutte le variabili contribuiscono alla stima dell' ET_0 , indicando tuttavia la radiazione solare come predittore più informativo, seguita dalle variabili termiche. La precipitazione ha mostrato invece il contributo informativo più limitato. L'elevata multicollinearità tra T_{max} , T_{avg} e T_{min} è stata ridotta mediante la trasformazione di T_{max} e T_{min} in escursione termica giornaliera.

Nella validazione spaziale, i modelli non lineari e di ensemble hanno fornito le migliori prestazioni. SVR, XGBoost e ANN hanno raggiunto valori mediani di R^2 e NSE prossimi a 0,96, RMSE pari a circa 0,20–0,22 mm e MAE pari a 0,14–0,15 mm, indicando un'elevata capacità di riprodurre l' ET_0 calcolata con l'equazione FAO-56 Penman–Monteith in stazioni non utilizzate per l'addestramento. Anche KGE e index of agreement hanno confermato l'elevata robustezza predittiva, con valori rispettivamente pari a circa 0,93–0,94 e 0,99. Tali risultati confermano la maggiore capacità di questi approcci nel rappresentare le relazioni non lineari tra variabili meteorologiche ed ET_0 rispetto ai modelli lineari, che, pur mantenendo una capacità predittiva accettabile, hanno mostrato errori più elevati e maggiori limitazioni strutturali (Raza et al., 2023).

La scelta del modello risulta tuttavia dipendente dalla dimensione e dalla complessità del dataset. SVR appare particolarmente robusto in condizioni di dati limitati, mentre XGBoost e ANN risultano più adatti a contesti caratterizzati

da una più complessa interdipendenza tra le variabili meteorologiche di input e una maggiore disponibilità di dati (Wang et al. 2022; Chen and Guestrin, 2016; Goodfellow et al., 2016; LeCun et al., 2015). Nel presente studio, SVR, XGBoost e ANN hanno mostrato prestazioni comparabili e residui medi prossimi allo zero nelle diverse stazioni, suggerendo un'elevata stabilità spaziale e l'assenza di bias sistematici rilevanti.

La valutazione della trasferibilità temporale ha mostrato una lieve riduzione delle prestazioni rispetto alla validazione spaziale. Per SVR, ad esempio, R^2 e NSE sono diminuiti da circa 0,96 a 0,95, mentre RMSE e MAE sono aumentati moderatamente. Tuttavia, la correlazione e index of agreement sono rimasti elevati, indicando che SVR, XGBoost e ANN conservano una buona coerenza con l'equazione FAO-56 Penman–Monteith anche quando applicati a periodi non inclusi nell'addestramento. Questo risultato è particolarmente rilevante in ambito operativo, dove la disponibilità di serie meteorologiche complete e l'aggiornamento frequente dei modelli possono essere limitati (Brönnimann et al., 2019; Castellanos-Acuña and Hamann, 2020).

L'analisi con input ridotti ha confermato il ruolo dominante della radiazione solare e della temperatura nel controllo dell' ET_0 . La loro esclusione ha determinato il maggiore decremento prestazionale, con effetti particolarmente marcati sull'aumento di RMSE, MAE e sMAPE. Al contrario, la rimozione dell'umidità relativa ha prodotto effetti intermedi, mentre l'esclusione della precipitazione ha avuto l'impatto più contenuto. Tali risultati, coerenti per SVR, XGBoost e ANN, confermano il ruolo prevalente della radiazione solare e della temperatura nella stima dell' ET_0 (Elbeltagi et al., 2023; Ravindran et al., 2021). Anche in condizioni di ridotta disponibilità di dati meteorologici, i tre modelli hanno mantenuto prestazioni robuste, suggerendo la loro applicabilità in contesti osservativi incompleti.

Il confronto con l'equazione di Hargreaves calibrata per il Veneto ha evidenziato la superiore flessibilità dei modelli di ML. Nella configurazione completa, SVR ha raggiunto R^2 pari a 0,96, RMSE di 0,21 mm e MAE di 0,14 mm, rispetto a R^2 pari a 0,91, RMSE di 0,51 mm e MAE di 0,38 mm per Hargreaves. Anche sostituendo la radiazione solare misurata con la radiazione extraterrestre calcolata, i modelli di ML hanno mantenuto prestazioni elevate e superiori a Hargreaves. Nella configurazione minima basata su temperatura e radiazione extraterrestre, le prestazioni si sono ridotte, ma i modelli di ML hanno continuato a fornire errori inferiori e metriche di efficienza comparabili o migliori rispetto all'equazione di Hargreaves. Ciò suggerisce il loro potenziale impiego come strumenti alternativi per la stima operativa dell' ET_0 in condizioni di limitata disponibilità di dati meteo, soprattutto dove le misure di radiazione solare sono spesso assenti o non affidabili (Nsabagwa et al., 2019; Liu et al., 2025).

Tra i principali limiti dello studio si riconoscono la scala regionale dell'analisi, l'assenza sistematica di alcune variabili meteorologiche rilevanti, in particolare la velocità del vento, e l'uso dell' ET_0 calcolata con l'equazione FAO-56 Penman–Monteith come riferimento anziché misure

dirette di campo. Future ricerche dovrebbero quindi estendere la validazione a contesti climatici più ampi, includere misure sperimentali dirette, quali lisimetri o sistemi di eddy-covariance, e valutare architetture deep learning capaci di integrare esplicitamente la dimensione temporale delle serie meteorologiche.

Conclusioni

Lo studio dimostra che, nella Regione Veneto, i modelli SVR, XGBoost e ANN rappresentano strumenti affidabili per la stima dell'ET₀ in contesti spazialmente e climaticamente eterogenei. Tali modelli hanno mostrato un'elevata capacità di generalizzazione spaziale su stazioni non utilizzate in fase di addestramento, con prestazioni superiori rispetto ai modelli lineari e con errori contenuti rispetto all'ET₀ calcolata mediante l'equazione FAO-56 Penman-Monteith.

La trasferibilità temporale ha confermato la robustezza dei modelli, che hanno mantenuto un buon accordo con l'equazione di riferimento (FAO-56 Penman-Monteith) anche quando applicati ad anni non inclusi nell'addestramento, sebbene con una moderata riduzione delle prestazioni. In condizioni di input meteorologici ridotti, SVR, XGBoost e ANN hanno conservato una buona accuratezza, evidenziando la radiazione solare e la temperatura dell'aria come principali predittori dell'ET₀, mentre umidità relativa e precipitazione hanno mostrato un ruolo secondario.

Il confronto con l'equazione di Hargreaves calibrata per il Veneto ha evidenziato che i modelli di ML forniscono prestazioni comparabili o superiori in tutti gli scenari analizzati, inclusi quelli basati sulla sostituzione della radiazione solare misurata con la radiazione extraterrestre calcolata e sulla configurazione minima temperatura-radiazione extraterrestre. Nel complesso, i risultati indicano che SVR, XGBoost e ANN possono costituire un'alternativa robusta e operativamente applicabile per la stima dell'ET₀ in aree caratterizzate da eterogeneità climatica e disponibilità meteorologica parziale.

Ringraziamenti

Lo studio è stato svolto nell'ambito del Centro Nazionale AgriTech e finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU, Missione 4, Componente 2, CUP C93C22002790001. Le attività rientrano nello Spoke 4, WP 4.2, Task 4.2.1, relativo alla rete di aziende agricole Living Labs, e nel WP 4.3, Task 4.3.3, dedicato alle strategie e politiche di gestione del rischio nel contesto del cambiamento climatico.

Bibliografia

Barrera, W., Ferrise, R., & Dalla Marta, A. (2023). Understanding trends and gaps in global research of crop evapotranspiration: a bibliometric and thematic review. *Ital. J. Agrometeorol.*, 1, 13-35. <https://doi.org/10.36253/ijam-2239>

Berti, A., Tardivo, G., Chiaudani, A., Rech, F., & Borin, M. (2014). Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. *Agric.*

Water Manag., 140, 20-25. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.03.015>

Brönnimann, S., Martius, O., Rohr, C., Bresch, D. N., & Lin, K. H. E. (2019). Historical weather data for climate risk assessment. *N. Y. Acad. Sci.*, 1436(1), 121-137. <https://doi.org/10.1111/nyas.13966>

Castellanos-Acuna, D., & Hamann, A. (2020). A cross-checked global monthly weather station database for precipitation covering the period 1901–2010. *Geosci. Data J.*, 7(1), 27-37. <https://doi.org/10.1002/gdj3.88>

Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16)*, pp. 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.

De Boor, C. (1978). *A practical guide to splines* (Vol. 27, p. 325). New York: springer-verlag.

Di Nunno, F., De Matteo, M., Izzo, G., & Granata, F. (2023). A combined clustering and trends analysis approach for characterizing reference evapotranspiration in Veneto. *Sustainability*, 15(14), 11091. <https://doi.org/10.3390/su151411091>

Elbeltagi, A., Raza, A., Hu, Y., Al-Ansari, N., Kushwaha, N. L., Srivastava, A., Zubair, M. (2022). Data intelligence and hybrid metaheuristic algorithms-based estimation of reference evapotranspiration. *Applied Water Science*, 12(7), 152. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01667-7>

Elbeltagi, A., Srivastava, A., Al-Saedi, A. H., Raza, A., Abd-Elaty, I., & El-Rawy, M. (2023). Forecasting long-series daily reference evapotranspiration based on best subset regression and machine learning in Egypt Water, 15(6), 1149. <https://doi.org/10.3390/w15061149>

Fang, S. L., Lin, Y. S., Chang, S. C., Chang, Y. L., Tsai, B. Y., & Kuo, B. J. (2024). Using artificial intelligence algorithms to estimate and short-term forecast the daily reference evapotranspiration with limited meteorological variables. *Agriculture*, 14(4), 510. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040510>

Gocić, M., & Arab Amiri, M. (2021). Reference evapotranspiration prediction using neural networks and optimum time lags. *IWRM*, 35(6), 1913-1926. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02820-8>

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep feedforward networks. *Deep Learning*, 1, 161-217.

Kumar, S., Sharda, R., Goyal, P., Siag, M., & Kaur, P. (2024). Reference evapotranspiration modelling using artificial neural networks under scenarios of limited weather data: A case study in the Malwa Region of Punjab. *Environmental Modeling & Assessment*, 29(3), 589-620. <https://doi.org/10.1007/s10666-023-09930-0>

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>

Liu, J., Zhou, G., Du, J., Li, M., Song, Y., Chen, S., & Ji, Y. (2025). Common calibration of solar radiation and net longwave radiation is the key to accurately estimating reference crop evapotranspiration over the Tibetan Plateau. *Applied Sciences*, 15(23), 12449. <https://doi.org/10.3390/app152312449>

- Makwana, J. J., Tiwari, M. K., & Deora, B. S. (2023). Development and comparison of artificial intelligence models for estimating daily reference evapotranspiration from limited input variables. *Smart Agr. Technol.*, 3, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100115>
- Mota, G. S., Luz, G. R., Mota, N. M., Coutinho, E. S., Veloso, M. D. D. M., Fernandes, G. W., & Nunes, Y. R. F. (2018). Changes in species composition, vegetation structure, and life forms along an altitudinal gradient of rupestrian grasslands in south-eastern Brazil. *Flora*, 238, 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.03.010>
- Nsabagwa, M., Byamukama, M., Kondela, E., & Otim, J. S. (2019). Towards a robust and affordable Automatic Weather Station. *Dev. Eng.*, 4, 100040. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2018.100040>
- Ravindran, S. M., Bhaskaran, S. K. M., & Ambat, S. K. N. (2021). A deep neural network architecture to model reference evapotranspiration using a single input meteorological parameter. *Environmental Processes*, 8(4), 1567-1599. <https://doi.org/10.1007/s40710-021-00543-x>
- Raza, A., Hu, Y., Shoaib, M., Abd Elnabi, M. K., Zubair, M., Nauman, M., & Syed, N. R. (2021a). A systematic review on estimation of reference evapotranspiration under PRISMA guidelines. *Pol. J. Environ. Stud.*, 30, 5413-5422. <https://doi.org/10.15244/pjoes/136348>
- Raza, A., Shoaib, M., Baig, M. A. I., Ahmad, S., Khan, M. M., Ullah, M. K., & Hashim, S. (2021b). Comparative study of powerful predictive modeling techniques for modeling monthly reference evapotranspiration in various climatic regions. *Fresenius Environ. Bull.*, 30, 7490-7513.
- Raza, A., Saber, K., Hu, Y., L. Ray, R., Ziya Kaya, Y., Dehghanisani, H., ... & Elbeltagi, A. (2023). Modelling reference evapotranspiration using principal component analysis and machine learning methods under different climatic environments. *Irrigation and Drainage*, 72(4), 945-970. <https://doi.org/10.1002/ird.2838>
- Reis, M. M., da Silva, A. J., Junior, J. Z., Santos, L. D. T., Azevedo, A. M., & Lopes, É. M. G. (2019). Empirical and learning machine approaches to estimating reference evapotranspiration based on temperature data. *Comput. Electron. Agric.*, 165, 104937. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104937>
- Salahudin, H., Shoaib, M., Albano, R., Inam Baig, M. A., Hammad, M., Raza, A., & Ali, M. U. (2023). Using ensembles of machine learning techniques to predict reference evapotranspiration (ET_o) using limited meteorological data. *Hydrology*, 10(8), 169. <https://doi.org/10.3390/hydrology10080169>
- Wang, J., Raza, A., Hu, Y., Buttar, N. A., Shoaib, M., Saber, K., ... & Ray, R. L. (2022). Development of monthly reference evapotranspiration machine learning models and mapping of Pakistan. A comparative study. *Water*, 14(10), 1666. <https://doi.org/10.3390/w14101666>
- Akima, H. (1970). A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the ACM (JACM)*, 17(4), 589-602.

PREDICTION OF FUTURE CLIMATE SCENARIOS FOR THE SUSTAINABLE MANAGEMENT OF WATER RESOURCES IN THE BRADANO BASIN AS A CLIMATE CHANGE ADAPTATION MEASURE

PREVISIONE DI SCENARI CLIMATICI FUTURI PER LA GESTIONE SOSTENIBILE DELLE RISORSE IDRICHE NEL BACINO DEL BRADANO COME MISURA DI ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Silvano Fortunato Dal Sasso^{1*}, Htay Htay Aung¹, Teresa Pizzolla¹, Emanuele Scalcione², Pietro Dichio², Bartolomeo Dichio³

¹ Dipartimento per l'Innovazione Umanistica, Scientifica e Sociale (DIUSS), Università della Basilicata, via Lanera 20, 75100 Matera (MT)

² ALSIA, Agenzia Lucana di Sviluppo e Innovazione in Agricoltura, via Annunziata 64, 75100 Matera (MT)

³ Dipartimento di Scienze Agrarie, Forestali, Alimentari e Ambientali (DAFE), Università degli Studi della Basilicata, Via dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza, Italia

*silvano.dalsasso@unibas.it

Abstract

The sustainable management of water resources requires a detailed understanding of the water balance under both current conditions and climate change scenarios. Reconstructing the water balance relies on the analysis of meteorological data, climate model projections, the hydromorphological features of the basin, and the assessment of water demand.

This study reconstructs future climate scenarios for the Bradano basin to improve hydrological modeling in line with IPCC recommendations. Using the CHELSA v2.1 dataset, nine Global Climate Models (GCMs) from CMIP6 were evaluated using statistical indices (Taylor diagram and weighted ranking). Four models (CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0 and HadGEM3-GC31-LL) were selected to drive the HYGRID-M hydrological model. Projections for the period 2025–2050 were used to simulate the water balance components at a spatial resolution of 1 km and on a monthly time scale.

The results indicate a warmer future climate, with a tendency toward drier summer conditions and increased interannual variability in hydrological components, highlighting the need for adaptive water management strategies.

Parole chiave

Cambiamento climatico, bilancio idrologico, stress idrico, scenari climatici futuri

Keywords

Climate change, hydrological balance, water stress, future climate scenarios

Introduzione

Il cambiamento climatico è una delle sfide più urgenti del XXI secolo. I suoi impatti incidono in modo significativo su ambiente, agricoltura, risorse idriche ed economia globale. Le variazioni nei regimi di temperatura e precipitazione stanno generando criticità rilevanti per una gestione efficace delle risorse idriche (Ghafari and Parvishi, 2025). I Modelli Climatici Globali (GCM) del Coupled Model Intercomparison Project Fase 6 (CMIP6) costituiscono lo strumento principale per generare scenari climatici futuri coerenti con le linee guida dell'IPCC. Tuttavia, la loro risoluzione spaziale originaria (tipicamente 100–200 km) risulta inadeguata per applicazioni idrologiche a scala di bacino, dove la topografia complessa e i gradienti orografici giocano un ruolo determinante. Per colmare questo divario, è essenziale ricorrere a tecniche di downscaling ad alta risoluzione.

In questo studio si utilizza il dataset CHELSA v2.1 (Karger et al., 2021, 2023), che fornisce campi di temperatura e precipitazione a risoluzione di 30 arc-secondi (circa 1 km) derivati dai GCM CMIP6. Dataset ad alta risoluzione come CHELSA v2.1 sono stati recentemente utilizzati con successo come riferimento per studi bioclimatici e di

downscaling in Italia meridionale e nel Mediterraneo (Keserci, 2026; Pellicone & Caloiero, 2025; Ferreiro-Lera et al., 2025), confermando la loro affidabilità in contesti orograficamente complessi come quelli del Mediterraneo.

L'obiettivo principale del lavoro è valutare l'impatto del cambiamento climatico sulle componenti del bilancio idrologico del bacino del Bradano nel periodo 2025–2050. A tal fine: (i) si è effettuata una selezione oggettiva di nove GCM CMIP6 mediante diagrammi di Taylor e un approccio di ranking pesato multi-metrica; (ii) sono stati scelti i quattro modelli più performanti (CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0 e HadGEM3-GC31-LL); (iii) si sono generate proiezioni climatiche sotto tre Shared Socioeconomic Pathways (SSP1-2.6, SSP3-7.0, SSP5-8.5); (iv) si è applicato il modello idrologico distribuito HYGRID-M (Aung et al., 2026) a risoluzione di 1 km e scala mensile per simulare precipitazione, evapotraspirazione reale, deflusso e deficit idrico. I risultati forniscono indicazioni operative per l'adattamento della gestione dell'invaso di San Giuliano e delle risorse idriche del distretto irriguo.

Materiali e Metodi

Area di studio

L'area di studio è rappresentata dal bacino idrografico del Bradano a monte dell'invaso di San Giuliano, situato nell'Italia meridionale ($40^{\circ}36'50''$ N, $16^{\circ}30'06''$ E), a pochi chilometri a sud della città di Matera (Figura 1). L'invaso, realizzato negli anni Sessanta lungo il fiume Bradano a scopo irriguo, fornisce attualmente risorsa idrica a un'area agricola di oltre 200 km².

Il bacino del San Giuliano presenta un'estensione di circa 1627 km², con un'altitudine variabile tra 96 e 1125 m s.l.m. Dal punto di vista climatico, il bacino è caratterizzato da condizioni tipicamente mediterranee, con precipitazioni concentrate nei mesi autunnali e invernali ed estati calde e secche. Questa marcata stagionalità, unita all'elevata variabilità interannuale delle precipitazioni, determina una forte vulnerabilità a condizioni di stress idrico.

L'uso del suolo è prevalentemente agricolo, con una significativa presenza di colture erbacee e arboree, mentre le aree urbanizzate risultano marginali. Dal punto di vista idrologico, il bacino mostra caratteristiche tipiche dei sistemi semi-aridi, con una limitata generazione di deflusso e una forte incidenza dei processi evaporativi nel bilancio idrico.

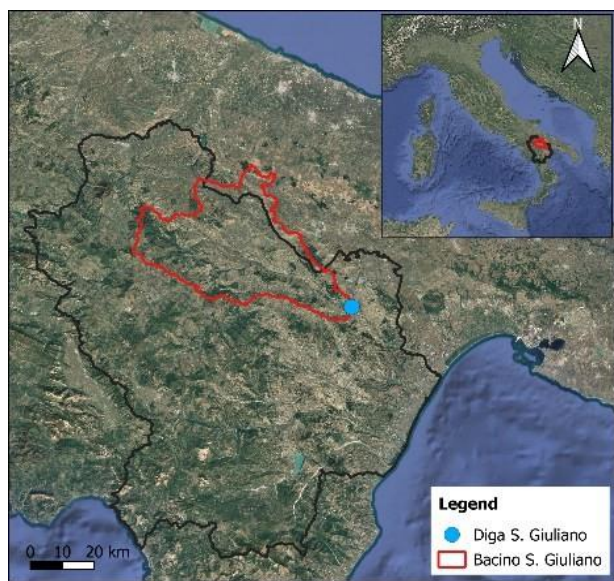


Fig. 1 - Localizzazione del bacino del fiume Bradano a monte dell'invaso di San Giuliano.

Fig. 1 - Location of the Bradano river basin upstream of the San Giuliano reservoir.

Dati CHELSA e scenari climatici

I dati utilizzati derivano da CHELSA v2.1 (Karger et al., 2021), che fornisce output downscalati di temperatura e precipitazione con risoluzione orizzontale di 30 arc-seconds (circa 1 km). L'algoritmo per la temperatura si basa sul downscaling statistico dei campi di temperatura atmosferica, mentre l'algoritmo per la precipitazione integra predittori orografici, tra cui i campi di vento, l'esposizione delle valli e l'altezza dello strato limite atmosferico, seguiti da una procedura di correzione del bias (Karger et al., 2017,

2023). I dati climatici CMIP6, sia storici sia di scenario, downscalati tramite CHELSA sono utilizzati per la selezione dei GCM secondo il metodo della past performance e per la valutazione degli impatti climatici futuri sulle componenti del bilancio idrico.

Lo studio considera tre scenari SSP (Shared Socioeconomic Pathways), descritti come segue:

- SSP1-2.6 rappresenta lo scenario a basse emissioni, con un riscaldamento globale inferiore a 2 °C entro il 2100.
- SSP3 -7.0 rappresenta uno scenario intermedio-alto, con livelli di forcing radiativo elevati con un riscaldamento globale di 4,5-5 °C entro il 2100.
- SSP5-8.5 rappresenta lo scenario ad alte emissioni, con un forcing radiativo pari a circa 8.5 W m⁻² entro il 2100.

Considerato l'elevato numero di Global Climate Models (GCM) disponibili, l'individuazione dei modelli più idonei per analisi a scala di bacino o regionale rappresenta un passaggio fondamentale. In questo studio sono stati selezionati nove GCM CMIP6 sulla base di applicazioni precedenti e di valutazioni prestazionali riferite all'Europa e all'area del Mediterraneo (Masson and Knutti, 2011; Dubrovsky et al., 2015; Palmer et al., 2023). I dati climatici ad alta risoluzione derivati da CHELSA nello scenario storico sono stati validati utilizzando come riferimento i dati meteorologici osservati raccolti dalle reti del Centro Funzionale della Protezione Civile (CFD) e di ALSIA, comprendenti stazioni pluviometriche e termometriche distribuite sul bacino del Bradano. I dati osservati sono stati spazializzati mediante il metodo dei poligoni di Thiessen per consentire un confronto coerente e verificare l'affidabilità dei dati CHELSA per le successive applicazioni idrologiche.

Prestazioni nel periodo storico

Nell'approccio della past performance, i Global Climate Models (GCM) vengono selezionati in funzione della loro capacità di riprodurre le condizioni climatiche storiche. L'assunzione è che i modelli più accurati nella simulazione del clima passato possano fornire proiezioni future più affidabili. In questo contesto, le variabili climatiche simulate negli esperimenti storici vengono confrontate con i dati osservati per valutare la capacità dei modelli di rappresentare le condizioni climatiche reali.

La selezione dei GCM si articola in due fasi principali: (i) valutazione e (ii) ranking. Nella prima fase, la valutazione delle prestazioni viene condotta tramite il diagramma di Taylor, che fornisce una rappresentazione sintetica di tre metriche statistiche: coefficiente di correlazione di Pearson (R), la deviazione standard (SD) e la radice dell'errore quadratico medio (RMSE). Questo approccio consente una valutazione integrata delle prestazioni dei diversi modelli. Nella seconda fase viene applicato un approccio di ranking pesato per classificare i GCM. A tal fine vengono considerati diversi indicatori statistici di performance, tra cui: errore assoluto medio (MAE), RMSE, bias percentuale (PBIAS), rapporto tra deviazioni standard (rSD), efficienza di Nash–Sutcliffe (NSE), indice di accordo (d), coefficiente di persistenza (cp), coefficiente di correlazione (CC), coefficiente di determinazione (R²) ed efficienza di Kling–Gupta (KGE). I valori di ciascun indicatore sono

normalizzati nell'intervallo 0–1 e successivamente aggregati per ottenere un punteggio complessivo per ciascun modello.

Modello idrologico HYGRID-M

Il modello HYGRID-M è stato sviluppato alla scala del Distretto Idrografico (RBD), con risoluzione spaziale di 1 km e temporale mensile, implementando l'approccio del modello BIGBANG (Braca and Ducci, 2018) in combinazione con il modello di bilancio idrico mensile di Thornthwaite (McCabe and Markstrom, 2007; Thornthwaite, 1948).

Sviluppato in ambiente Python, il modello è progettato per simulare i principali processi idrologici, tra cui la fusione nivale, l'evapotraspirazione reale (AET), il deflusso (Q), il surplus (S) e il deficit idrico (DF) alla scala della singola cella di griglia, integrando dati climatici quali precipitazione, temperatura dell'aria e caratteristiche di umidità del suolo. L'equazione di governo del modello è basata sul bilancio di massa, espresso per il mese i -esimo come segue:

$$P_i - AET_i - Q_i = \Delta ST_i$$

dove P_i rappresenta la precipitazione totale, AET_i è l'evapotraspirazione reale, Q_i è il deflusso superficiale, ΔST_i è la variazione della riserva idrica nel suolo.

Il modello considera esplicitamente l'eterogeneità spaziale della capacità di immagazzinamento dell'umidità del suolo e le variazioni temporali dell'uso del suolo. L'evapotraspirazione è stimata mediante l'equazione di Hargreaves (HE), utilizzando un coefficiente calibrato a livello regionale per l'Italia meridionale, al fine di calcolare l'evapotraspirazione di riferimento ETo (Mendicino and Senatore, 2013).

Risultati e Discussione

Selezione dei GCM

Le variabili climatiche osservate nel bacino del Bradano, in particolare precipitazione e temperatura media, sono stati confrontati con i corrispondenti dati simulati dai GCM, al fine di valutare le prestazioni mediante il diagramma di Taylor e un approccio di ranking pesato.

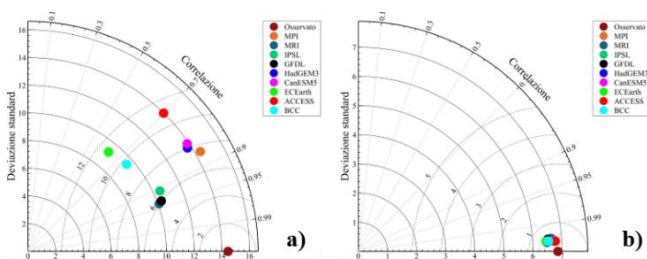


Fig. 2 - Diagrammi di Taylor che mostrano le prestazioni di nove GCM rispetto ai dati osservati: (a) precipitazione e (b) temperatura media.

Fig. 2 - Taylor diagrams showing the performance of nine GCMs compared with observed data: (a) precipitation and (b) mean temperature.

I diagrammi di Taylor relativi a entrambe le variabili (Figura 2a, b) evidenziano la capacità dei diversi modelli di riprodurre i pattern osservati di precipitazione e di temperatura media. In particolare, i modelli MRI-ESM2-0, GFDL-ESM4 e IPSL-CM6A-LR risultano più prossimi ai valori osservati per la precipitazione, mentre per la temperatura media tutti i GCM mostrano prestazioni complessivamente soddisfacenti. Sulla base dei risultati ottenuti con l'approccio di ranking, quattro modelli GCM - CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0 e HadGEM3-GC31-LL - sono stati selezionati per le successive simulazioni finalizzate alla valutazione della disponibilità idrica futura (Figura 3).

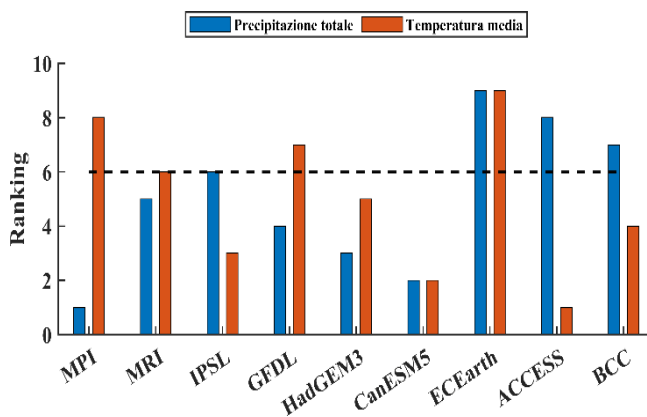


Fig. 3 - Punteggi normalizzati del ranking pesato per i nove GCM CMIP6 considerati.

Fig. 3 - Normalized weighted ranking scores for the nine CMIP6 GCMs considered.

Dati climatici

La Figura 4 mostra i cicli stagionali di precipitazione e temperatura nel periodo 2025–2050, combinando i dati osservati (2000–2014) con le proiezioni future (2025–2050) derivate dal modello CanESM5 nello scenario SSP5-8.5. La precipitazione media mensile (Figura 4a) evidenzia una marcata stagionalità, con valori più elevati nei mesi autunnali e invernali (novembre–febbraio) e condizioni più secche durante l'estate (giugno–agosto). Nel periodo futuro si osserva una sostanziale conferma del ciclo stagionale, accompagnata da una maggiore variabilità interannuale e da una tendenza verso condizioni più secche nei mesi estivi, con episodi isolati di precipitazioni intense.

La temperatura media mensile (Figura 4b) mostra un ciclo stagionale ben definito, con minimi in inverno e massimi in estate. Rispetto al periodo osservato, le proiezioni indicano un aumento sistematico delle temperature in tutti i mesi, con un riscaldamento più marcato durante la stagione estiva. Tale andamento evidenzia una chiara tendenza al riscaldamento, pur mantenendo invariata la struttura stagionale.

Componenti del bilancio idrologico

Il modello HYGRID-M è stato applicato per simulare le componenti del bilancio idrologico nel periodo 2025–2050 utilizzando i dati climatici dei GCM selezionati (CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0 e HadGEM3-GC31-LL) nei tre scenari SSP1-2.6, SSP3-7.0 e SSP5-8.5. Il modello è stato

preventivamente calibrato mediante confronto tra portate osservate e simulate, individuando un valore ottimale del coefficiente di deflusso pari a $\beta = 0,5$.

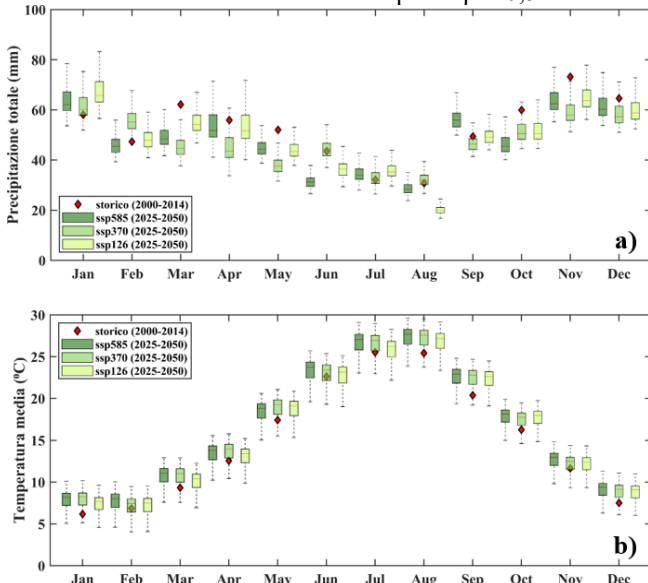


Fig. 4 - Cicli stagionali di (a) precipitazione totale e (b) temperatura media per il periodo 2025–2050.

Fig. 4 - Seasonal cycles of (a) total precipitation and (b) mean temperature for the period 2025–2050.

Le simulazioni mostrano che la precipitazione (P) è caratterizzata da una marcata variabilità interannuale in tutti gli scenari, con una tendenza a una maggiore dispersione nei casi a più alte emissioni. L'evapotraspirazione reale (AET) risulta fortemente correlata alla disponibilità idrica, evidenziando un comportamento coerente con l'andamento della precipitazione. Il deflusso (Q), invece, rappresenta una componente relativamente limitata del bilancio idrologico, con incrementi episodici associati agli anni più piovosi. La Figura 5 mostra le componenti del bilancio idrologico simulate dal modello CanESM5, utilizzato come modello rappresentativo per descrivere il comportamento generale osservato nei GCM selezionati.

Nel complesso, gli scenari SSP3-7.0 e SSP5-8.5 mostrano una maggiore variabilità delle componenti del bilancio idrologico rispetto allo scenario SSP1-2.6, senza tuttavia evidenziare incrementi sistematici del deflusso. Questo comportamento conferma la natura del bacino del Bradano, caratterizzato da condizioni prossime a quelle dei sistemi semi-aridi, in cui i processi evaporativi dominano il bilancio idrico.

L'analisi spaziale delle componenti del bilancio idrologico evidenzia una marcata eterogeneità all'interno del bacino. Il deflusso (Q) assume valori generalmente bassi su gran parte dell'area, mentre valori relativamente più elevati si riscontrano in aree limitate e in condizioni idro-climatiche più favorevoli. L'evapotraspirazione (AET), al contrario, presenta valori più elevati nelle porzioni occidentali e sud-occidentali del bacino e valori inferiori nelle aree centrali e orientali.

Le proiezioni future indicano anomalie prevalentemente negative del deflusso in tutti gli scenari, con maggiore

intensità nelle condizioni di emissioni elevate. Anche l'AET mostra una tendenza generale alla riduzione, sebbene con variazioni tra i modelli. Nel complesso, emerge un segnale coerente di diminuzione della disponibilità idrica futura, associato a un aumento della variabilità climatica e della domanda evaporativa.

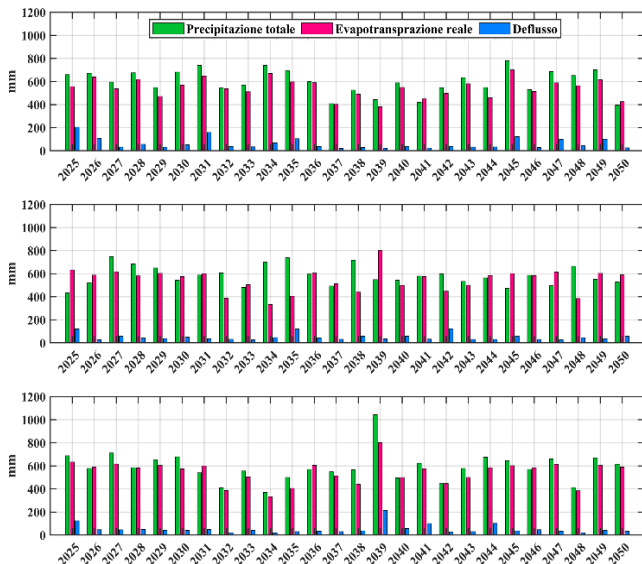


Fig. 5 - Componenti annuali del bilancio idrologico simulate con il modello HYGRID-M per il periodo 2025–2050 nei tre scenari futuri basati sul modello CanESM5.

Fig. 5 - Annual water balance components simulated by the HYGRID-M model for the period 2025–2050 under three future scenarios based on CanESM5.

Conclusioni

La disponibilità idrica futura nel bacino del Bradano è stata valutata mediante il modello HYGRID-M, alimentato da dati climatici CMIP6 derivati da CHELSA. La valutazione preliminare delle prestazioni dei GCM, effettuata mediante diagrammi di Taylor e ranking pesato, ha evidenziato una buona capacità dei modelli di riprodurre i dati osservati, con coefficienti di correlazione elevati, pur in presenza di alcune differenze nella variabilità. Tale analisi ha consentito la selezione di quattro GCM (CanESM5, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0 e HadGEM3-GC31-LL) per le simulazioni future.

I risultati evidenziano una marcata variabilità delle componenti del bilancio idrologico, con una risposta dominata da precipitazione ed evapotraspirazione e un contributo limitato del deflusso. Gli scenari a maggiori emissioni mostrano una riduzione del deflusso e un aumento della variabilità, indicando una diminuzione della disponibilità idrica futura.

I risultati mostrano un segnale coerente di incremento dello stress idrologico nel bacino, che sottolinea la necessità di strategie di gestione adattiva delle risorse idriche.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato supportato dal progetto “Ecosistema TECH4YOU – Technologies for climate change adaptation and quality of life improvement—Missione 4 Componente 2

Bibliografia

- Aung, H. H., Sileo, B., Fiorentino, M., Dal Sasso, S. F., 2026. A Grid-Based Hydrological Balance Model for Water Management at River Basin District Scale. Catena, in press.
- Braca, G. and D. Ducci, 2018. Development of a GIS based procedure (BIGBANG 1.0) for evaluating groundwater balances at national scale and comparison with groundwater resources evaluation at local scale. In Groundwater and Global Change in the Western Mediterranean Area, pp. 53–61. Springer.
- Dubrovsky, M., M. Trnka, I. P. Holman, E. Svobodova, and P. A. Harrison, 2015. Developing a reduced-form ensemble of climate change scenarios for Europe and its application to selected impact indicators. Climatic Change 128 (3), 169–186.
- Ghafari, L. and A. Parvishi, 2025. Climate projection and drought assessment in the lake Urmia basin using LSTM-based downscaling of GCM models under SSP scenarios. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 104134.
- Karger, D. N., Y. Chauvier, and N. E. Zimmermann, 2023. chelsa-cmip6 1.0: a python package to create high resolution bioclimatic variables based on CHELSA ver. 2.1 and CMIP6 data. Ecography, 2023 (6): e06535.
- Karger, D. N., O. Conrad, J. Böhner, T. Kawohl, H. Kreft, R. W. Soria-Auza, N. E. Zimmermann, H. P. Linder, and M. Kessler, 2017. Climatologies at high resolution for the earth’s land surface areas. Scientific data 4 (1), 1–20.
- Karger, D. N., S. Lange, C. Hari, C. P. Reyer, and N. E. Zimmermann, 2021. CHELSA-W5E5 v1.0: W5E5 v1.0 downscaled with CHELSA v2.0.
- Keserci, F., 2026. Comparative Performance of Global Datasets and Ground-Based Precipitation and Temperature Products in the Eastern Mediterranean Basin: The Case of Türkiye. International Journal of Climatology, 46: e7076.
- Masson, D. and R. Knutti, 2011. Climate model genealogy. Geophysical Research Letters, 38 (8).
- McCabe, G. J. and S. L. Markstrom, 2007. A monthly water-balance model driven by a graphical user interface. Technical report, US Geological Survey.
- Mendicino, G., Senatore, A., 2013. Regionalization of the Hargreaves coefficient for the assessment of distributed reference evapotranspiration in southern Italy. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139 (5): 349–362.
- Palmer, T. E., C. F. McSweeney, B. B. Booth, M. D. Priestley, P. Davini, L. Brunner, L. Borchert, and M. B. Menary, 2023. Performance-based sub-selection of CMIP6 models for impact assessments in Europe. Earth System Dynamics 14 (2), 457–483.
- Thornthwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical review 38 (1), 55–94.

FROM RESEARCH PROTOTYPE TO INSTITUTIONALIZED TERRITORIAL INFRASTRUCTURE: THE IRRITRE DECISION SUPPORT SYSTEM FOR CONSORTIUM-SCALE IRRIGATION MANAGEMENT

DA PROTOTIPO DI RICERCA A INFRASTRUTTURA TERRITORIALE ISTITUZIONALE: IL SISTEMA DI SUPPORTO ALLE DECISIONI IRRITRE PER LA GESTIONE DELL'IRRIGAZIONE A LIVELLO DI CONSORZIO IRRIGUO

Fabio Zottele¹, Cecilia Mattedi^{1*}, Francesco Centurioni¹, Pietro Franceschi², Stefano Corradini¹, Fabio Antonelli³,
Francesca Paolucci⁴, Alessandra Gattolin⁵

¹ Fondazione Edmund Mach - Centro di Trasferimento Tecnologico - Agrometeorologia e Irrigazione, via E.Mach 1, 38098, San Michele all'Adige (TN)

² Fondazione Edmund Mach - Centro di Ricerca e Innovazione – Agricoltura Digitale, via E.Mach 1, 38098, San Michele all'Adige (TN)

³ Fondazione Bruno Kessler - OpenIoT Research Unit, Via Sommarive 18, Povo, 38123, Trento (TN)

⁴ Trentino Digitale - Innovazione e divulgazione tecnologica, Via G. Gilli, 2 – 38121 Trento (TN)

⁵ Provincia Autonoma di Trento - Piazza Dante 15, 38122, Trento (TN)

cecilia.mattedi@fmach.it

Abstract

IRRITRE is an irrigation scheduling project in the Province of Trento that is evolving from experimental research into a robust territorial infrastructure. Its goal is to calculate daily water requirements for apple trees, vines, and olive trees by analysing the soil-plant-atmosphere interaction.

The system combines FAO-based evapotranspiration modelling, detailed pedological soil parameterization, and spatial upscaling to extend point simulations to homogeneous irrigation sectors. A core strength is data interoperability: through an API-based architecture, IRRITRE integrates real-time data from field sensors, weather networks, and flow meters.

Operational results show optimized irrigation timing, reduced irrigation water use, and improved collective governance. By bridging scientific modelling with institutional frameworks, IRRITRE offers a replicable model for precision agriculture and public water management in response to increasing climate variability.

Parole chiave

Irrigazione, gestione dell'acqua, IoT, DSS

Keywords

Irrigation, water management, IoT, DSS

Introduction

IRRITRE was originally developed as a research and development initiative to improve irrigation scheduling through plant-centred water balance modelling under Alpine conditions (Gattolin et al., 2024). Designed within the Province of Trento (Italy), in partnership with Fondazione Edmund Mach (FEM), Fondazione Bruno Kessler (FBK) and Trentino Digitale (TD) the system integrates soil hydraulic properties, crop parameters, and meteorological forcing into a semi-empirical soil-plant-atmosphere framework capable of delivering daily irrigation requirements for apple, grape and olive (Zottele et al., 2025). By adopting a Precision Irrigation approach, IRRITRE optimizes water use in the agricultural sector, promoting a rational management of water resources in response to the increasing pressures of climate change (Calvin et al., 2023). Climate change is also adversely affecting watercourses and basins, placing a significant strain on irrigation consortia, which are tasked with ensuring equitable water distribution among their members in order to satisfy the crops' water demand. Consequently, the Province of Trento has planned the transition from a research-led initiative to a structured

service. This shift aims to maximize water-use efficiency across the region's entire agricultural territory, ensuring long-term sustainability.

Materials and methods

The preliminary phase of the project focused on three specific areas within the Trentino region: the Tres irrigation consortium (Val di Non), the Varone consortium (Alto Garda), and the Roveré della Luna consortium (Piana Rotaliana). Each was selected for its distinct agricultural vocation, specialized in apple orchards, olive groves, and vineyards, respectively (Gattolin et al., 2024).

Building on this, the project has been extended to other geographically unique areas (Fig. 1):

- Consorzio Trentino di Bonifica: this entity oversees several minor consortia distributed throughout the Adige Valley; however, the focus is on the Mezzocorona and Nave San Rocco areas, where vineyards and apple orchards are the primary crops.
- Consorzio di Secondo Grado della val di Cembra: located in the eponymous valley on the eastern side of the Adige, it is characterized by "heroic" viticulture on steep slopes (Gaudio, 2025).

- Consorzio di Praolini-Bagolé (Volano): situated near Rovereto in the Vallagarina district, this area is dedicated almost exclusively to viticulture.

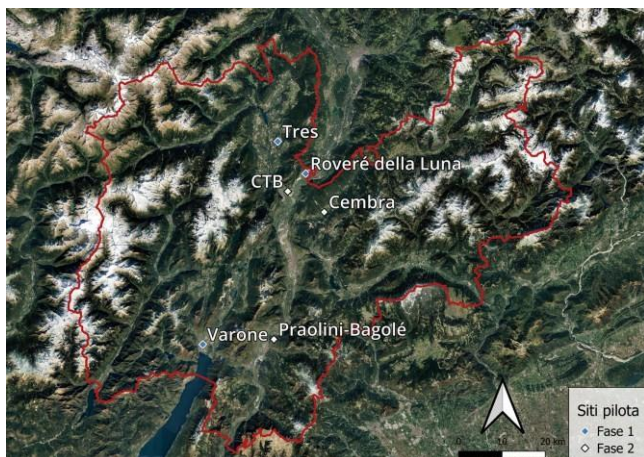


Fig. 1 - Mappa dei consorzi pilota coinvolti nel progetto: Fase 1 (punti azzurri, siti coinvolti nel 2023) e Fase 2 (punti bianchi, coinvolti a fine 2025) (Base map: Immagini ©2024 TerraMetrics, Dati cartografici ©2024 Google)

Fig. 1- Map of the pilot consortia involved in the project: Phase 1 (blue marks, sites joined in 2023) and Phase 2 (white marks, sites joined in late 2025) (Base map: Imagery ©2024 TerraMetrics, Map Data ©2024 Google)

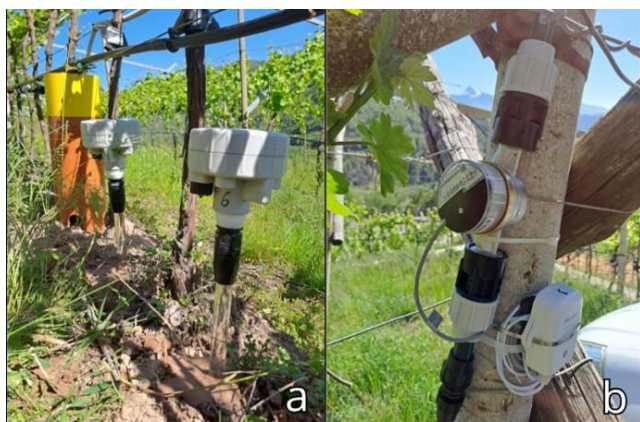


Fig. 2 - Esempio di sensori installati: (a) tensiometri e sonde capacitive (nel tubo arancione) - (b) contalitri sull'ala gocciolante

Fig. 2 - Example of installed sensors: (a) tensiometers and capacitive probes (in the orange tube) - (b) drip line flow meters.

Each consortium typically employs two levels of control valves to regulate irrigation flow: *subsector* valves at the field level, and *sector* control valves, which oversee a group of subsector units. These valves are usually managed by a software program that ensures equal water distribution to all farmers within the consortium according to a fixed irrigation schedule.

The daily irrigation requirement is estimated using a physically-based water balance model called SWAB (Soil Water Advanced Budget) that incorporates advanced

parameterizations of the Soil-Plant-Atmosphere Continuum (SPAC), specifically calibrated to the pedoclimatic variability of the Trentino region (Allen, 2000; Zottele et al., 2025). The model is applied to specific *homogeneous areas* within the consortia—zones characterized by uniform crop types, soil properties, and irrigation systems. For each area, SWAB calculates the irrigation requirements for the day of the model run and the two upcoming days, using a dual Kc approach (Allen, 2000). This method accounts for the specific water needs of each crop in relation to soil characteristics and atmospheric conditions. Meteorological data are sourced from the Fondazione Edmund Mach agrometeorological stations nearest to each site, whereas weather forecasts are retrieved from the Open-Meteo platform (Zippenfenig, 2024).

To ensure continuous monitoring of soil water status and irrigation flow, a specialized sensor network has been deployed, according to the specific needs of each consortium and its soil characteristics (Fig. 2):

- Tensiometers to measure soil water potential at 30 cm and 60 cm depth;
- Capacitive probes to monitor volumetric soil water content measurement at multiple depth (10 cm, 30 cm, 60 cm, 90 cm);
- Drip Line Flow Meters to track water delivery at the field level;
- Pulse Counter installed on sector control valves to monitor irrigation timing and volume.

Data are collected and transmitted real time via LoRaWAN technology using IoT applications, and are accessible to technicians and consortium presidents on the IRRITRE platform, developed by Trentino Digitale. This dashboard provides a comprehensive overview of the consortium, including real-time probe status, interactive consortium maps, and predictive plots of irrigation requirements for the upcoming days (Fig. 3, Fig. 4).

Results and Discussion

The second year of the pilot phase facilitated the refinement of task coordination among partners. Effective cooperation and seamless teamwork are essential to ensuring the model's operational flow and maintaining consistent communication with the consortia. To this end, bi-weekly meetings are held to align work organization and provide strategic updates.

Working closely with the consortia allowed to improve the sensing infrastructure and better understand how sensors respond to rainfall and irrigation patterns according to the different soil types where they are deployed. Data from the network clearly reflected variations in soil and crop conditions, validating the accuracy of the measurements and the overall effectiveness of the installed sensors (Fig. 3).

The installation of drip line flow meters and pulse counters proved highly effective for monitoring irrigation volumes, as they enabled continuous tracking of overall water consumption throughout the growing season. These findings are particularly valuable for another ongoing project—a collaboration between the Autonomous Province of Trento, FEM, and the University of Trento (Provincial Irrigation

Plan) — which aims to estimate total annual water requirements for agricultural land across the province. A comparative analysis between actual water usage and theoretical demand could help identify resource imbalances within Trento's water supply network.



Fig. 3 - Mappa del consorzio di Tres con i simboli dei sensori colorati in base allo stato idrico del suolo (Schermata della piattaforma IRRITRE).

Fig. 3- Spatial distribution of sensors within the Tres consortium, categorized by soil moisture levels (IRRITRE platform interface).

Dati relativi al campo 28-3-12-1

Raccomandazioni previste per oggi e i prossimi 2 giorni

Dati elaborati dalla Fondazione Edmund Mach.

Melo BTR1



Fig. 4 - Output del modello SWAB sulla piattaforma IRRITRE, : andamento del contenuto idrico del terreno con consiglio irriguo (linea blu) e senza consiglio irriguo (linea rossa). Le barre in basso mostrano le precipitazioni (blu) e le irrigazioni (verde)

Fig. 4- IRRITRE platform display of the SWAB model output: projected soil moisture with irrigation (blue line) and without irrigation (red line). Bottom bars indicate rainfall (blue) and irrigation (green).

The experimental phase facilitated the refinement of the SWAB water balance model by incorporating advanced

parameters that more accurately characterize soil water dynamics. These enhancements, drawing from the updated FAO guidelines and recent literature, introduce a more robust parameterization of surface runoff through the Curve Number (CN) method (Allen, 2000; Reshmidevi et al., 2008). By integrating the Curve Number, the model significantly improves its ability to estimate runoff by accounting for the complex interplay between land use, soil type, and antecedent moisture conditions. This allows the SWAB model to better partition precipitation into infiltration and runoff, leading to a more precise simulation of water availability in the root zone and reducing the margins of error in heterogeneous agricultural landscapes.

The IRRITRE platform provides for every *homogeneous area* a visual representation of the model's output, displaying soil water content, precipitation, and irrigation volumes for a four-week window—specifically, the two weeks preceding and following the model run (Fig. 4). For the current date and the subsequent two days, the system provides specific irrigation recommendations. The platform illustrates the projected soil water content through two distinct scenarios: the 'wet scenario' (blue line), which accounts for the suggested irrigation, and the 'dry scenario' (red line), which simulates the soil moisture trend in the absence of irrigation. This comparative visualization is crucial for understanding the immediate impact of irrigation strategies on water availability and for preventing crop water stress.

By integrating real-time monitoring with soil water content forecasts, consortia are shifting from rigid irrigation calendars toward a targeted 'on-demand' approach. This evolution optimizes water use efficiency, preventing excessive applications and focusing resources only where the model identifies an actual deficit.

Conclusions

Year 2025 saw a significant increase in interest for the project from other irrigation consortia. Some of them are currently upgrading their local infrastructure in order to ensure IRRITRE compliance and join the project's monitoring network. This growing commitment to precision water management is instrumental in raising public and stakeholder awareness regarding the critical challenges posed by climate change. By integrating advanced technology with traditional farming, the project serves as a key tool for developing the resilience and adaptation strategies necessary to address future environmental shifts. In this perspective, the IRRITRE project is evolving into a permanent territorial infrastructure, designed to serve as a standardized institutional framework for all interested consortia throughout the Province of Trento.

References

- Allen R.G. (Ed), 2000. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, repr. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Calvin K., Dasgupta D., Krinner G., Mukherji A., Thorne P.W., Trisos C., Romero J., Aldunce P., Barrett K., Blanco G., Cheung W.W.L., Connors S., Denton F., Diongue-

- Niang A., Dodman D., Garschagen M., Geden O., Hayward B., Jones C., Jotzo F., Krug T., Lasco R., Lee Y.-Y., Masson-Delmotte V., Meinshausen M., Mintenbeck K., Mokssit A., Otto F.E.L., Pathak M., Pirani A., Poloczanska E., Pörtner H.-O., Revi A., Roberts D.C., Roy J., Ruane A.C., Skea J., Shukla P.R., Slade R., Slangen A., Sokona Y., Sörensson A.A., Tignor M., Van Vuuren D., Wei Y.-M., Winkler H., Zhai P., Zommers Z., Hourcade J.-C., Johnson F.X., Pachauri S., Simpson N.P., Singh C., Thomas A., Totin E., Arias P., Bustamante M., Elgizouli I., Flato G., Howden M., Méndez-Vallejo C., Pereira J.J., Pichs-Madruga R., Rose S.K., Saheb Y., Sánchez Rodríguez R., Ürgé-Vorsatz D., Xiao C., Yassaa N., Alegría A., Armour K., Bednar-Friedl B., Blok K., Cissé G., Dentener F., Eriksen S., Fischer E., Garner G., Guivarch C., Haasnoot M., Hansen G., Hauser M., Hawkins E., Hermans T., Kopp R., Leprince-Ringuet N., Lewis J., Ley D., Ludden C., Niamir L., Nicholls Z., Some S., Szopa S., Trewin B., Van Der Wijst K.-I., Winter G., Witting M., Birt A., Ha M., Romero J., Kim J., Haïtes E.F., Jung Y., Stavins R., Birt A., Ha M., Orendain D.J.A., Ignon L., Park S., Park Y., Reisinger A., Cammaramo D., Fischlin A., Fuglestedt J.S., Hansen G., Ludden C., Masson-Delmotte V., Matthews J.B.R., Mintenbeck K., Pirani A., Poloczanska E., Leprince-Ringuet N., Péan C., 2023. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland., First. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Gattolin A., Antonelli F., Franceschi P., Paolucci F., Corradini S., Zottele F., 2024. IRRITRE: Infrastruttura e strumenti per l'irrigazione in Trentino. In: IT
- Gaudio R., 2025. Heroic Viticulture - Cervim magazine. 2025, (1)
- Reshmidevi T.V., Jana R., Eldho T.I., 2008. Geospatial estimation of soil moisture in rain-fed paddy fields using SCS-CN-based model. *Agricultural Water Management*, 95 (4): 447–57.
- Zippenfenig P., 2024. Open-Meteo.com Weather API.
- Zottele F., Mattedi C., Centurioni F., Corradini S., 2025. Precision irrigation in the Trentino region: how SWAB tackles the water challenges. In: IT

DISTRIBUTED MICROCLIMATIC MONITORING IN VINEYARDS USING A WIRELESS SENSOR NETWORK

MONITORAGGIO MICROCLIMATICO DISTRIBUITO IN VIGNETO MEDIANTE RETE DI SENSORI WIRELESS

Irene Cappelli^{1*}, Ada Fort¹, Marco Tani¹, Valerio Vignoli¹

¹ Dipartimento Ingegneria dell'Informazione e Scienze Matematiche, Università di Siena, Siena, Italia

* cappelli@diism.unisi.it

Abstract

High-resolution microclimate monitoring is increasingly relevant for sustainable vineyard management, supporting data-driven agronomic decisions. This work presents a proprietary wireless sensing infrastructure for distributed acquisition of key microclimatic variables, operating for over two years. The system consists of low-power sensing nodes designed for long-term autonomous outdoor operation. Each node measures air temperature, relative humidity, solar irradiance, leaf wetness, and precipitation. Nodes are based on ultra-low-power microcontrollers with LoRa transceivers, operating in a LoRaWAN star network. Data are sampled every five minutes and transmitted to a central gateway for storage and visualization. The deployment includes five nodes installed in five vineyard plots within the same farm, with inter-node distances below 500 m, enabling synchronized monitoring of microclimatic variability with limited infrastructure.

Parole chiave

Microclima del vigneto, Monitoraggio distribuito, Reti di sensori wireless, Rilevamento in campo, Variabilità spatio-temporale

Keywords

Vineyard microclimate, Distributed monitoring, Wireless sensor networks, In-field sensing, Spatio-temporal variability

Introduzione

Nel contesto della viticoltura di precisione, il passaggio da una gestione empirica a un approccio basato sui dati richiede la disponibilità continua di misure ambientali caratterizzate da elevata risoluzione temporale e spaziale. In particolare, il microclima del vigneto rappresenta un fattore determinante per numerosi processi biofisici che influenzano lo sviluppo della coltura, la qualità delle uve (Pouxinol *et al.*, 2023) e la dinamica delle principali fitopatie (Caffarra *et al.*, 2012). Variabili quali temperatura dell'aria, umidità relativa, radiazione solare e bagnatura fogliare svolgono un ruolo chiave nella regolazione dei fenomeni fisiologici e nell'evoluzione delle condizioni favorevoli allo sviluppo di patogeni, rendendo la loro osservazione sistematica un elemento centrale per il supporto alle decisioni agronomiche (Bhargava *et al.*, 2024).

In questo scenario, i sistemi di monitoraggio basati su reti di sensori wireless distribuiti stanno assumendo un ruolo sempre più rilevante, grazie alla possibilità di acquisire dati in modo continuo direttamente in campo, cogliendo la variabilità microclimatica su scala intra-parcellare (Friha *et al.*, 2021). Tali soluzioni consentono una caratterizzazione più rappresentativa delle condizioni reali del vigneto, mantenendo al contempo una complessità infrastrutturale contenuta (Ioannou *et al.*, 2021).

Tuttavia, l'impiego prolungato di nodi di misura in ambiente outdoor introduce criticità operative non trascurabili. Le condizioni ambientali, l'interazione con la vegetazione e i vincoli energetici possono influenzare l'affidabilità del sistema, determinando perdite di dati e discontinuità nelle serie temporali (Faybishenko *et al.*,

2022). Questi aspetti evidenziano la necessità di considerare il monitoraggio microclimatico non solo come un problema di acquisizione, ma come un processo integrato che include gestione, validazione e interpretazione del dato (Cappelli *et al.*, 2026).

In questo lavoro viene presentata un'infrastruttura di monitoraggio microclimatico distribuito sviluppata per l'acquisizione continuativa di variabili ambientali in vigneto, insieme a un'analisi dei dati raccolti su scala pluriennale (Cappelli *et al.*, 2024). L'attività ha incluso la progettazione e realizzazione di nodi di misura a basso costo e basso consumo energetico, specificamente sviluppati per applicazioni in ambiente vitivinicolo, nonché la loro installazione in campo in una configurazione distribuita. Il sistema di monitoraggio è progettato per operare in modo autonomo per lunghi periodi e acquisire variabili microclimatiche rilevanti per la valutazione delle condizioni colturali, tra cui temperatura e umidità dell'aria, radiazione solare, bagnatura fogliare e precipitazioni.

Dal punto di vista metodologico, il lavoro ha incluso una caratterizzazione metrologica del sistema di misura, finalizzata a valutare l'affidabilità dei sensori e a verificare la significatività fisica delle correlazioni osservate sia tra nodi spazialmente distribuiti sia tra diverse variabili microclimatiche. Parallelamente, è stata condotta un'analisi approfondita del dataset acquisito, con particolare attenzione alla struttura della variabilità spaziale e temporale e alla sua stabilità nel tempo.

Materiali e Metodi

Il dataset è stato acquisito mediante una infrastruttura proprietaria di sensing wireless già descritta e validata in studi precedenti (Cappelli *et al.*, 2024). Nel seguito se ne riportano gli elementi essenziali rilevanti per l'analisi svolta. Il sistema di monitoraggio è basato su nodi di misura distribuiti a basso consumo energetico, progettati per operare in modo autonomo per lunghi periodi. Ciascun nodo consente l'acquisizione in campo di variabili microclimatiche rilevanti per il monitoraggio delle condizioni colturali, tra cui temperatura e umidità dell'aria, radiazione solare incidente, bagnatura fogliare inferiore e superiore e livello delle precipitazioni liquide.

Le grandezze termo-igrometriche sono rilevate mediante sensori digitali integrati (Sensorion SHT30), mentre la radiazione solare è stimata tramite elementi fotosensibili resistivi (LDR NORPS-12) sottoposti a calibrazione rispetto a uno strumento di riferimento e per le quali sono state osservate deviazioni inferiori al 10% per livelli di irradianza fino a 500 W/m^2 (Cappelli *et al.*, 2024). La misura delle precipitazioni è affidata a un pluviometro a bascula (MISOL), mentre la bagnatura fogliare è rilevata mediante sonde resistive interdigitate, la cui risposta in impedenza è convertita in un indice discreto di bagnatura attraverso una calibrazione preliminare. I sensori basati su impedenza sono acquisiti mediante un'interfaccia analogica a quattro fili, che consente la stima della resistenza equivalente a partire dalla risposta in tensione del sensore (Cappelli *et al.*, 2025).

Dal punto di vista dell'architettura embedded, i nodi sono basati su microcontrollori ultra-low-power accoppiati a trasmettitori LoRa, operanti all'interno di una rete LoRaWAN con topologia a stella. Il sistema prevede un campionamento periodico con passo temporale di cinque minuti e trasmissione asincrona dei dati, comprensivi di diagnostica di sistema, verso un gateway centrale connesso a un server per l'archiviazione e la visualizzazione.

L'infrastruttura è stata installata in cinque vigneti dell'azienda agricola La Selva (Siena, Italia), esposti a differenti condizioni di quota ed esposizione alla radiazione solare e disposti a distanze reciproche inferiori a 500 m, permettendo il monitoraggio distribuito della variabilità microclimatica a scala intra-aziendale. La Fig. 1 illustra la mappa della distribuzione dei nodi e del gateway nell'area di studio e l'immagine di un nodo installato in campo.

Prima dell'installazione in campo, i sensori sono stati sottoposti a una caratterizzazione metrologica in laboratorio in condizioni controllate, al fine di valutarne le prestazioni di misura. Sono state considerate componenti d'incertezza di tipo A e B, includendo specifiche dei sensori, risoluzione, effetti di quantizzazione e parametri di calibrazione. L'incertezza complessiva è stata espressa come incertezza estesa con fattore di copertura $k=2$ (Cappelli *et al.*, 2026). Per i sensori termo-igrometrici commerciali, la stima dell'incertezza è stata basata sulle specifiche del costruttore, integrate con contributi legati alla risoluzione e alla ripetibilità. I valori numerici trovati per l'incertezza estesa sono pari a $\pm 0.35 \text{ }^\circ\text{C}$ e $\pm 3.5\%$ rispettivamente per temperatura e umidità relativa. Nel caso della radiazione solare, il contributo dominante è risultato associato ai residui

di calibrazione rispetto a un piranometro di riferimento (incertezza estesa $\sim 12\%$ per valori inferiori a 500 W/m^2). Per le misure pluviometriche sono stati considerati effetti legati alla risoluzione e alla ripetibilità degli eventi, arrivando ad un'incertezza estesa pari a $\pm 0.17 \text{ mm}$ per evento. Infine, per la bagnatura fogliare, l'incertezza è stata valutata con riferimento alla misura elettrica di impedenza, mentre la successiva conversione in indice ambientale è stata considerata dipendente dal modello adottato (incertezza estesa pari a $\pm 2.3\%$ della lettura di impedenza).



Fig. 1 - Distribuzione spaziale dei nodi e del gateway nell'area di studio (in alto) ed immagine del nodo di monitoraggio installato in un vigneto (in basso).

Fig. 1 - Spatial distribution of sensor nodes and gateway within the study area (top) and image of a monitoring node installed in a vineyard (bottom).

Risultati e Discussione

Una prima fase dell'analisi è stata dedicata all'osservazione dell'evoluzione temporale delle principali variabili microclimatiche durante l'intero periodo di monitoraggio, al fine di verificare la coerenza stagionale dei dati, la loro stabilità nel tempo e la consistenza tra i diversi nodi della rete. Questo tipo di analisi consente di valutare, in modo preliminare, sia l'affidabilità del sistema di misura sia la capacità della rete di rappresentare correttamente le dinamiche climatiche e microclimatiche dell'area di studio.

La Fig. 2, a titolo esemplificativo, riporta l'andamento temporale delle medie giornaliere di temperatura dell'aria e umidità relativa registrate dai nodi di monitoraggio nel periodo agosto 2023 – novembre 2025. I dati evidenziano un chiaro comportamento stagionale, con cicli annuali ben definiti caratterizzati da massimi estivi e minimi invernali per la temperatura, e un andamento complementare per l'umidità relativa.

Nel corso dei due anni di osservazione, i diversi nodi mostrano un'elevata coerenza temporale, seguendo in modo sincrono le variazioni stagionali e gli eventi meteorologici. L'andamento dell'umidità relativa risulta inoltre caratterizzato da una maggiore variabilità a breve termine rispetto alla temperatura, con fluttuazioni rapide, probabilmente associate a eventi meteorologici locali. Nonostante tale variabilità, le differenze tra nodi mantengono una struttura coerente nel tempo, suggerendo la presenza di condizioni microclimatiche locali persistenti.

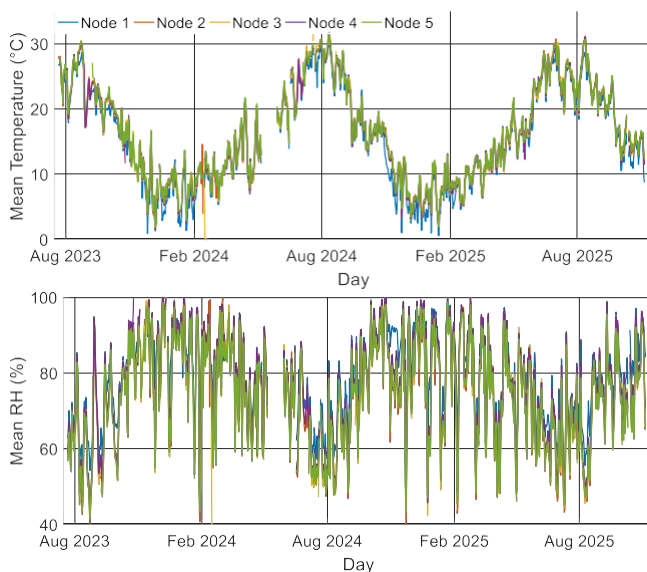


Fig. 2 - Andamento temporale delle medie giornaliere di temperatura dell'aria (in alto) e umidità relativa (in basso) misurate dai cinque sistemi di monitoraggio nel periodo agosto 2023 – novembre 2025.

Fig. 2 - Time series of daily mean air temperature (top) and relative humidity (bottom) measured by the five monitoring nodes over the period August 2023 – November 2025.

Alla luce di queste evidenze, l'analisi è stata approfondita passando da una descrizione generale delle serie temporali ad una caratterizzazione quantitativa della variabilità microclimatica, esaminata su base stagionale e spaziale. In particolare, i dati acquisiti dalla rete di monitoraggio sono stati analizzati considerando l'andamento stagionale della temperatura dell'aria e la sua coerenza con le dinamiche di umidità relativa e bagnatura fogliare. A tal fine, il dataset è stato aggregato su base stagionale (inverno: dicembre–febbraio; primavera: marzo–maggio; estate: giugno–agosto; autunno: settembre–novembre), consentendo il confronto diretto tra i diversi nodi.

L'analisi evidenzia un comportamento termico complessivamente coerente tra i nodi e con il ciclo climatico annuale. Per quanto riguarda la temperatura, i risultati divisi per anno e stagione sono riportati in Fig. 3.

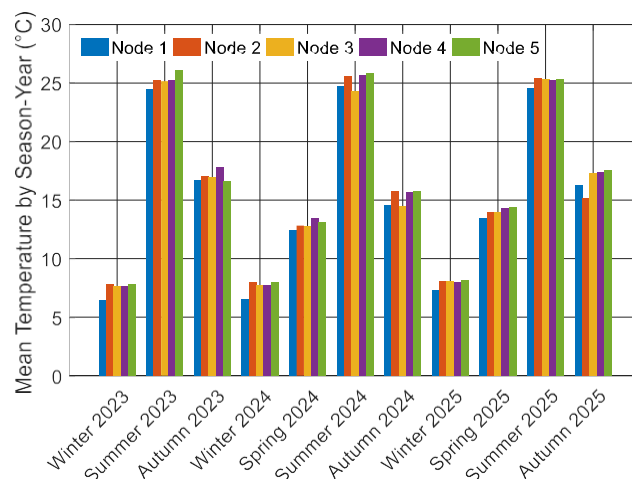


Fig. 3 - Temperature medie stagionali dell'aria misurate dai diversi nodi di monitoraggio nel periodo 2023–2025, suddivise per stagione e anno.

Fig. 3 - Seasonal mean air temperature measured by the monitoring nodes over the period 2023–2025, grouped by season and year.

Le temperature medie misurate sono comprese tra 6.8–8.0 °C in inverno, 13.0–14.0 °C in primavera, 24.6–25.7 °C in estate e 15.7–16.9 °C in autunno. Tuttavia, emerge chiaramente una struttura spaziale persistente: il nodo 1 registra sistematicamente le temperature più basse, mentre i nodi 4 e 5 mostrano valori mediamente più elevati. Le differenze tra nodi risultano dell'ordine di circa 1 °C, indicando la presenza di gradienti termici locali significativi. La significatività della variabilità osservata è ulteriormente confermata dal confronto con l'incertezza di misura del sistema. A fronte di un'incertezza estesa sulla temperatura pari a circa ± 0.35 °C, gli scarti tra nodi risultano mediamente due–tre volte superiori, escludendo che possano essere attribuite a rumore o bias dei sensori.

Tali differenze trovano una spiegazione plausibile nella configurazione topografica dell'area di studio. Il nodo 1 è infatti localizzato in una zona più depressa del vigneto, dove sono favoriti fenomeni di accumulo di aria fredda e ridotta ventilazione, in particolare durante condizioni atmosferiche stabili. Questi aspetti emergono chiaramente anche dall'analisi dei profili medi giornalieri di temperatura, umidità e bagnatura riportati in Fig. 4 e Fig. 5 rispettivamente per i mesi invernali ed estivi.

In inverno (Fig. 4), il nodo 1 presenta temperature sistematicamente inferiori, con un riscaldamento più lento rispetto agli altri nodi e un ritardo nel raggiungimento del massimo giornaliero. In estate (Fig. 5), pur in presenza di un ciclo diurno più pronunciato, si osserva un comportamento analogo nelle fasi di raffreddamento notturno, tuttavia, durante le ore centrali della giornata, le differenze tendono a ridursi e i valori massimi risultano comparabili tra i nodi.

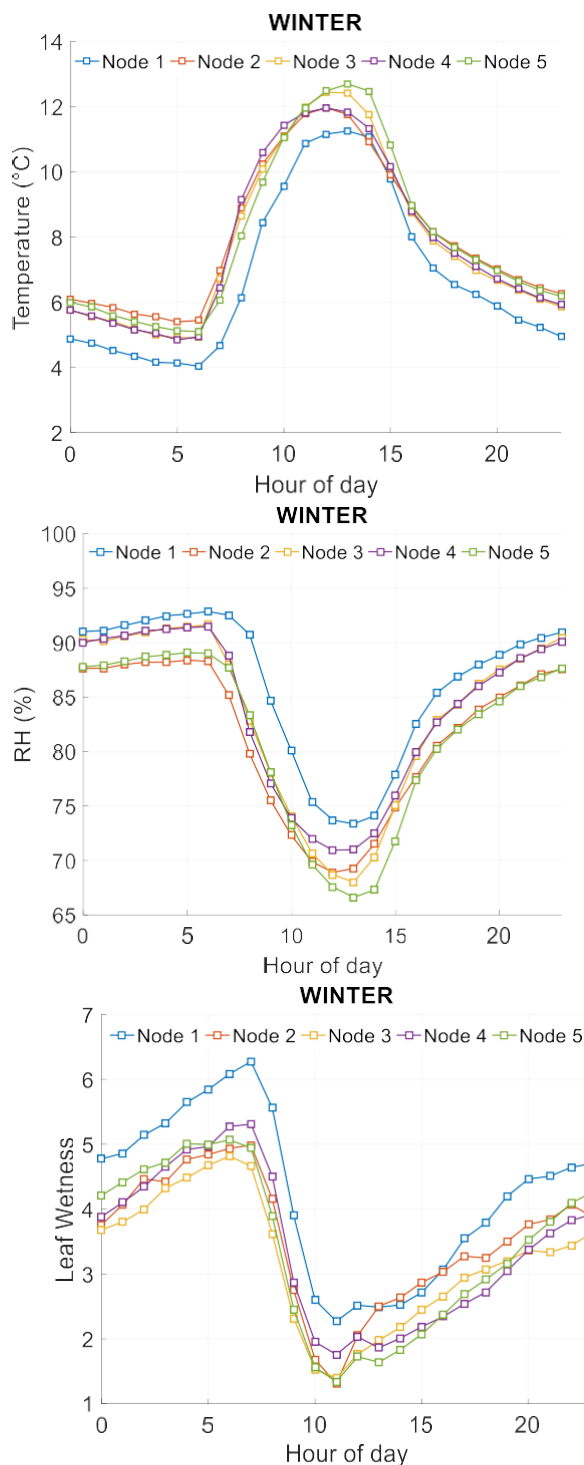


Fig. 4 - Profili medi giornalieri di temperatura (in alto), umidità relativa (al centro) e bagnatura fogliare (in basso) misurati dai nodi di monitoraggio durante i mesi invernali.
Fig. 4 - Mean diurnal profiles of temperature (top), relative humidity (middle), and leaf wetness (bottom) measured by the monitoring nodes during the winter months.

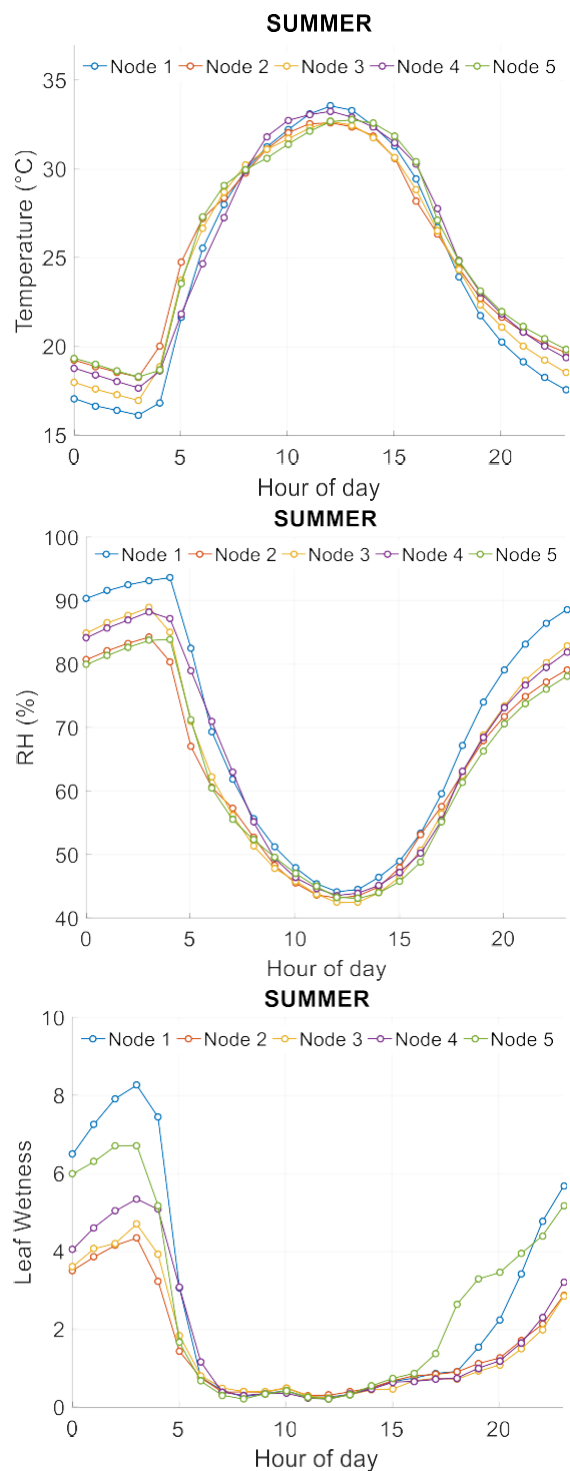


Fig. 5 - Profili medi giornalieri di temperatura (in alto), umidità relativa (al centro) e bagnatura fogliare (in basso) misurati dai nodi di monitoraggio durante i mesi estivi.
Fig. 5 - Mean diurnal profiles of temperature (top), relative humidity (middle), and leaf wetness (bottom) measured by the monitoring nodes during the summer months.

La maggiore ampiezza delle differenze nei periodi più freddi è coerente con processi microclimatici tipici di ambienti collinari, quali drenaggio dell'aria fredda ed effetti legati all'esposizione solare. Inoltre, l'assenza di uno scostamento

costante tra le curve e la natura tempo-dipendente di tali differenze indicano che esse riflettono una reale variabilità microclimatica, piuttosto che effetti strumentali. Coerentemente, i nodi più freddi mostrano valori più elevati di umidità relativa e maggiori livelli di bagnatura fogliare, in accordo con i processi termo-igrometrici attesi e con una maggiore persistenza di condizioni favorevoli alla condensazione o al rallentamento dell'asciugatura delle superfici fogliari.

Il confronto tra i profili medi giornalieri invernali ed estivi evidenzia differenze marcate e coerenti con la stagionalità delle condizioni microclimatiche. In inverno, le temperature risultano significativamente più basse lungo tutto l'arco della giornata e caratterizzate da una minore escursione termica, mentre in estate si osservano valori medi più elevati e un ciclo diurno più pronunciato, con rapidi incrementi nelle ore mattutine e massimi nelle ore centrali della giornata. In modo complementare, l'umidità relativa presenta valori mediamente più elevati in inverno, con condizioni prossime alla saturazione nelle ore notturne e del primo mattino, mentre in estate si osserva una maggiore variabilità diurna e una riduzione significativa nelle ore centrali, in corrispondenza delle temperature più elevate.

Queste differenze si riflettono direttamente sulla dinamica della bagnatura fogliare (Lawrence, 2005). In inverno, la presenza di condizioni più fredde e umide favorisce livelli generalmente più elevati e una maggiore persistenza nelle ore notturne e nelle prime ore del giorno. In estate, al contrario, i periodi di bagnatura risultano più brevi e concentrati nelle ore notturne, a causa della più rapida evaporazione indotta dalle temperature elevate e dalla maggiore radiazione solare.

Conclusioni

Il lavoro ha presentato un'infrastruttura di monitoraggio microclimatico distribuito basata su nodi wireless a basso costo e basso consumo energetico, operativa in ambiente vitivinicolo per un periodo pluriennale. I risultati ottenuti confermano la robustezza del sistema sia in termini di continuità delle acquisizioni sia di coerenza delle misure.

Il dataset acquisito evidenzia pattern microclimatici coerenti e fisicamente significativi, con differenze spaziali superiori all'incertezza di misura e quindi attribuibili a condizioni ambientali reali. L'analisi dei profili medi giornalieri conferma il carattere tempo-dipendente di tali differenze, escludendo la presenza di bias strumentali.

Quindi, nel complesso, il sistema di monitoraggio si è dimostrato stabile nel lungo periodo e in grado di rappresentare in modo affidabile sia la dinamica stagionale sia la variabilità microclimatica intra-vigneto, inclusa la relazione tra temperatura, umidità relativa e bagnatura fogliare.

Ringraziamenti

Studio condotto nell'ambito del Centro Nazionale Agritech, finanziato dall'Unione Europea – NextGenerationEU (PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA (PNRR) – MISSIONE 4 COMPONENTE 2, INVESTIMENTO 1.4 - D.D. 1032 17/06/2022, CN00000022).

Bibliografia

- Bhargava A., Shukla A., Goswami O. P., Alsharif M. H., Uthansakul P., Uthansakul M., 2024. Plant Leaf Disease Detection, Classification, and Diagnosis Using Computer Vision and Artificial Intelligence: A Review, in *IEEE Access*, vol. 12, 37443 – 37469.
- Caffarra A., Rinaldi M., Eccel E., Rossi V., Pertot, I., 2012. Modelling the impact of climate change on the interaction between grapevine and its pests and pathogens: European grapevine moth and powdery mildew. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 148, 89 – 101
- Cappelli I., Parri L., Tani M., Vignoli V., Fort A., 2024. Pervasive Monitoring in the Context of Precision Agriculture: Using Low-Cost LDR Sensors for Solar Intensity Measurement. In *2024 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Glasgow, United Kingdom, 1 – 6.
- Cappelli I., Tani M., Vignoli V., Fort A., 2025. Low-Cost and Low-Frequency Interface for Soil Moisture Monitoring. In *2025 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 1 – 6.
- Cappelli I., Tani M., Vignoli V., Fort A., 2026. A Flexible and Scalable IoT Measurement Platform for Smart Agriculture and Environmental Sensing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
- Faybishenko B., Versteeg R., Pastorello G., Dwivedi D., Varadharajan C., Agarwal D., 2022. Challenging problems of quality assurance and quality control (QA/QC) of meteorological time series data. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 36(4), 1049 – 1062.
- Friha O., Ferrag M. A., Shu L., Maglaras L., Wang X., 2021. Internet of things for the future of smart agriculture: A comprehensive survey of emerging technologies. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 8, no. 4, 718 – 752.
- Ioannou K., Karampatzakis D., Amanatidis P., Aggelopoulos V., Karmiris I., 2021. Low-cost automatic weather stations in the internet of things. *Information*, vol. 12, 146.
- Lawrence M. G., 2005. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 86, no. 2, 225 – 234.
- Pouxinol M. I., Martins M. R., Barroso J. M., Rato, A. E., 2023. Wine grapes ripening: A review on climate effect and analytical approach to increase wine quality. *Applied Biosciences*, 2(3), 347 – 372.

ANALYSIS OF THE PHENOLOGICAL RESPONSE OF VINE TO INTERANNUAL THERMAL VARIABILITY: APPLICATION OF THE HUGLIN INDEX IN THE TORTONESE VITICULTURE AREA

ANALISI DELLA RISPOSTA FENOLOGICA DELLA VITE ALLA VARIABILITÀ TERMICA INTERANNUALE: APPLICAZIONE DELL'INDICE DI HUGLIN NEL BACINO VITICOLO DEL TORTONESE

Valentina Andreoli^{1*}, Claudio Cassardo¹

¹ Dipartimento di Fisica, Università di Torino, via Pietro Giuria 1, 10125, Torino (To)

*valentina.andreoli@unito.it

Abstract

Climate change is significantly altering grapevine biological cycles, posing critical challenges for sensitive autochthonous varieties such as Timorasso. This study examines the interaction between thermal variables and phenological stages in the Tortonese district (Piedmont), utilizing hourly and daily meteorological data from the Montemarzino station. Due to the fragmentation of historical records, budbreak, veraison, and harvest dates were reconstructed using a hybrid approach integrating heat-accumulation crop models with regional monitoring data. Key indices were calculated, including the Huglin Index (HI), heat stress hours ($T > 30\text{ °C}$), frost hours, and the average temperature of the first 100 days of the year. The results highlight a strong correlation between early spring warming and advanced budbreak, as well as a drastic contraction of ripening periods during hot vintages such as 2022. The analysis shows that excessive heat hours trigger photosynthetic blocks that compromise the sugar-acid balance, suggesting the need for adaptive agronomic strategies (canopy and soil management) to preserve the sensory identity and characteristic freshness of Timorasso wines in the face of global warming.

Parole chiave

Vitis vinifera L. (cv. Timorasso); Indice di Huglin; Fenologia; Stress termico; Cambiamento climatico

Keywords

Vitis vinifera L. (cv. Timorasso); Huglin Index; Phenology; Heat stress; Climate change

Introduzione

Il progressivo incremento delle temperature medie e l'aumento della frequenza di eventi termici estremi, come ondate di calore e siccità prolungate, stanno alterando profondamente i cicli biologici della vite (*Vitis vinifera* L.) (Jones et al., 2005; Bock et al., 2013). In Piemonte, e in particolare nel Tortonese (AL), queste dinamiche assumono un rilievo critico per la coltivazione del Timorasso. Questo vitigno autoctono a bacca bianca, noto per struttura e acidità, è estremamente sensibile alle variazioni del decorso termico, che possono compromettere non solo la resa quantitativa, ma soprattutto il delicato equilibrio tra zuccheri, acidi e precursori aromatici (Gladstones, 1992).

Il presente studio analizza l'interazione tra gli indici bioclimatici calcolati su base oraria e giornaliera e le principali fasi fenologiche (germogliamento, invaiatura, vendemmia) lungo una serie storica recente. L'analisi mira a identificare quando l'eccesso termico cessa di favorire la maturazione e diventa un fattore di stress fisiologico.

Materiali e Metodi

Area di studio e dati meteorologici

L'area di indagine è situata nel distretto dei Colli Tortonesi, con particolare riferimento alla stazione meteorologica di Montemarzino (Fig. 1). I dati grezzi, comprendenti registrazioni orarie di temperatura, umidità, radiazione e precipitazioni, sono stati sottoposti a procedure di controllo

di qualità e successivamente aggregati per il calcolo degli indici.



Fig. 1 – localizzazione della stazione meteorologica a Montemarzino, nell'area tortonese, con l'indicazione di dei due vigneti della azienda La Colombara.

Fig. 1 – location of the meteorological station in Montemarzino, in the Tortona area, with the indication of the two vineyards of the La Colombara winery.

Derivazione dei dati fenologici: un approccio ibrido

Data la frammentarietà dei registri storici aziendali continui per il vitigno Timorasso, si è reso necessario adottare un approccio metodologico ibrido per la ricostruzione delle date fenologiche. Come discusso in fase di calibrazione del modello, i dati sono stati ottenuti tramite:

1. **Analisi Bibliografica e Consortile:** sono stati consultati i Bollettini Agrometeorologici e Fenologici del Settore Fitosanitario, Servizi Tecnico-Scientifici della Regione Piemonte e i database della Rete Agrometeorologica Regionale (RAM). Tali fonti hanno permesso di definire i range temporali storici e le medie decadali per il distretto dei Colli Tortonesi, fornendo un dataset di riferimento per la taratura dei modelli (Regione Piemonte, 2024). Ulteriori informazioni sono state tratte dai registri del Consorzio Tutela Vini Colli Tortonesi per identificare le finestre di vendemmia caratteristiche dell'ultimo ventennio.
2. **Modellistica Fenologica:** la ricostruzione dell'andamento delle fasi, prendendo come punto di partenza il calendario fenologico medio del Timorasso nel Tortonese basato sui Disciplinari di Produzione e sulle schede tecniche del vitigno, è stata effettuata in due modi. Per le annate recenti (2017-2024), sono stati utilizzati i Report Agrometeorologici Annuali di ARPA Piemonte e i Bollettini Vendemmiali regionali. Per le annate meno recenti (2004-2016), in assenza di registri fenologici aziendali continui, le date sono state ricostruite tramite un'analisi di back-casting, ovvero correggendo le medie storiche del vitigno Timorasso nel distretto dei Colli Tortonesi anno per anno incrociando i Report Agrometeorologici di ARPA Piemonte (per le caratteristiche salienti delle annate) e le anomalie termiche locali registrate dalla stazione di Montemarzino, tenendo anche conto degli algoritmi per il calcolo delle fasi fenologiche basati sulla sommatoria termica (Growing Degree Days – GDD, seguendo la metodologia di Parker et al., 2011) integrati in IVINE (Italian Vineyard Integrated Numerical model for Estimating physiological values) (Andreoli et al, 2019), un modello numerico di simulazione colturale sviluppato presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Torino. In particolare, è stata adottata una temperatura di base (T_{base}) di 10 °C, e al modello sono stati forniti i dati termici orari della stazione di Montemarzino.
3. **Validazione Indiretta:** per garantire la coerenza agronomica, le date simulate sono state validate incrociandole con i dati storici sulla maturazione tecnologica (curva di accumulo degli zuccheri e degradazione acida). Nello specifico, si è verificato che le date di vendemmia stimate corrispondessero al raggiungimento di un titolo alcolometrico potenziale compreso tra il 13.5% e il 14.5% vol., parametri tipici per il profilo qualitativo del Timorasso nel Tortonese.

Indici Bioclimatici calcolati

Per una descrizione esaustiva del vigore vegetativo e dello stress, sono stati selezionati quattro parametri chiave:

- **Indice di Huglin (HI):** calcolato nel periodo aprile-settembre, fornisce una misura dell'efficacia termica per la maturazione zuccherina (Tonietto e Carbonneau, 2004).
- **Ore Torride (Hgt30):** conteggio cumulativo delle ore con $T > 30$ °C. Questa soglia è critica poiché, oltre i 30-32 °C,

molte varietà iniziano a manifestare una riduzione dell'efficienza fotosintetica.

- **Ore di Gelo (Hlt0):** cumulo delle ore sotto lo zero termico nel periodo invernale-primaverile (fino al 10 aprile), utile per valutare il rischio di danni da freddo e l'uniformità del risveglio vegetativo.
- **Temperatura Media T_{m100} :** Media termica dei primi 100 giorni dell'anno, utilizzata come indicatore del riscaldamento precoce del suolo e dell'aria.

Risultati e Discussione

Germogliamento e riscaldamento precoce

La Fig. 2 mostra la relazione tra la temperatura media dei primi 100 giorni dell'anno e la data giuliana del germogliamento (GGg).

Si osserva una correlazione negativa molto marcata: inverni e primavera precoci (come osservato nel 2024) portano a un risveglio vegetativo anticipato (spesso prima del giorno giuliano 90-100) (Tomasì et al., 2011). Questo anticipo, se da un lato allunga la stagione di crescita, dall'altro espone i germogli a gelate tardive che, sebbene meno frequenti nel trend globale, rimangono una minaccia concreta per la stabilità produttiva.



Fig. 2 – andamento delle date del germogliamento e della temperatura media dei primi 100 giorni dell'anno nel periodo di studio.

Fig. 2 – trend of budbreak dates and average temperature of the first 100 days of the year in the study period

L'invaiaura e la resilienza al freddo

L'analisi del grafico relativo all'invaiaura (Fig. 3) evidenzia come la fase di transizione del colore e l'inizio dell'accumulo zuccherino siano influenzati dalla stabilità termica della stagione. Le ore di gelo registrate nella prima parte dell'anno non sembrano ritardare l'invaiaura, che rimane fortemente legata alle temperature medie di giugno e luglio. Tuttavia, l'assenza totale di gelo in alcune annate recenti suggerisce una mancanza di "riposo vegetativo" profondo, che potrebbe influenzare il vigore della pianta nelle fasi successive.

Vendemmia e Indice di Huglin: oltre la soglia ottimale

La Fig. 4 mette in relazione la data di raccolta (GGr) con l'Indice di Huglin (HI). Il trend è inequivocabile: all'aumentare dell'accumulo termico, la data di vendemmia subisce un anticipo drastico. Casi emblematici sono le annate 2017 e 2022. Nel 2022, l'indice HI ha raggiunto

valori record, costringendo i viticoltori a vendemmie estremamente anticipate (fine agosto/inizio settembre) per preservare l'acido tartarico, che tende a degradarsi rapidamente con temperature notturne elevate (Keller, 2010).

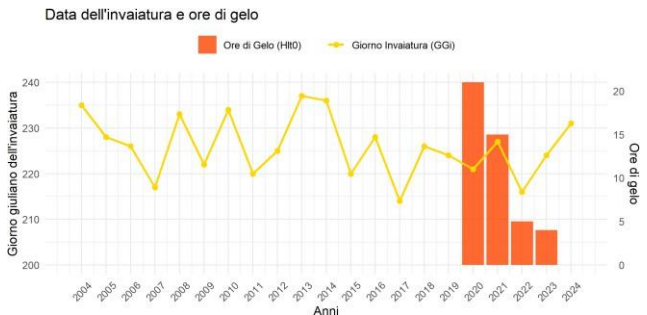


Fig. 3 – andamento delle date dell'invaiaitura e del numero di ore con temperatura media inferiore a 0 °C nel mese di aprile nel periodo di studio.

Fig. 3 – trend of veraison dates and number of hours with average temperature below 0 °C in the month of April in the study period

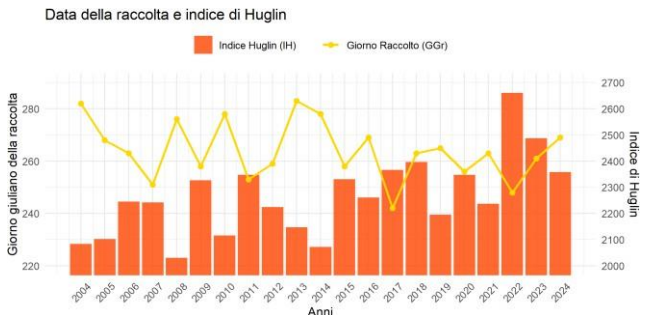


Fig. 4 – andamento delle date della raccolta e dei valori dell'indice di Huglin nel periodo di studio.

Fig. 4 – trend of harvest dates and Huglin index values in the study period

Stress termico e blocchi fotosintetici

Il grafico più significativo per la gestione agronomica è quello relativo alle ore torride (Fig. 5). Il Timorasso, pur essendo un vitigno resiliente, manifesta chiari segni di sofferenza quando le ore sopra i 30 °C superano determinate soglie critiche. Le analisi indicano che, in annate come il 2022, l'eccesso di calore non ha accelerato linearmente la maturazione, ma ha indotto fenomeni di parziale blocco fotosintetico (Poni et al., 2006). In queste condizioni, la pianta chiude gli stomi per limitare la traspirazione, arrestando la sintesi dei precursori aromatici e portando a una "maturazione forzata" guidata dalla disidratazione piuttosto che dalla reale evoluzione fisiologica dei tessuti del frutto (Keller, 2010).

Analisi delle annate critiche

La tab. 1 riporta i valori degli indici utilizzati.

- L'annata 2017 (siccità estrema): caratterizzata da un HI elevato accompagnato da un deficit idrico severo. La vendemmia è stata anticipata, ma con rese molto basse e

una concentrazione zuccherina che, talora, ha superato i livelli desiderati a scapito della raffinatezza aromatica.

- L'annata 2022 (caldo record): il superamento costante dei 35 °C durante il giorno ha messo a dura prova la tenuta dell'acidità fissa. I dati suggeriscono che in queste annate la "finestra di raccolta" ottimale si restringe a pochi giorni, esaltando il ruolo chiave del tempismo della vendemmia.
- L'annata 2024 (meno calda e molto piovosa): contrariamente ai trend precedenti, l'abbondante piovosità e le temperature più moderate hanno riportato le fasi fenologiche verso date più "classiche", permettendo una maturazione più lenta e completa.

Tab.1 – valori di alcuni parametri nei tre anni recenti più critici del periodo studiato. IH: indice di Huglin; Hgt30: numero di ore con temperatura superiore a 30 °C; Hlt0: numero di ore con temperatura inferiore a 0 °C; T_{m100}: temperatura media dei primi 100 giorni; GG_g, GG_i, GG_r: giorno giuliano del germogliamento, dell'invaiaitura e della raccolta.

Tab.1 - Values of some parameters in the three most critical recent years of the period studied. IH: Huglin index; Hgt30: number of hours with temperatures above 30 °C; Hlt0: number of hours with temperatures below 0 °C; T_{m100}: average temperature of the first 100 days; GG_d, GG_i, GG_r: Julian day of budbreak, veraison, and harvest.

Anno	IH	Hgt30	Hlt0	T _{m100}	GG _g	GG _i	GG _r
2017	2366	220	0	6.1	92	214	242
2022	2661	529	5	5.0	96	216	248
2024	2358	332	0	7.6	103	231	269

Conclusioni

L'analisi integrata dei dati meteorologici e fenologici conferma che la viticoltura nel Tortonese deve evolvere verso una gestione adattativa. La correlazione tra stress termico e anticipo delle fasi fenologiche suggerisce l'adozione di strategie mirate:

1. Gestione della Chioma: è necessario riconsiderare le operazioni di cimatura. Nelle annate ad alto Hgt30, la protezione dei grappoli tramite la vegetazione è fondamentale per evitare scottature e preservare l'acidità.
2. Gestione del Suolo: l'uso di inerbimenti controllati e pacciamature può aiutare a mitigare la temperatura del suolo e a conservare l'umidità, riducendo l'impatto dei blocchi fotosintetici durante le ondate di calore.
3. Monitoraggio di Precisione: l'impiego di modelli fenologici basati su dati orari, come quelli qui presentati, permette di prevedere con maggiore accuratezza le finestre di intervento, trasformando il dato meteorologico in una leva decisionale strategica per preservare l'identità sensoriale dei vini Timorasso.

Come nota metodologica finale, si può concludere che, sebbene i dati fenologici non derivino da osservazioni dirette continue su singola parcella, l'elevata coerenza riscontrata tra gli indici termici calcolati e le simulazioni basate sulla letteratura scientifica locale conferisce al lavoro una robustezza sufficiente per la pianificazione territoriale e agronomica a scala di comprensorio.

Bibliografia

- Andreoli et al. (2019). Description and preliminary simulation with the Italian Vineyard Integrated Numerical model for Estimating physiological values (IVINE). *Agronomy* 9, 94.
- Arpa Piemonte / Regione Piemonte (2024). Annali Meteorologici e Bollettini Agrometeorologici Regionali. Disponibile su https://www.arpa.piemonte.it/rischi_naturali/
- Bock, A., et al. (2013). Past and future phenology of grapevines: a review. *Reg. Environ. Change*, 13, 111-124.
- Gladstones, J. S. (1992). Viticulture and Environment. Winetitles, Adelaide.
- Jones, G. V., et al. (2005). Climate Change and Global Wine Quality. *Climatic Change*, 73(3), 319-343.
- Keller, M. (2010). The Science of Grapevines: Anatomy and Physiology. Academic Press.
- Palliotti, A., et al. (2014). Changes in vineyard techniques to mitigate the effects of climate change. In: "Climate Change: Challenges and Opportunities in Viticulture".
- Parker, A. K., De Cortázar-Atauri, I. G., van Leeuwen, C., & Chuine, I. (2011). General phenology model for grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(7), 824-834.
- Poni, S., et al. (2006). Grapevine leaf photosynthesis: effects of light and temperature. VII International Symposium on Grapevine Physiology and Biotechnology. Rete Agrometeorologica del Piemonte (RAM), disponibile su www.sistemapiemonte.it.
- Tomasi, D., Gaiotti, F., & Jones, G. V. (2011). The Science of Pinot Bianco: Climate Change and Phenology in the Italian context.
- Tonietto, J., & Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(1-2), 81-97.

USE OF SATELLITE IMAGERY FOR CROP WATER STATUS MONITORING: A CASE STUDY ON SOYBEAN WITH PLANET AND SENTINEL-2 SATELLITES

USO DELLE IMMAGINI SATELLITARI PER IL MONITORAGGIO DELLO STATO IDRICO DELLE COLTURE: UN CASO STUDIO SULLA SOIA CON I SATELLITI PLANET E SENTINEL-2

Alessia Bado^{1,2}, Francesco Morbidini², Carlo Camarotto^{2*}, Carmelo Maucieri², Giovanni Trevisanuto³, Irene Terlizzi³, Carlo Bettanini^{3,4}, Federico Toson³, Sebastiano Chiodini^{3,4}, Giacomo Colombatti^{3,4}, Maurizio Borin²

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Architettura DICEA, Università di Padova, Padova, Italia

² Dipartimento di Agronomia, Alimenti, Risorse Naturali, Animali e Ambiente DAFNAE, Università di Padova, Legnaro (PD), Italia

³ Centro di Ateneo di Studi e Attività Spaziali "G. Colombo" CISAS, Università di Padova, Padova, Italia

⁴ Dipartimento di Ingegneria Industriale DII, Università di Padova, Padova, Italia

* carlo.camarotto@unipd.it

Abstract

This study evaluates satellite data for monitoring soybean water status under Full Irrigation (FI) and Regulated Deficit Irrigation (RDI) in 2022 and 2023. Three objectives were pursued: 1) assessing vegetation indices (NDVI, GNDVI, ENDVI, NDRE, LAI) for real-time crop health monitoring; 2) comparing PlanetScope (3 m, daily revisit, PS) with Sentinel-2 (10 m, 5-day revisit, S2) for agricultural monitoring; 3) examining trade-offs between water savings and crop performance. PS vegetation indices respond promptly to water availability changes, closely mirroring in-situ data (stomatal conductance *g_{sw}*, transpiration *T_a*, leaf temperature *T_{leaf}*) measured with LI-600. While PS provided superior precision, S2 offered highly correlated results and proved a cost-effective alternative for large-scale monitoring, though less reliable for precision agriculture. RDI, particularly in soils with higher water-holding capacity, maintained crop yields with reduced water input, representing a sustainable alternative to FI. Remote sensing technologies are practical, accessible tools for global irrigation management, supporting sustainable agricultural intensification amid climate change.

Parole chiave

Telerilevamento, Irrigazione Sostenibile, Sentinel-2, PlanetScope, Soia

Keywords

Remote Sensing, Sustainable Irrigation, Sentinel-2, PlanetScope, Soybean

Introduzione

La gestione sostenibile delle risorse idriche è sempre più critica a causa dei cambiamenti climatici, che influenzano la disponibilità d'acqua attraverso l'aumento delle temperature e le variazioni delle precipitazioni (Xiao *et al.*, 2023). Con l'aumento delle temperature e il cambiamento dei regimi pluviometrici, il settore agricolo è sottoposto a una pressione crescente per utilizzare l'acqua in modo efficiente, al fine di garantire la sicurezza alimentare (Rost *et al.*, 2008). L'agricoltura consuma circa il 70% dei prelievi globali di acqua dolce, e i metodi di irrigazione tradizionali come la *Full Irrigation* (FI), che soddisfa completamente il fabbisogno di evapotraspirazione (ET) delle colture, richiedono grandi volumi d'acqua (Wisser *et al.*, 2008). La *Regulated Deficit Irrigation* (RDI), che fornisce acqua al di sotto del fabbisogno di ET, offre un'alternativa per il risparmio idrico (Feres and Soriano, 2007). Inoltre, è dimostrato che la RDI aumenta il livello di resistenza alla siccità delle colture (Chai *et al.*, 2016); tuttavia, la sua gestione è difficile e richiede un monitoraggio preciso per evitare perdite di resa e qualità (Yang *et al.*, 2018).

Il telerilevamento satellitare consente un monitoraggio efficiente dello Stato Idrico delle Pianta (SIP) su vaste aree a intervalli frequenti (Foster *et al.*, 2020). Una tecnica molto

comune utilizzata in questo campo è il calcolo degli Indici di Vegetazione (IV) basato sulla riflettanza, che fornisce informazioni sullo SIP, sulle dinamiche di crescita e sulle condizioni di stress. Il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) descrive la densità e il grado di inverdimento della vegetazione (Traba *et al.*, 2022); il *Green NDVI* (GNDVI) cattura principalmente la concentrazione di clorofilla (Strong *et al.*, 2017); l'*Enhanced Normalized Difference Vegetation Index* (ENDVI) rileva meglio il vigore e la struttura della vegetazione (Boiarskii and Hasegawa, 2019); il *Normalized Difference RedEdge index* (NDRE) è calcolato con lo stesso rapporto dell'NDVI, ma utilizzando la lunghezza d'onda del *red-edge* al posto del rosso, rendendolo più adatto agli studi sulle fasi di crescita intermedie (Boiarskii and Hasegawa, 2019). Il telerilevamento satellitare può essere utilizzato anche per dedurre alcune proprietà biofisiche di base della copertura vegetale, come l'Indice di Area Fogliare (LAI), che rappresenta il rapporto tra la superficie totale della pagina superiore delle foglie e il suolo (Casa *et al.*, 2019). Esso determina l'intercettazione dell'acqua dalla chioma, il microclima e la radiazione riflessa, essendo quindi correlato a processi chiave della pianta come la fotosintesi e l'ET (Bréda, 2003).

Tuttavia, esistono limitazioni nelle risoluzioni spaziali e temporali dei satelliti gratuiti (come Sentinel-2, S2), che potrebbero non essere sufficienti per adottare tempestivamente misure efficaci in caso di stress idrico o di eccesso d'acqua; i satelliti ad alta risoluzione con un tempo di rivisita più frequente, come PlanetScope (PS), sono invece generalmente costosi e quindi inaccessibili per i piccoli agricoltori (Sozzi *et al.*, 2018). Questo studio indaga: (i) come gli IV riflettano la salute delle colture e i fabbisogni idrici; (ii) i compromessi tra S2 (risoluzione 10 m, rivisita ogni 5 giorni) e PS (risoluzione 3 m, rivisita giornaliera); e (iii) le prestazioni di FI e RDI nel bilanciare la resa delle colture e il risparmio idrico.

Materiali e Metodi

Area di Studio

L'area di studio era un campo di soia situato a Castelfranco Veneto (Veneto, Italia), coltivato in due distinte porzioni nel 2022 e nel 2023. Ciascun campo misurava 160×40 metri ed era suddiviso in quattro parcelle di 40×40 metri. Due parcelle erano irrigate con il regime FI e le restanti due con RDI. Analisi granulometriche, condotte su campioni di suolo prelevati nelle quattro parcelle, hanno consentito, tramite l'applicazione di specifiche funzioni di pedotrasferimento (Saxton and Rawls, 2006), di stimare la Capacità di Campo (CC), il Punto di Avvizzimento Permanente (*Wilting Point* - WP) e la Capacità Idrica Disponibile per le Pianta (*Plant Available Water Capacity* - PAWC).

Soia e strategia irrigua

Il ciclo di crescita della soia è stato monitorato con la scala BBCH, un sistema standardizzato utilizzato per codificare le fasi di crescita delle piante, che divide il ciclo di crescita in dieci fasi principali (da 0 a 9). Ogni fase può essere ulteriormente suddivisa in stadi secondari (anch'essi numerati da 0 a 9). Combinando i numeri dello stadio principale e secondario, si forma un codice a due cifre (00-99), dove 00 rappresenta la semina e 99 la raccolta (Federal Research Centre for Cultivated Plants, 1997). Sono stati quindi studiati quattro stadi principali:

- BBCH 00-19 (stadi di crescita iniziale)
- BBCH 20-59 (stadio di crescita vegetativa)
- BBCH 60-79 (stadi di fioritura e sviluppo di frutti e semi)
- BBCH 80-99 (stadi di maturazione e senescenza)

In letteratura è stata osservata una significativa riduzione della resa quando lo stress veniva applicato durante gli stadi riproduttivi iniziali della soia, dall'emergenza dell'infiorescenza (BBCH 50) all'inizio della formazione dei baccelli (BBCH 60) (Morbidity *et al.*, 2023). Per questo motivo, la strategia RDI è stata applicata in tutti gli stadi fenologici di crescita a eccezione dello stadio principale 5. Nel 2022, i volumi d'acqua applicati da FI e RDI sono stati rispettivamente di 244 mm e 189 mm, mentre nel 2023 le condizioni climatiche più favorevoli hanno consentito una riduzione dell'apporto idrico, con 161 mm e 123 mm rispettivamente per FI e RDI.

Dati meteorologici e rilevamenti in campo

I dati meteorologici sono stati raccolti da una stazione meteorologica situata a Castelfranco Veneto. Nel 2022, l'area è stata colpita da gravi condizioni di siccità, con scarse precipitazioni, in particolare nei mesi estivi. La quantità totale di pioggia è stata di 323,6 mm da maggio a ottobre. Le temperature sono state significativamente elevate per tutto il periodo di rilevamento, con temperature massime comprese tra 30 e 39°C da maggio a settembre, con diversi episodi di ondate di calore. L'umidità relativa (UR) media è variata dal 62 al 76%, risultando leggermente inferiore alla media della zona, contribuendo alle condizioni di siccità dell'anno. Condizioni più miti hanno caratterizzato il 2023, con precipitazioni cumulate più elevate (430 mm) e temperature meno estreme (con temperatura massima di 35,5°C). L'UR è stata più alta, variando dal 70% all'80%.

Le misurazioni in campo sono state eseguite utilizzando il Porometro/Fluorometro LI-600, che fornisce diverse misurazioni fogliari e ambientali. Sono stati raccolti tre parametri:

- Conduttanza stomatica (g_{sw}), che è una misura della facilità con cui i gas attraversano gli stomi, collegata al grado di apertura stomatica (Giménez *et al.*, 2023).
- Traspirazione apparente T_a , che riflette la salute e lo stadio di crescita della vegetazione.
- Temperatura fogliare T_{leaf} , che è un buon indicatore dello stress idrico della pianta: quando gli stomi si chiudono, riducono la traspirazione e il raffreddamento evaporativo, con conseguente aumento della temperatura fogliare (Gräf *et al.*, 2021).

Questi parametri sono stati utilizzati per validare i valori degli indici satellitari, verificando se gli IV potessero fornire una descrizione efficace delle condizioni di salute della soia.

Dati satellitari

La costellazione satellitare di PS comprende circa 130 satelliti *Dove*, che acquisiscono immagini giornaliere con una risoluzione di 3 metri per pixel. Sono stati impiegati i dati raccolti dai più recenti strumenti *SuperDove*: lanciati all'inizio del 2020, sono dotati del telescopio multispettrale PSB.SD, che acquisisce scene del paesaggio in otto bande spettrali. Ogni acquisizione è denominata PlanetScope Ortho Scene Product Level 3B, che rappresenta dati corretti radiometricamente, geometricamente e per il sensore, proiettati su una proiezione cartografica UTM/WGS84 (Tan *et al.*, 2023). La missione Copernicus S2 è formata da una costellazione di soli due satelliti, Sentinel-2A e Sentinel-2B, che seguono un'orbita eliosincrona con una differenza di fase di 180°, in modo che il tempo di rivisita si riduca a 5 giorni all'Equatore. Entrambi i satelliti sono dotati dello strumento multispettrale, che scompone la luce in tredici bande, con risoluzione spettrale da 10 a 60 metri. In particolare, le bande sono state scaricate come prodotto Level-2A Collection 1, che fornisce la riflettanza superficiale ortorettificata, corretta radiometricamente e

geometricamente, della parte inferiore dell'atmosfera (Pisanti *et al.*, 2022).

Cinque IV sono stati stimati da entrambi i satelliti: NDVI, GNDVI, ENDVI, NDRE e LAI. Comunemente, quest'ultimo deriva da misurazioni in campo, ma Boegh *et al.* (2001) hanno definito una relazione tra LAI e l'Indice di Vegetazione Migliorato EVI, calcolato attraverso una combinazione matematica della riflettanza nell'infrarosso, nel rosso e nel blu.

Risultati e Discussione

Gli IV calcolati dalle bande di PS sia nel 2022 che nel 2023 hanno seguito tendenze simili, con l'NDVI che si è rivelato il più sensibile alla crescita iniziale delle piante e alla senescenza. In particolare, nel 2022 tutti gli IV hanno mostrato chiare tendenze ascendenti durante la crescita vegetativa, raggiungendo il picco nella fase tardiva del ciclo di crescita della soia (BBCH 60-79) (Figura 1). Le scarse precipitazioni e le alte temperature di fine maggio e inizio giugno hanno portato a una crescita vegetativa lenta, riflessa da valori bassi in tutti gli IV; tuttavia, GNDVI ed ENDVI hanno mostrato valori più elevati rispetto all'NDVI, indicando uno sviluppo più rapido in termini di attività fotosintetica e sviluppo della chioma. Durante le fasi fenologiche BBCH 20-59, gli IV hanno mostrato un aumento costante, in particolare dopo l'inizio dell'irrigazione a giugno, sebbene la crescita sia stata rallentata dalle ondate di calore e dalle precipitazioni limitate. In questa fase, l'aumento di tutti gli IV è stato il più marcato. Il più lento aumento del LAI e dell'ENDVI, che monitorano rispettivamente lo sviluppo e la struttura della chioma, suggerisce che, sebbene l'irrigazione abbia sostenuto la crescita, il caldo estremo e la mancanza di precipitazioni abbiano rallentato il pieno sviluppo della chioma. Durante le fasi fenologiche BBCH 60-79, gli IV hanno continuato ad aumentare ma a un ritmo più lento a causa dell'aumento della temperatura, raggiungendo il loro picco alla fine di questa fase. Durante le fasi fenologiche BBCH 80-99, tutti gli IV hanno iniziato a diminuire, riflettendo la naturale senescenza della coltura. Per la maggior parte dell'anno, le parcelle FI hanno mostrato valori degli IV più elevati rispetto a quelli RDI, sebbene le differenze non fossero statisticamente significative. Una tendenza molto simile ha caratterizzato il 2023, con alcune differenze:

- Gli IV sono aumentati più rapidamente durante le fasi fenologiche BBCH 20-59 grazie alle condizioni climatiche più favorevoli dell'anno rispetto al 2022.
- Gli indici hanno iniziato a diminuire prima, in particolare dopo le fasi fenologiche BBCH 70-79, a causa di periodi di siccità e alte temperature in agosto.
- Le parcelle RDI hanno mostrato costantemente valori degli indici più elevati rispetto a quelli FI, sebbene le differenze non fossero statisticamente significative.

I parametri fisiologici misurati con LI-600 hanno seguito abbastanza fedelmente le tendenze degli IV. Nel 2022 entrambe le strategie irrigue hanno mostrato tendenze simili in g_{sw} e T_a , con FI che ha registrato costantemente prestazioni

migliori, soprattutto durante lo stress da siccità. Le piante gestite con FI hanno mostrato maggiore resilienza e traspirazione, con conseguenti temperature fogliari più basse nelle fasi di crescita avanzate. Tuttavia, la T_{leaf} è risultata generalmente simile tra i trattamenti. Nel 2023, g_{sw} e T_a sono stati influenzati dalla temperatura e dalle precipitazioni, con RDI che ha mostrato valori di g_{sw} leggermente più elevati nel complesso. La traspirazione in FI è stata costantemente superiore a quella in RDI, sebbene le fluttuazioni della T_{leaf} siano state simili tra i trattamenti. Le piante gestite con la RDI hanno mostrato nel complesso una migliore salute nonostante le lievi differenze.

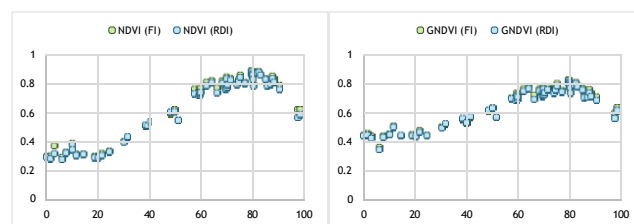


Fig. 1 - Andamenti di NDVI e GNDVI nel 2022, in relazione allo stadio BBCH (asse x).

Fig. 1 - NDVI and GNDVI trends in 2022, relative to the BBCH stage (x axis).

Gli IV calcolati con S2 si allineano alla tendenza di quelli di PS con coefficienti di correlazione molto elevati, ma risultano costantemente sottostimati. L'analisi statistica ha rivelato che le differenze tra i dati PS e S2 sono statisticamente significative per ciascun indice in entrambi gli anni, con ENDVI che presenta la differenza media più elevata ($R^2 = 0,69$ nel 2022) e NDRE che presenta la differenza minore (con $R^2 = 0,97$ in entrambi gli anni).

Infine, sono stati misurati i principali parametri agronomici (resa in granella, produzione di biomassa, Efficienza d'Uso dell'Acqua (EUA), contenuto di olio e contenuto proteico della granella) per valutare la diversa risposta della soia a FI e RDI. Nel 2022, FI ha mostrato una resa più elevata (3.447,2 kg/ha) ma una EUA inferiore (6,9 kg/ha/mm) rispetto a RDI (3.289,4 kg/ha; 7,4 kg/ha/mm). Nella granella, la RDI ha determinato un maggiore contenuto di olio (21,3%) ma un minore contenuto proteico (41,8%) rispetto a FI (20,7%; 43,1%). Nel 2023, RDI ha superato FI in termini di resa e EUA (2.691,1 kg/ha e 5,1 kg/ha/mm contro 2.528,8 kg/ha e 4,5 kg/ha/mm), con una produzione di biomassa simile tra i trattamenti e un contenuto di olio della granella leggermente superiore in RDI. Tuttavia, il contenuto proteico è rimasto più elevato in FI. Nonostante queste differenze, l'analisi statistica non ha rivelato vantaggi significativi tra i due trattamenti irrigui in nessuno dei due anni.

Sulla base dei risultati di entrambe le stagioni, è evidente che PS fornisce informazioni preziose sulla crescita delle piante, sull'accumulo di biomassa e sulle condizioni di stress. Gli indici sono stati in grado di catturare le principali tendenze di crescita nei diversi trattamenti irrigui, riflettendo le differenze nella copertura della chioma, nell'attività fotosintetica e nel contenuto di clorofilla durante i diversi stadi di crescita della soia e tra FI e RDI. Inoltre, gli IV hanno

riflesso adeguatamente la risposta delle piante agli apporti irrigui e alle precipitazioni, nonché alle variazioni di temperatura e alle condizioni di siccità particolarmente marcate. La prolungata siccità del 2022, con precipitazioni molto scarse e temperature particolarmente elevate, ha ostacolato la crescita degli IV, in particolare in termini di contenuto di clorofilla, attività fotosintetica e struttura della chioma. La crescita è stata in gran parte sostenuta dall'irrigazione, sebbene meno definita e marcata rispetto al clima più moderato del 2023. Quando le precipitazioni si sono verificate dopo il prolungato periodo di siccità, gli IV hanno mostrato un rapido aumento, dimostrando la capacità delle immagini satellitari di catturare significativi cambiamenti nello SIP. Al contrario, nel 2023 gli IV sono partiti da valori già più elevati e hanno raggiunto picchi maggiori, riflettendo le temperature più miti e le precipitazioni più frequenti nel corso della stagione.

Il confronto tra i dati satellitari Sentinel e Planet rivela differenze notevoli nelle loro prestazioni nei vari indici di vegetazione, principalmente determinate dalle loro distinte risoluzioni spaziali e temporali, nonché dalle differenze nelle metodologie di elaborazione dei dati. Sentinel, con la sua risoluzione spaziale più grossolana (10 m) e la minore risoluzione temporale (5-10 giorni), sottostima costantemente i valori rispetto a Planet, che offre una risoluzione spaziale più fine (3 m) e riviste più frequenti (giornaliere). Questi errori sistematici potrebbero essere collegati alla risoluzione spaziale e temporale più grossolana di S2, che potrebbe non riuscire a catturare la variabilità dettagliata della chioma delle colture rilevata dai sensori ad alta risoluzione di PS. Ciononostante, gli elevati coefficienti di correlazione tra gli stessi IV misurati da PS e S2 suggeriscono che entrambi forniscono informazioni preziose sulle dinamiche della vegetazione su larga scala nel tempo. Sebbene esistano differenze nei valori assoluti, le tendenze generali rimangono coerenti su entrambe le piattaforme, rendendole entrambi strumenti adatti al monitoraggio delle colture e alla loro gestione irrigua. Pertanto, Sentinel si è rivelato comunque adeguato per monitorare lo stato idrico generale delle piante, sebbene i suoi valori assoluti necessitino di una certa calibrazione per poter essere utilizzati come base per le decisioni irrigue.

I risultati in termini di strategia irrigua (FI vs RDI) mostrano che FI ha generalmente prodotto valori più elevati nei principali IV nel 2022, ma nel 2023 RDI ha superato FI nella maggior parte degli indici nonostante abbia ricevuto meno acqua. Questo cambiamento è stato attribuito alla maggiore PAWC dei suoli nelle parcelle RDI, che hanno trattenuto il 43% di acqua in più, mitigando gli effetti della ridotta irrigazione e consentendo alle piante RDI di ottenere buone prestazioni nonostante i minori apporti idrici. Questi risultati sono ben rispecchiati dai parametri fisiologici misurati con LI-600, che suggeriscono una migliore adattabilità di RDI allo stress idrico nel 2023. Sebbene la resa, l'EUA e i parametri qualitativi differissero tra le due strategie, tali differenze non erano statisticamente significative. Nel complesso, RDI è emersa come una promettente strategia di risparmio idrico, specialmente nei suoli ad alta ritenzione idrica, offrendo rese competitive e una migliore EUA senza

compromettere la produttività, mentre FI ha sostenuto costantemente un maggiore contenuto proteico e rese più elevate nel 2022.

Conclusioni

Questo studio esplora la relazione tra la gestione dell'irrigazione e le risposte fisiologiche delle piante, sottolineando il valore dell'integrazione degli IV satellitari con i dati rilevati in campo per il monitoraggio dello stato idrico delle colture. Gli IV si sono dimostrati efficaci nel catturare le dinamiche di crescita, l'attività fotosintetica e le condizioni di stress, mostrando un'elevata sensibilità agli eventi irrigui e alle variazioni climatiche. I dati satellitari hanno integrato le misurazioni in campo, colmando le lacune nei dati di campo e migliorando il processo decisionale per la gestione irrigua della coltura.

Lo studio ha confrontato i dati S2 e PS, evidenziando i compromessi tra risoluzione spaziale e temporale, accuratezza e costo. La risoluzione più fine e le riviste giornaliere di PS hanno offerto informazioni dettagliate, ma a costi più elevati, rendendolo adatto ad applicazioni di precisione. I dati gratuiti a risoluzione più grossolana di S2 sono più indicati per il monitoraggio su larga scala, nonostante una certa sottostima degli IV.

Il confronto tra FI e RDI ha evidenziato il potenziale di RDI nel ridurre il consumo idrico senza significative perdite di resa, specialmente in condizioni favorevoli di suolo e clima. Sebbene RDI sia risultata leggermente meno robusta in condizioni di stress, ha superato FI in condizioni favorevoli, sottolineando l'importanza di adattare le strategie irrigue al contesto pedologico e ambientale.

I risultati suggeriscono RDI come un'alternativa valida per un'agricoltura sostenibile, in particolare nelle regioni con scarsità d'acqua, e sottolineano l'importanza di affinare gli indici derivati da satellite per la gestione irrigua in tempo reale. L'ampliamento della ricerca a colture e ambienti diversi e lo sviluppo di strumenti economicamente accessibili per gli agricoltori su piccola scala saranno fondamentali per affrontare le sfide idriche globali e garantire la sicurezza alimentare di fronte ai cambiamenti climatici.

Bibliografia

- Boiarskii B. & Hasegawa H. (2019). Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences. In *International Conference on Applied Science, Technology and Engineering*.
- Bréda N. J. J. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany*, vol. 54, no. 392, pp. 2403-2417.
- Casa R., Upreti D. & Pelosi F. (2019). Measurement and estimation of leaf area index (LAI) using commercial instruments and smartphone-based systems. In *1st Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (METROAGRIFOR)*.
- Chai Q., Gan Y., Zhao C., Xu H. L., Waskom R. M., Niu Y. & Siddique K. H. (2016). Regulated Deficit Irrigation for

- crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 36, no. 3.
- Federal Research Centre for cultivated Plants (1997). Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. [Online]. www.julius-kuehn.de/media/Veroeffentlichungen/bbch%20epaper%20en/page.pdf. [Accessed 2024 10 02].
- Fereres E. & Soriano M. A. (2007). Deficit Irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, vol. 58, 2, pp. 147-159.
- Foster T., Mieno T. & Brozović N. (2020). Satellite - Based Monitoring of Irrigation Water Use: Assessing Measurement Errors and Their Implications for Agricultural Water Management Policy. *Water Resources Research*, vol. 56, no. 11.
- Giménez C., Gallardo M. & Thompson R. (2005). Plant-Water Relations. In *Encyclopedia of Soils in the Environment*, New York, Academic Press, pp. 231-238.
- Gräf M., Immitzer M., Hietz P. & Stangl R. (2021). Water-Stressed Plants Do Not Cool: Leaf Surface Temperature of Living Wall Plants under Drought Stress. *Sustainability*, vol. 13, no. 7, p. 3910.
- Morbidini F., Wilfredo B. Jr., Zanin G., Verdi L., Camarotto C., Ghinassi G., Maucieri C., Dalla Marta A. & Borin M. (2023). The state of the art on deficit irrigation in soybean. *Irrigation and Drainage*, pp. 1-13.
- Pisanti A. Magrì, S., Ferrando I. & Federici B. (2022). Sea water turbidity analysis from Sentinel-2 images: atmospheric correction and bands correlation. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vols. XLVIII-4, no. W1- 2022, pp. 371-378.
- Rost S., Gerten D., Bondeau A., Lucht W., Rohwer J. & Schaphoff S. (2008). Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. *Water Resources Research*, vol. 44, 9.
- Saxton K. E. & Rawls W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.
- Sozzi M., Marinello F., Pezzuolo A. & Sartori L. (2018). Benchmark of Satellites Image Services for Precision Agricultural Use. In *European Society of Agricultural Engineers 2018*, Wageningen, Netherlands.
- Strong C. J., Burnside N. G. & Llewellyn D. (2017). The potential of small-Unmanned Aircraft Systems for the rapid detection of threatened unimproved grassland communities using an Enhanced Normalized Difference Vegetation Index. *PLoS ONE*, vol. 12, no. 10, e0186193.
- Tan J., Ding J., Han L., Ge X., Wang X., Wang J., Wang R., Qin S., Zhang Z. & Li Y. (2023). Exploring PlanetScope Satellite Capabilities for Soil Salinity Estimation and Mapping in Arid Regions Oases. *Remote Sensing*, vol. 15, no. 4, p. 1066.
- Traba J., Gómez-Catasús J., Barrero A., Bustillo-de la Rosa D., Zurdo J., Hervás I., Pérez-Granados C., García de la Morena E. L., Santamaria A. & Reverter M. (2022). Comparative assessment of satellite- and drone-based vegetation indices to predict arthropod biomass in shrub-steppes. *Ecological Applications*, vol. 32, no. 8, p. 2707.
- Wisser D., Froking S., Douglas E. M., Fekete B. M., Vörösmarty C. J. & Schumann A. H. (2008). Global irrigation water demand: Variability and uncertainties arising from agricultural and climate data sets. *Geophysical Research Letters*, vol. 35, 24.
- Xiao F., Wang X. & Fu C. (2023). Impacts of land use/land cover and climate change on hydrological cycle in the Xiaoxingkai Lake Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 47.
- Yang H., Liu H., Zheng J. & Huang Q. (2018). Effects of regulated deficit irrigation on yield and water productivity of chili pepper (*Capsicum annuum* L.) in the arid environment of Northwest China. *Irrigation Science*, vol. 36, pp. 61-74.

ASSESSMENT OF VITICULTURAL SUITABILITY IN THE OLTREPÒ PAVESE: A MULTISCALE APPROACH UNDER DIFFERENT CLIMATE SCENARIOS

VALUTAZIONE DELL'ATTITUDINE ALLA VITICOLTURA NELL'OLTREPÒ PAVESE: INTEGRAZIONE DI ANALISI MULTISCALE IN DIVERSI SCENARI CLIMATICI

Uta Biino¹, Federico Amari¹, Vanna Sale Maria¹, Eliana Tonelli¹, Lorenzo Craveri^{1*}, Valentina Mereu³, Antonio Trabucco³, Marta Debolini³, Serena Marras³, Emanuela Serra³, Donatella Spano³, Massimiliano Bordonì², Amin Ghezavati Nezhad², Claudia Meisina²

¹ ERSAF-Regione Lombardia

² Università di Pavia

³ Fondazione CMCC

* lorenzo.craveri@ersaf.lombardia.it

Abstract

This study presents the activities developed within the NODES project (<https://ecs-nodes.eu/il-progetto>), funded by the Italian Ministry of University and Research (MUR) through the National Recovery and Resilience Plan (PNRR). The activities are part of the Flagship Project VINO “Vineyard management for viNeprOduction”, which promotes research on sustainable innovation supported by the digitalization of the wine sector, with the primary objective of developing new solutions and readapting existing practices to cope with the effects of climate change in viticulture. The University of Pavia, responsible for climatic and overall suitability assessment, with the operational involvement of ERSAF (soil and topographic components) and the contribution of the Euro-Mediterranean Center on Climate Change (CMCC) (data provision), developed an integrated methodology for the assessment of land suitability for viticulture and supplementary crops. The project led to the production of suitability maps at the macroscale through the integration of bioclimatic, pedological, and geomorphological parameters. The suitability maps obtained for the study area (Oltrepò Pavese) enhanced the understanding of viticultural suitability under current climatic conditions and future climate scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5 for the reference periods 2021–2050 and 2036–2060), providing insights into the potential implications of climate change for modern viticulture. The study is part of a broader research framework aimed at developing decision-support tools for crop planning and the adaptation of viticultural practices to climate change.

Parole chiave

Cambiamento climatico, Indici bioclimatici, Attitudine viticola, Lombardia, Conoscenza, Monitoraggio, Pianificazione

Keywords

Climate change, Bioclimatic indices, Vineyard suitability, Lombardy, Knowledge, Monitoring, Planning

Introduzione

Il presente lavoro si inserisce nell'ambito del progetto NODES, e in particolare del Flagship Project VINO, con il contributo del CMCC nella fornitura di informazioni bioclimatiche per l'analisi degli impatti dei cambiamenti climatici su vigneti e altre colture, caratterizzate da elevata risoluzione spaziale e temporale. Gli indicatori bioclimatici sono derivati da variabili atmosferiche provenienti da proiezioni climatiche basate su downscaling dinamico di modelli climatici regionali prodotti dal CMCC.

Lo studio nasce nell'ambito dell'elevato interesse produttivo e territoriale per la viticoltura dell'Oltrepò Pavese, una delle principali aree vitate della Lombardia a forte vocazione DOC e DOCG, e dalla necessità di affrontare le crescenti criticità legate ai cambiamenti climatici che stanno influenzando in modo significativo la sostenibilità e la competitività del settore vitivinicolo. In questo contesto, l'analisi dei punti di forza e delle potenzialità produttive del territorio richiede strumenti

conoscitivi integrati in grado di supportare le scelte di pianificazione e adattamento del comparto agricolo.

Lo studio integra indicatori bioclimatici, pedologici e topografici riferiti all'area collinare e montana dell'Oltrepò Pavese, con l'obiettivo di elaborare una mappa sintetica di attitudine alla viticoltura nelle condizioni climatiche attuali e in diverse proiezioni climatiche. La vocazionalità culturale è definita come il grado di corrispondenza tra caratteristiche del territorio e requisiti agronomici della coltura, secondo la metodologia della Land Suitability Classification (FAO, 1976).

L'analisi è stata sviluppata mediante GIS (Geographic Information System), software informativo per l'acquisizione, gestione, analisi e rappresentazione di dati spaziali, e attraverso un approccio di valutazione multicriteriale (MCE). Il metodo adottato si basa sul framework della Land Suitability Classification (LSC) della FAO, integrato con il modello proposto dall'Università di Sassari e dal CMCC, che considera tre macro-fattori: clima, suolo e topografia.

Ciascun macro-fattore è descritto da un insieme di parametri classificati secondo le classi LSC (S1, S2, S3, N1, N2) e pesati in funzione della loro rilevanza relativa, con normalizzazione tale che la somma dei pesi per ciascun macro-fattore sia pari a uno. L'integrazione dei fattori avviene mediante somma pesata dei punteggi associati ai singoli parametri.

La combinazione dei tre macro-fattori ha consentito di approfondire la conoscenza dell'attitudine viticola a scala macroscopica, fornendo una base conoscitiva per la comprensione delle dinamiche territoriali e per il supporto alle decisioni in ambito agricolo in condizioni di crescente variabilità climatica.

In questo lavoro ERSAF ha effettuato la valutazione attitudinale per le componenti suolo e topografia, mentre il Dipartimento di Scienze della terra e dell'ambiente dell'Università di Pavia ha provveduto a integrare l'analisi climatica per ottenere le mappe di attitudine complessiva.

Materiali e Metodi

Le prime analisi del progetto sono state fatte sulla scelta degli indicatori da utilizzare per lo sviluppo della carta della vocazione viticola dell'Oltrepò Pavese. Il criterio scelto è ricaduto su quello di un "Processo Decisionale Multicriterio" (MCDM), con l'obiettivo di integrare i principali fattori rilevanti per la coltivazione della vite. I fattori individuati sono di tipo climatico, pedologico e topografico (fig. 1)

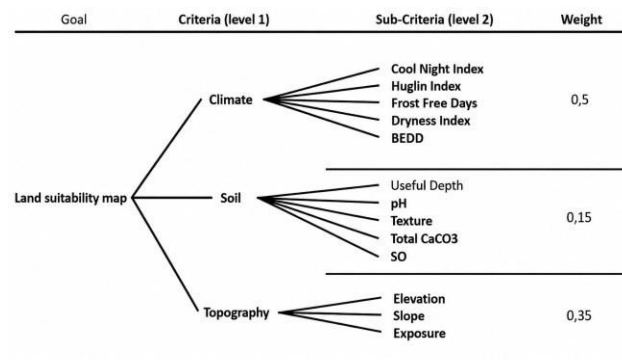


Fig. 1 - Indicatori bioclimatici, pedologici e topografici, con i relativi pesi dei singoli macrofattori, individuati per la produzione delle mappe di attitudine del territorio dell'Oltrepò Pavese.

Fig.1 - Bioclimatic, pedological, and topographic indicators, with the relative weights of the individual macrofactors, selected for the production of suitability maps of the Oltrepò Pavese territory.

ERSAF in particolare ha sviluppato le “Mappe di idoneità alle condizioni climatiche reali a macroscale” a partire dalla Carta delle Unità delle Terre (UdT) prodotta a scala semi-dettagliata per l'intero Oltrepò nell'ambito di questo progetto. Questa mappa si basa sulle precedenti analisi territoriali prodotte nel corso degli anni da ERSAF, in particolare sui “Suoli dell'Oltrepò Pavese” con una scala di dettaglio 1:50000 (suoli di pianura e di bassa collina) e

sulla “Carta dei suoli della Lombardia” in scala 1:250000 (panoramica regionale a risoluzione inferiore), che copre l'intera area dell'Oltrepò pavese (alta collina e montagna). Le aree mappate in scala 1:250000 sono state raggruppate in base ad attributi fisiografici (principalmente altitudine e pendenza), tipologia di substrato, presenza e intensità di instabilità idrogeologica e uso del suolo predominante. Queste classificazioni sono state poi arricchite da ulteriori profili pedologici prelevati e descritti nelle zone collinari e montane, al fine di approfondire la comprensione dei suoli che definiscono ciascuna *Unità Tipologica di Suolo* (UTS) e delle proprietà che ne influenzano l'idoneità alla viticoltura e ad altre colture. Da ciascun orizzonte genetico del profilo, registrato sul campo mediante descrizione macro-morfologica, sono stati prelevati campioni di suolo disturbato e sottoposti ad analisi di laboratorio per i principali parametri fisico-chimici (frazioni di terra fine, pH, carbonato di calcio totale e attivo, carbonio totale e carbonio organico, capacità di scambio cationico e basi scambiabili, conducibilità elettrica, azoto totale, fosforo assimilabile e metalli pesanti come rame e nichel).

La selezione dei profili ha tenuto conto della variabilità delle Unità Tipologiche di Suolo (UTS) precedentemente mappate e dell'attuale uso del suolo. Sono state escluse le aree boschive, che coprono ampiamente le quote più elevate dell'Oltrepò Pavese, così come le pianure e le colline inferiori, già oggetto di rilievo semi-dettagliato. I nuovi dati hanno permesso di definire nove ulteriori Unità Tipologiche di Suolo, che coprono la maggior parte del territorio collinare e montuoso non boscato. Le pianure, le colline più basse e le aree boschive sono descritte dalle Unità Tipologiche del Suolo (UTS) esistenti, già mappate in scala 1:250.000, mentre per le pianure sono disponibili informazioni più dettagliate grazie alla mappa in scala 1:50.000. Le campagne di rilevamento sul campo condotte nell'ambito del progetto NODES, inizialmente tramite perforazioni e successivamente mediante scavi e descrizione dei profili menzionati, hanno rivelato una notevole uniformità nelle caratteristiche del suolo.

Questa omogeneità deriva dalla litologia ricca di marna e argilla del materiale parentale e dalla naturale suscettibilità della regione all'instabilità idrogeologica, esacerbata nel tempo dall'abbandono agricolo e dai cambiamenti climatici in atto. Questi fattori determinano una frequente erosione, con conseguente continuo ringiovanimento dei suoli.

I suoli osservati mostrano scarse o nulle evidenze di sviluppo pedogenetico o di differenziazione dal materiale parentale, raggruppandosi in una gamma limitata di classi di tessitura, reazione (pH), contenuto di carbonati e altre proprietà che influenzano la qualità, come la profondità utile, la capacità di scambio cationico e la saturazione in basi. Di conseguenza, i fattori fisiografici determinano in modo preponderante l'idoneità del terreno a diversi usi, prevalendo sui criteri pedologici.

Nella redazione della mappa UdT – che costituisce la base per la valutazione dell'idoneità del suolo alla viticoltura o ad usi alternativi del territorio – è stata preservata la

struttura della carta pedologica in scala 1:250000. Nelle zone montuose dell'Oltrepò Pavese sono stati integrati i dati di nuova acquisizione, mentre per le pianure settentrionali, le colline inferiori e i settori montani già rilevati è stata mantenuta la struttura UdT esistente.

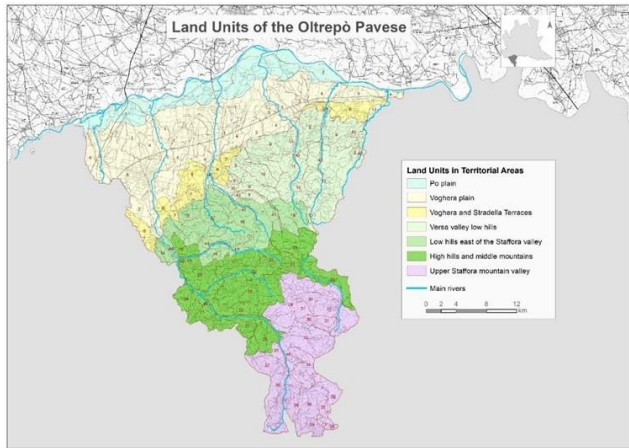


Fig. 2 - Mappe delle Unità delle Terre dell'Oltrepò Pavese

Fig. 2 - Maps of the Land Units of the Oltrepò Pavese

Università di Pavia ha sviluppato le mappe di attitudine climatica, previa classificazione, pesatura e integrazione delle rappresentazioni degli indicatori bioclimatici elaborate dal CMCC (Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici).

- Indice delle Notti Fresche (CNI-Cool Night Index)
- Indice di Huglin (HI)
- Giorni Liberi dal Gelo (FFD-Frost Free Days)
- Indice di Secchezza (DI -Dryness Index)
- Gradi Giorno Biologicamente Efficaci (BEDD - Biologically Effective Degree Days)

L'analisi è stata fatta su serie storiche di dati climatici (ultimi 30 anni) disponibili con una risoluzione di 2 km per tutto il territorio italiano (proiezioni CMCC), e successivamente per le proiezioni a 2 km di risoluzione, per le condizioni climatiche future, sono stati utilizzati gli scenari RCP (Representative Concentration Pathways) dell'IPCC che cercano di configurare i futuri cambiamenti climatici secondo diversi livelli di emissioni di gas serra e forzante radiativo. Nello specifico sono stati utilizzati gli scenari RCP 4.5 e 8.5 con due transetti: 2021-2050 e 2036-2065. Come riportato nel precedente capitolo, ciascun macro-fattore è stato descritto mediante un insieme di parametri classificati secondo le classi LSC (S1, S2, S3, N1, N2) e ponderati in funzione della loro rilevanza relativa, con normalizzazione tale che la somma dei pesi all'interno di ciascun macro-fattore fosse pari a uno. L'integrazione dei fattori è stata effettuata mediante somma pesata dei punteggi associati ai singoli parametri. I macro-fattori (climatico, pedologico e topografico) sono stati successivamente combinati nella valutazione dell'idoneità complessiva attraverso un'ulteriore

ponderazione, che tiene conto del contributo relativo di ciascun macro-fattore alla suitability totale (idoneità complessiva), come riportato in Fig 1. La combinazione finale ha permesso di derivare un indice sintetico di attitudine viticola a scala territoriale.

Risultati e Discussione

La mappa finale di idoneità totale è stata ottenuta integrando i fattori climatici, pedologici e topografici in una rappresentazione sintetica dell'attitudine viticola dell'Oltrepò Pavese nelle condizioni climatiche attuali, e ci ha permesso (1991–2020) di individuare i seguenti risultati:

S1 (Altamente idoneo): 0.00%

S2 (Idoneo): 18.18%

S3 (Moderatamente idoneo): 75.76%

N1 (Attualmente non idoneo): 6.06%

N2 (Permanentemente non idoneo): 0.00%

I risultati evidenziano una netta prevalenza della classe S3, che interessa la maggior parte del territorio, indicando condizioni generalmente sub-ottimali e la presenza diffusa di limitazioni ambientali per la viticoltura.

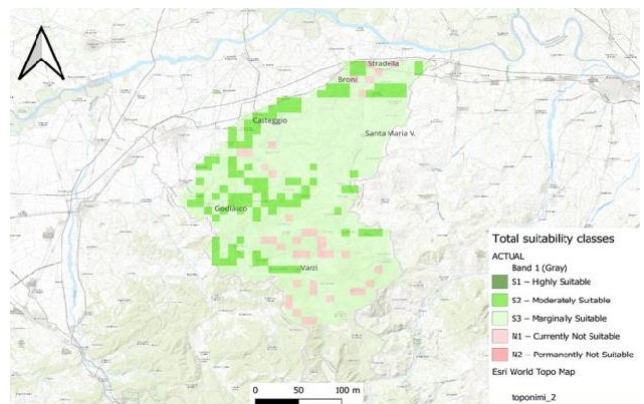


Fig. 3 - Idoneità Totale nelle attuali condizioni climatiche (1991-2020)

Fig. 3 - Total Suitability at current climatic condition (1991-2020)

È importante sottolineare che la classe S3 non identifica aree non vocate alla viticoltura di qualità, ma piuttosto contesti in cui, sulla base dei parametri considerati, sono presenti vincoli che possono essere comunque superati attraverso adeguate pratiche agronomiche, scelte culturali mirate e il know-how gestionale degli operatori agricoli. Una quota minore dell'area ricade in classe S2, corrispondente a settori caratterizzati da condizioni relativamente più favorevoli e quindi da un potenziale viticolo più elevato.

Prendendo ora in esame singolarmente la mappa della sola Idoneità Climatica, le analisi condotte hanno evidenziato che l'Oltrepò Pavese si trova in una situazione di idoneità climatica che rientra nelle classi di idoneità moderata e marginale per la viticoltura nelle attuali condizioni

climatiche. L'analisi GIS del raster climatico finale indica la seguente distribuzione riportata nella successiva figura.

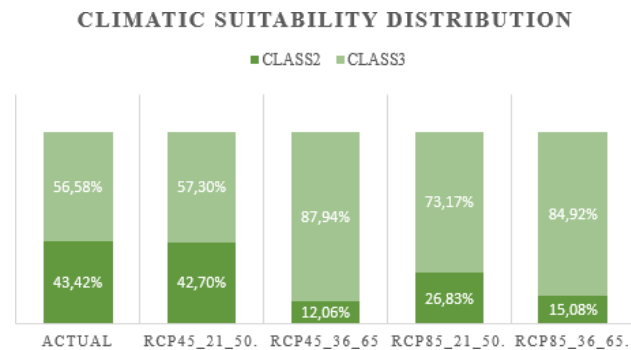


Fig. 4 - Distribuzione delle classi di Idoneità Climatica attuale e degli scenari futuri

Fig. 4 - Distribution of current Climate Suitability classes and future scenarios

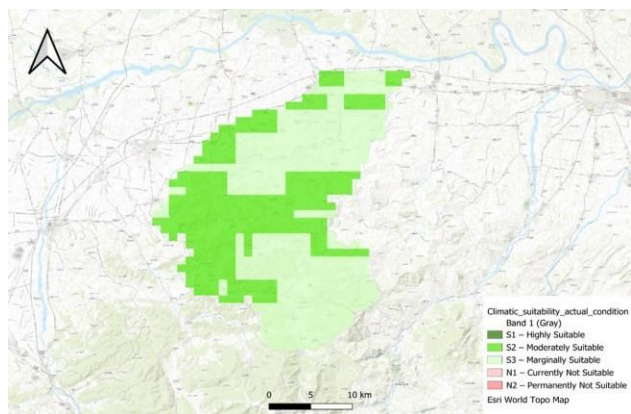


Fig. 5 - Idoneità climatica alle condizioni attuali (1991-2020)

Fig. 5 - Climatic suitability at the current climatic condition (1991-2020)

Secondo i diversi scenari climatici, a partire dalle condizioni attuali, la maggior parte dell'Oltrepò Pavese rientra attualmente nella classe S3 (Marginalmente Idonea; 56,58%), mentre la restante area è classificata come S2 (Idonea; 43,42%). Nessuna area è mappata come S1 (Altamente Idonea), N1 (Attualmente Non Idonea) o N2 (Permanentemente Non Idonea), secondo la classificazione FAO che individua S1, S2 e S3 come classi idonee, mentre N1 non ottimale e N2 come inadatta. Questa distribuzione suggerisce che i siti con regimi termici relativamente equilibrati e periodi senza gelo adeguati tendono a occupare la categoria S2 (idonea), mentre più della metà del territorio rimane in S3 (marginalmente idonea), riflettendo vincoli climatici moderati ma gestibili. L'assenza di aree N1 indica che, nello scenario attuale, le restrizioni climatiche non sono sufficientemente severe da precludere completamente la viticoltura. Nel complesso, questi risultati sottolineano l'importanza di un adattamento mirato e di pratiche sito-specifiche, in particolare nelle aree S3 e ai margini di S2, per valorizzare il potenziale viticolo dell'Oltrepò Pavese

nelle attuali condizioni climatiche. Le proiezioni climatiche relative ai diversi scenari futuri analizzati mostrano inoltre una coerenza nel segnale di cambiamento, confermando in modo generalizzato un incremento della classe S3 a scapito delle classi più favorevoli. A titolo esemplificativo, nello scenario climatico RCP 8.5 dell'IPCC (2036–2065) si conferma il trend osservato negli altri scenari considerati (vedi figura 4), con un aumento della classe S3 (moderatamente idonea), che raggiunge l'84,92%.

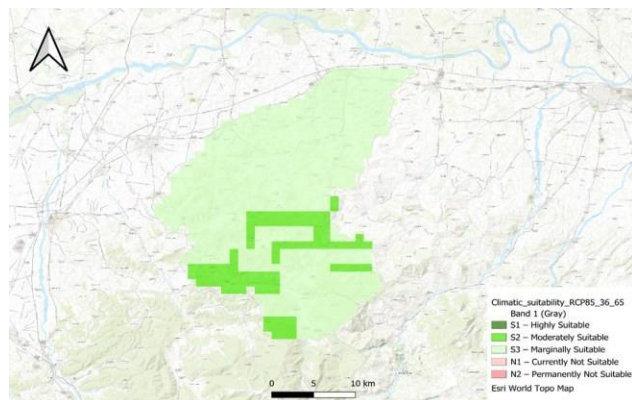


Fig. 6 - Idoneità climatica nello scenario RCP 8.5 (2036-2065)

Fig. 6 - Climatic suitability in the RCP 8.5 scenario (2036-2065)

La figura 7 riporta a confronto la ripartizione areale delle classi di idoneità della idoneità totale per tutti gli scenari climatici considerati raffrontati con le condizioni attuali. Si nota che le proiezioni con una maggiore percentuale di N1 si presentano per gli scenari RCP45_36_65, e RCP85_36_65.

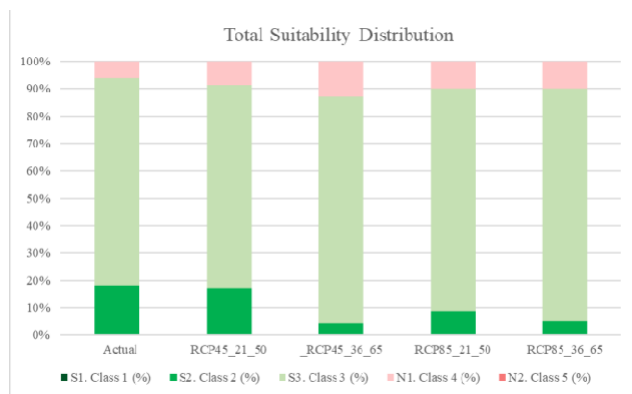


Fig. 7 - Distribuzione delle classi di Idoneità Totale attuale e degli scenari futuri

Fig. 7 - Distribution of current Total Suitability classes and future scenarios

Conclusioni

Nel commentare i risultati del progetto è utile evidenziare, per una corretta interpretazione dell'attitudine alla viticoltura nel territorio oggetto di indagine, che

l'obiettivo di tale studio è stato di evidenziare quelle che fossero le condizioni favorevoli o potenzialmente limitanti per una coltura altamente tollerante come la vite. In questo contesto, i risultati hanno mostrato come i fattori fisiografici e morfologici assumano un ruolo spesso prevalente rispetto alla variabilità strettamente pedologica, fortemente condizionata dall'omogeneità litologica dei substrati e dai processi erosivi diffusi. La naturale suscettibilità del territorio dell'Oltrepò Pavese all'instabilità idrogeologica, accentuata dagli effetti dei cambiamenti climatici attesi e dall'abbandono di alcune aree agricole, rappresenta infatti un elemento determinante nella definizione della vocazionalità viticola. L'approccio adottato, sviluppato a scala macroscopica, consente pertanto di individuare tendenze territoriali generali e aree maggiormente vocate o vulnerabili, costituendo una base conoscitiva utile per successive analisi di maggiore dettaglio a scala aziendale o di sito specifico.

Bibliografia

Adinolfi, M., Raffa, M., Reder, A. et al. Investigation on potential and limitations of ERA5 Reanalysis downscaled on Italy by a convection-permitting model. *Clim Dyn* 61, 4319–4342 (2023) <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06803-w>

Blanco-Ward, D., Queijeiro, J. G., & Jones, G. V. (2007). Spatial climate variability and viticulture in the Miño River Valley of Spain. *VITIS-GEILWEILERHOF*, 46(2), 63.

Bordoni, M., Gambarani, A., Giganti, M., Vivaldi, V., Rossi, G., Bazzano, P., Meisina, C., 2025. Present and projected suitability of olive trees in a currently marginal territory in the face of climate change: a case study from N-Italy. *Sustainability* 17, 1949. <https://doi.org/10.3390/su17051949>

Bucchignani, E., Montesarchio, M., Zollo, A.L., Mercogliano, P. (2016). High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century. *Int Journal Climatology* 36(2), 735–756. <https://doi.org/10.1002/joc.4379>.

ERSAF (2004). Carta dei suoli della Lombardia – scala 1:250.000.

ERSAL (2001). I suoli dell'Oltrepò Pavese – scala 1:50.000

FAO (1976). A framework for land evaluation; Chapter 3: Land suitability classifications. <https://www.fao.org/4/x15310e/x5310e00.htm>.

Giorgi, F. (1990). Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climate*, 3(9), 941-963.

Hersbach, H. et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Huglin, M. P. (1978). Nouveau mode d'évaluation des possibilités heliothermiques d'un milieu viticole [climatologie]. *Comptes rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France*, 64.

IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria. https://wrb.isric.org/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf.

McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and forest meteorology*, 87(4), 291-300.

Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., ... & Leung, R. (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of geophysics*, 53(2), 323-361.

Raffa, M., Adinolfi, M., Reder, A. et al. Very High-Resolution Projections over Italy under different CMIP5 IPCC scenarios. *Sci Data* 10, 238 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02144-9>

Raffa, M., Reder, A., Marras, G. F., Mancini, M., Scipione, G., Santini, M., Mercogliano, P. (2021). VHR-REA_IT Dataset: Very High-Resolution Dynamical Downscaling of ERA5 Reanalysis over Italy by COSMO-CLM. *Data* 6(8), 88. <https://doi.org/10.3390/data6080088>.

Thornthwaite, C. W., & Mather, J. R. (1951). The role of evapotranspiration in climate. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 3, 16-39.

Tonietto, J., & Carbonneau, A. (2004). A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and forest meteorology*, 124(1-2), 81-97.

US Department of Agriculture – Natural Resources Conservation Service (2022). Keys to Soil taxonomy <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>.

THERMOPLUVIOMETRIC ANALYSIS OF THE STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL, FROM 2000 TO 2025: OVER TWO DECADES OF CLIMATE DATA

LA PORTATA ONLINE DELL'AGROMETEOROLOGIA NELLA GESTIONE E NELLA RESILIENZA DELL'AGRICOLTURA DI FRONTE AGLI SCENARI DI CAMBIAMENTO CLIMATICO

Orivaldo Brunini ^{(1)*}, Angelica Prael-Pantano ⁽²⁾, Antoniane Arantes O Roque⁽³⁾, Paulo Cesar Reco⁽⁴⁾, Andrew Patrick Ciarelli Brunini⁽¹⁾, Surender D. Singh⁽⁵⁾

(1) Fundação de Apoio à Pesquisa Agrícola-FUNDAG-Campinas- Brazil

(2) Instituto Agrônomo de Campinas-IAC-SAA- Campinas -Brazil

(3) Diretoria de Assistência Técnica Integral-CATI-SAA-Campinas-Brazil

(4) AptaRegional-SAA-Diretoria de Pesquisa dos Agronegócios- Campinas-Brazil

(5) Haryana Agricultural University-Haryana-India

* diretoria.presidencia@fundag.bra

Abstract

Climatic characteristics and their variability have been gradually increasing in intensity, as well as in number. In the state of São Paulo, Brazil, several anomalies and adversities have affected all sectors of society. Of these, agriculture is one of the most affected sectors, both by thermal extremes and periods of drought or excess water. Considering the distinct edaphoclimatic characteristics of the state of São Paulo, the Integrated Agrometeorological Information Center - CIIAGRO was created, which coordinates and analyzes meteorological data from an automated network of more than 220 locations in the state. This portal, www.ciiagro.org.br allows online access and product generation, evaluating past and current conditions and enabling forecasting based on a seasonal climate prediction scale. Agrometeorological bulletins are periodically prepared, providing farmers and other sectors such as Civil Defense with information on management needs or even environmental preservation, globally indicated drought indices such as SPI and SPEI, and results of agricultural water balance parameters, agricultural calendar, irrigation management, among others. Throughout the CIIAGRO portal, one can obtain, among other aspects, current water balance and forecast, agricultural calendar, fire risk, consultation of current data or previous periods, meteorological or agricultural drought indices. Because of this database, the agroclimasp.ciaiaagro.org.br program was developed, which, in addition to the aspects already presented above, includes parameters such as fire risk, thermal comfort, and agricultural monitoring by river basin community.

Parole-chiave:

Bollettini agrometeorologici, indici di siccità meteorologica e agricola, gestione dei parassiti e delle malattie, stime di irrigazione

Keywords:

Agrometeorological bulletins, meteorological and agricultural drought indices, pest and disease management, irrigation estimates

Introduzione

L'esistenza della razza umana è dovuta esclusivamente alle variazioni climatiche del passato, ed è indubbio che il nostro futuro sarà fortemente influenzato dal clima (DODSON, et al., 2008). Data la sua portata, complessità e multidisciplinarietà, una delle maggiori sfide per la scienza è la ricerca volta a comprendere le cause, gli effetti e gli impatti del cambiamento climatico (NOBRE, 2012). Con l'aumento delle temperature, è possibile osservare ripercussioni in diversi settori e sistemi, come le risorse idriche e le conseguenze per la produzione di energia; gli ecosistemi in generale, le foreste, i sistemi costieri, l'industria, la salute umana e anche la produzione alimentare sono direttamente influenzati dalle variazioni di temperatura, che promuovono la competizione tra respirazione e fotosintesi nelle piante, diminuendo la produttività, considerando che esiste un limite di temperatura che, se superato, può causare la morte della pianta. Nel settore agricolo, il successo di un'impresa è

legato a fattori economici, sociali, infrastrutturali e di redditività commerciale. Tuttavia, è possibile affermare che il clima e le variazioni climatiche stagionali giocano un ruolo decisivo nell'attuazione di uno sfruttamento agricolo razionale, rendendo essenziale il mantenimento dell'equilibrio agricolo (BRUNINI, 2013). L'agricoltura è un settore con un'elevata domanda di acqua. Secondo le stime della FAO, circa il 70% dell'acqua utilizzata nel mondo è destinata ad attività agricole. Le attività agricole interferiscono anche con la quantità di acqua disponibile in un dato bacino idrografico, poiché causano cambiamenti nel ciclo idrologico, in quanto promuovono cambiamenti nella copertura del suolo (ANTONIAZZI, 2008). Per analizzare e quantificare al meglio l'impatto del clima sulla produzione e sullo sviluppo delle colture, una stazione meteorologica diventa una priorità. Una rete agrometeorologica può fornire dati e informazioni meteorologiche utili per la pianificazione delle attività di supporto all'agricoltura durante le varie fasi di sviluppo

delle colture. Considerando le peculiari caratteristiche edafoclimatiche dello stato di San Paolo, è stato creato il Centro Integrato di Informazione Agrometeorologica - CIIAGRO, istituito nel novembre 1988, che coordina e analizza i dati meteorologici provenienti da una rete automatizzata di oltre 230 località dello Stato. Il processo di analisi agroclimatica e la preparazione dei bollettini si basano sulla rete meteorologica, con raccolta dati online dalla rete meteorologica, sequenzialmente ogni 20 minuti, e valori medi su base oraria e giornaliera.

Materiali e Metodi

Le peculiari caratteristiche edafoclimatiche dello stato di San Paolo, è stato creato il Centro Integrato di Informazione Agrometeorologica (CIIAGRO), che coordina e analizza i dati meteorologici a una rete automatizzata di oltre 230 stazioni. Questo portale, www.ciiagro.org.br, consente l'accesso online e la generazione di prodotti, valutando le condizioni passate e attuali e permettendo previsioni basate su una scala previsionale, agricoltura, gestione dell'irrigazione. Le attività online che consentono il monitoraggio agrometeorologico (Tabella1).

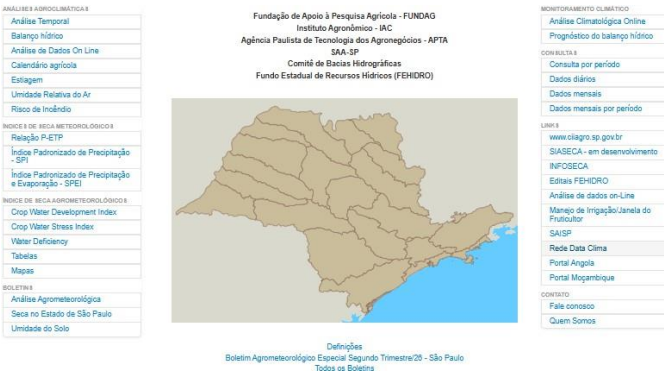


Fig. 1 - Indicazione del portale agrometeorologico e idrologico dello stato di San Paolo.
Fig. 1 - Indication of the agrometeorological and hydrological portal of the state of São Paulo.



Fig. 2 - Mappa dello stato di San Paolo che indica l'ubicazione delle stazioni meteorologiche automatiche.
Fig. 2 - Map of the state of São Paulo showing the location of automatic weather stations.

Tab. 1 - Indicazione degli indici agroclimatici derivati tramite CIIAGRO-AGROCLIMA

Tab. 1 - List of agroclimatic indices derived through CIIAGRO-AGROCLIMA

Bilancio idrico	Attuale- Previsione
Dati online	
Rischio incendi	Mappa- Per località
Umidità relativa	Mappa - Per località
Comfort termico	Mappa- Per località
Monitoraggio climatico	Mappa- Per località
Controllo dei parassiti	Mappa- Per località
Precipitazioni	Mappa Per località
Siccità-	Siccità agricola-Siccità meteorológica per località
Pianificazione agrometeorologica dell'irrigazione	Coltivazione frutticola Altre colture
Fabbisogno termico	Gradi giorno dati accumulati
Numero di ore di freddo	
Agricolo Calendario	
Bollettini	Agroclimatici- Hidrológico

Per una migliore comprensione da parte degli utenti, la pianificazione del processo agricolo e la generazione di report, è necessario integrare le informazioni sulle colture e sul suolo ed il rischio di incendi, gelate e altri fenomeni avversi. La distribuzione o l'ambito di applicazione del CIIAGRO, dei comitati di bacino idrografico e dei prodotti che se ne possono ricavare sono indicati nella Figura 1, mentre la densità delle stazioni meteorologiche è indicata nella Figura 2, che viene visualizzata utilizzando il programma Agroclimasp, dove i prodotti derivati e l'ambito di applicazione di ciascun indice agroclimatico sono espressi nella Tabella 1.

Resultati e Discussione

Bilancio idrico

La Figura 3 mostra una mappa mensile delle condizioni idriche nello Stato, mentre la Figura 4a mostra una stima del bilancio idrico per Campinas, con una previsione a 90 giorni, considerando valori normali di temperatura e precipitazioni, mentre la Figura 4b mostra le stesse condizioni con l'effetto El Niño.

La Figura 4 mostra la stima del bilancio idrico per Campinas, con una previsione a 90 giorni, considerando valori normali di temperatura e precipitazioni(a), mentre la b indica le stesse condizioni con l'effetto El Niño(b).

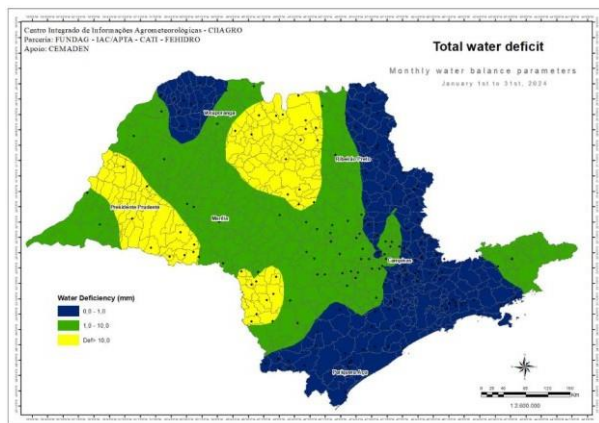


Figura 3- Mapa mensal das condições hídricas no Estado

Figure 3- Monthly map of water conditions in the State

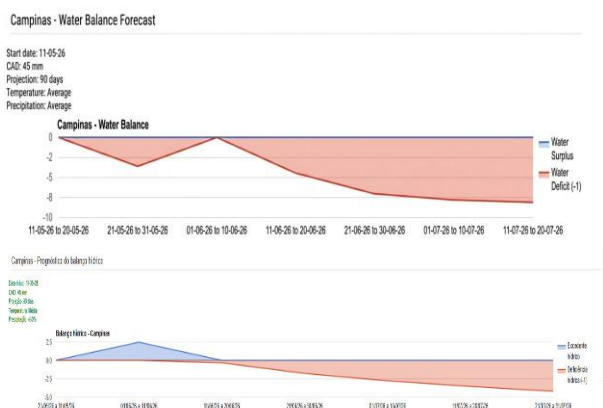
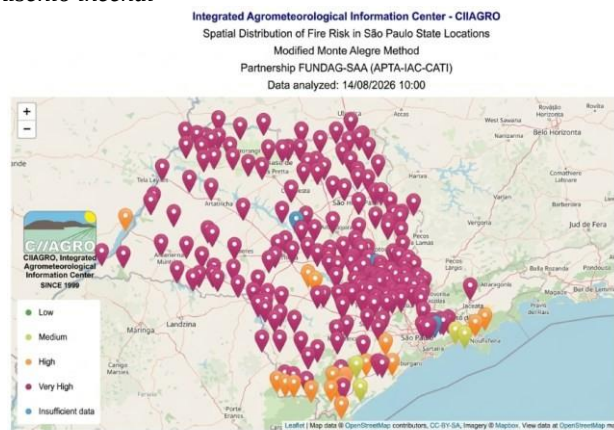


Fig. 4 - Bilanci idrico normali di temperatura e precipitazioni(a), e condizioni con l'effetto El Niño(b).

Fig. 4 - Normal water balances of temperature and precipitation (a), and conditions with the El Niño effect (b).

Rischio incendi



Base- AGROCLIMASP-CIIAGRO Program

Fig. 5 – Rischio incendi e città consigliate

Fig. 5 – Fire risk and recommended cities
Gestione dei parassiti

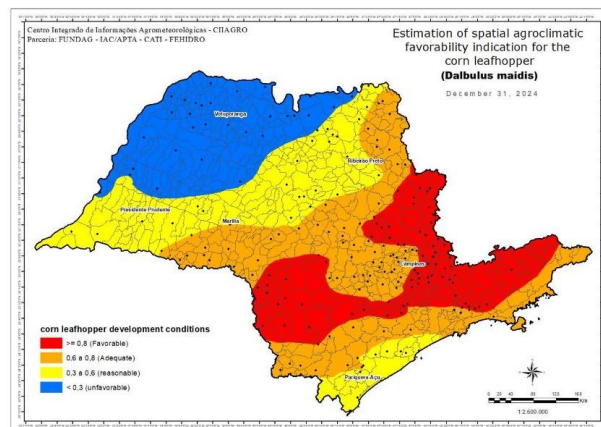


Fig. 6 - Condizioni agrometeorologiche e sviluppo della cicalina del mais (a) e della falena del mais (b)

Fig. 6 - Agrometeorological conditions and development of the corn leafhopper (a) and the corn leaf moth (b)

Bollettini agrometeorologici

I bollettini agrometeorologici vengono redatti settimanalmente o periodicamente mensilmente per soddisfare le esigenze degli agricoltori e della società in generale.

ESEMPIO

ANÁLISE PRELIMINAR DO EFEITO DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS SOBRE PRAGAS DA CULTURA DO MILHO

Resumo - Com base em dados diários da temperatura do ar e da precipitação, um prognóstico é feito sobre o desenvolvimento das seguintes pragas do milho: cigarrinha-do-milho (*Dalbulus maidis*), lagarta-do-cartucho do milho (*Spodoptera frugiperda*), diabrótica do milho (*Diabrotica* spp.). A análise foi realizada considerando-se os limites térmicos e hídricos que favorecem o desenvolvimento destas espécies, e a intensidade e duração do índice pluviométrico. Os

resultados demonstram que a avaliação atual das condições meteorológicas e o seu prognóstico podem permitir a um manejo racional de defensivos agrícolas, reduzindo o efeito negativo ao meio ambiente e reduzindo custos adicionais aos produtores agrícolas.

PRELIMINARY ANALYSIS OF THE EFFECT OF METEOROLOGICAL VARIABLES ON CORN CROP PESTS

Abstract - Based on daily data for air temperature and precipitation, a prognosis is made about the development of the following corn pests: corn leafhopper (*Dalbulus maidis*), corn armyworm (*Spodoptera frugiperda*), and corn earworm (*Diabrotica* spp.). The analysis was carried out considering thermal and water limits that favor the development of these species, and the intensity and duration of rainfall. The results demonstrate that the current assessment of meteorological conditions and their prognosis allow for rational management of agricultural pesticides, reducing the negative impact on the environment and reducing additional costs for farmers.

ANÁLISIS PRELIMINAR DEL EFECTO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS SOBRE LAS PLAGAS DEL CULTIVO DE MAÍZ

Resumen - Con base en datos diarios de temperatura del aire y precipitación, se realiza un pronóstico sobre el desarrollo de las siguientes plagas del maíz: cigarra del maíz (*Dalbulus maidis*), gusano cogollero del maíz (*Spodoptera frugiperda*), mosquito del maíz (*Diabrotica* spp.). El análisis se realizó considerando los límites térmicos e hídricos que favorecen el desarrollo de estas especies, y la intensidad y duración del índice de precipitaciones. Los resultados demuestran que la evaluación actual de las condiciones meteorológicas y su pronóstico pueden permitir una gestión racional de los plaguicidas agrícolas, reduciendo el impacto negativo sobre el medio ambiente y reduciendo los costos adicionales para los productores agrícolas.

Conclusioni

Il CIIAGRO, le sue azioni e i programmi associati, così come i suoi bollettini, si dimostrano di grande valore nel supportare le pratiche agricole e la società nel suo complesso.

Circa 6.000 utenti accedono quotidianamente ai dati meteorologici e alle informazioni e ai prodotti generati, rendendolo uno strumento direttamente utile per i processi di assicurazione agricola.

La sua portata e la sua metodologia indicano inoltre che sta diventando uno strumento importante nei processi di costruzione della resilienza comunale ai cambiamenti climatici.

Bibliografia

Sivakumar, M.V.K.; Das, H. P.; Brunini, O. Impacts of Present and Future Climate Variability and Change on Agriculture and Forestry in the Arid and Semi-arid Tropics. In: James Salinger; M.V.K. Sivakumar; Raymond Motha. (Org.). Increasing Climate Variability and Change-Reducing the vulnerability of agriculture and forestry. 1ed. Dordrecht-The Netherlands: Springer, 2005, v. 70, p. 31-72. Sanches, R. G., Santos, B. C. dos, Neves, G. Z. de F., Silva, M. S. D., & Souza, P. H. de. (2022). Análise da tendência pluviométrica na região central do estado de São Paulo. *Revista Brasileira De Climatologia*, 30(18), 777–797.

Sivakumar, M.V.K.; Das, H. P.; Brunini, O. Impacts of present and future climate variability and change on agriculture and forestry in the arid and semi arid tropics. In: International workshop on reducing vulnerability of agriculture and forestry to climate variability and climate change, 2002, Ljubljana. To be published. Ljubljana-Eslovênia: Organização meteorological Mundial, 2002. v. 1. p. 00-00.

CIIAGRO – Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (www.ciiagro.org.br).

ANALYSIS OF BIOCLIMATIC AVAILABILITY IN THE OLIVE-GROWING AREAS OF THE ABRUZZO REGION

ANALISI DELLE DISPONIBILITÀ BIOCLIMATICHE NELLE AREE OLIVICOLE DELLA REGIONE ABRUZZO

Bruno Di Lena ¹, Domenico Giuliani ¹, Fabio Pietrangeli ¹, Nadia Di Bucchianico ¹

¹Regione Abruzzo – Dipartimento Agricoltura. Ufficio direttiva qualità dei suoli e servizi agrometeo. bruno.dilena@regione.abruzzo.it

Abstract

In this study, bioclimatic availability in the olive-growing areas of the Abruzzo region was assessed, as it influences olive oil quality, with particular reference to fatty acids: oleic, palmitic, and linoleic

Parole chiave

olivo, disponibilità bioclimatiche, regione Abruzzo

Keywords

Olive tree, bioclimatic availability, Abruzzo region

Introduzione

Il cambiamento climatico, rilevato a livello mondiale, impatta direttamente sulla coltivazione di tutte le specie agrarie; nel caso specifico ci siamo interessati all'olivo per verificare come tali cambiamenti si possano riflettere sulla qualità delle produzioni.

Abbiamo preso a riferimento un lavoro scientifico che si basa su un indice climatico espresso in gradi giorno, rilevato dal 1° gennaio con soglia 7,5°C, in cui si evidenzia che il processo di inolizione nelle drupe si verifica tra i 2800 e i 3400 gradi giorno, ma a partire da 2900 gradi giorno si osserva un decadimento della qualità dell'olio a livello di trigliceridi, consistente nella progressiva diminuzione dell'acido oleico e nell'incremento proporzionale degli acidi palmitico e linoleico (Pannelli e Perri; 2012).

Il nostro prioritario interesse è stato quello di verificare in quale periodo l'indice di 2900 gradi-giorno è stato raggiunto nella regione Abruzzo nel corso degli anni.

In questo lavoro viene presentata un'analisi dei dati termici giornalieri raccolti nel periodo 1974-2024, sottoposti a procedure di validazione secondo standard internazionali (Peterson et al., 1998; WMO, 2018; Curci et al. 2021).

Materiali e Metodi

Lo studio climatico è stato effettuato utilizzando i dati termici giornalieri raccolti in 9 località della regione Abruzzo nell'arco temporale 1974-2024 (Fig.1) dall'Ufficio idrologia, idrografico e mareografico dell'Agenzia Regionale di Protezione Civile dell'Abruzzo e successivamente validati dal CETEMPS dell'Università degli Studi dell'Aquila, secondo la metodologia illustrata in Curci et al., 2021.

Il calcolo delle sommatorie termiche con soglia 7,5°C è stato effettuato a partire dal 1° gennaio e fino alle seguenti date: 30 settembre, 15 ottobre, 31 ottobre e 15 novembre.

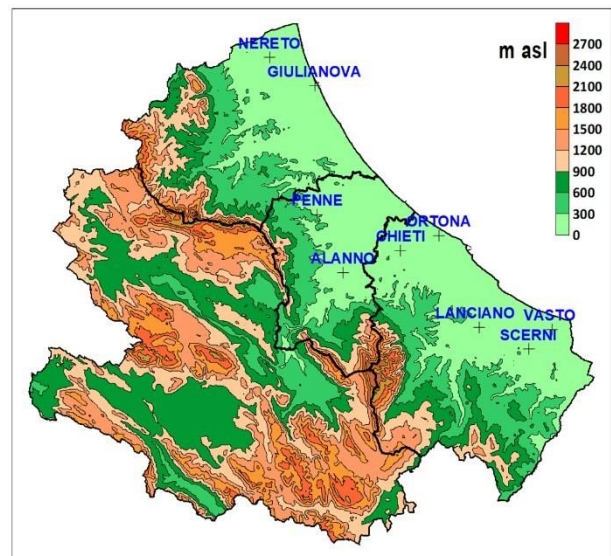
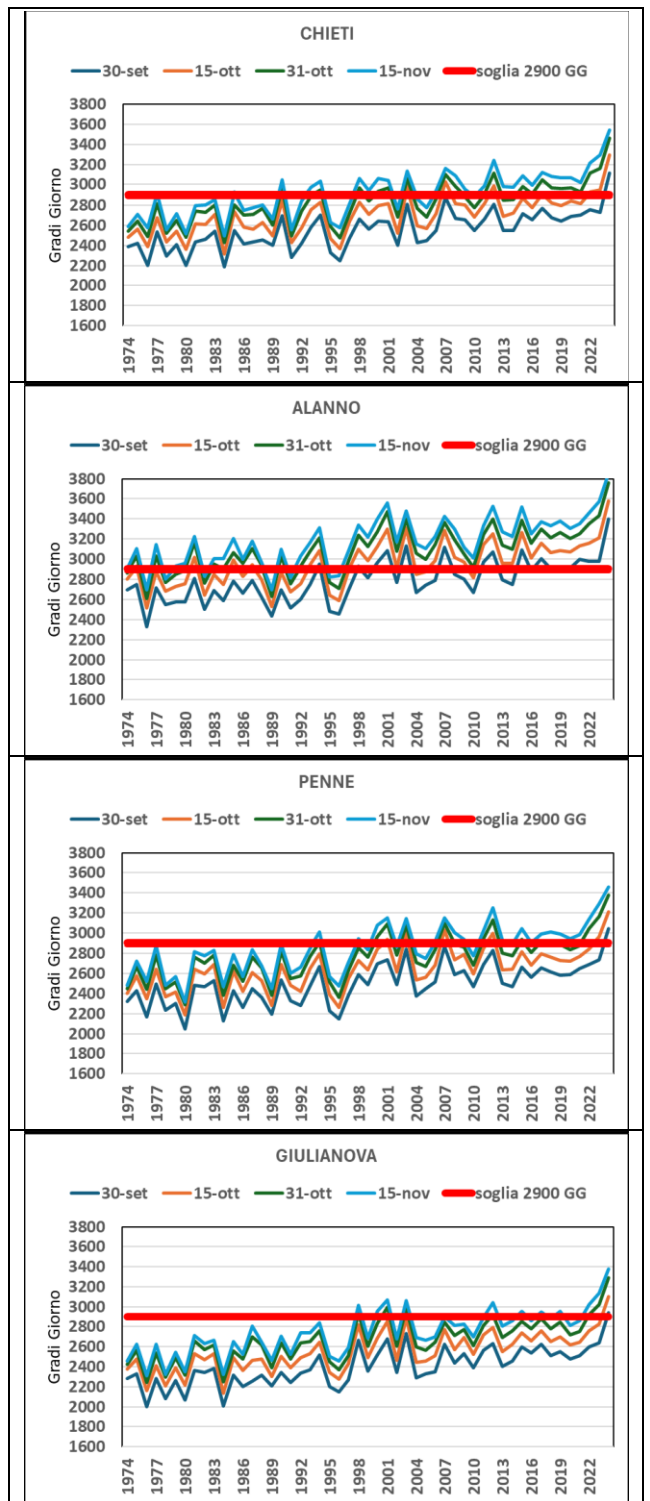
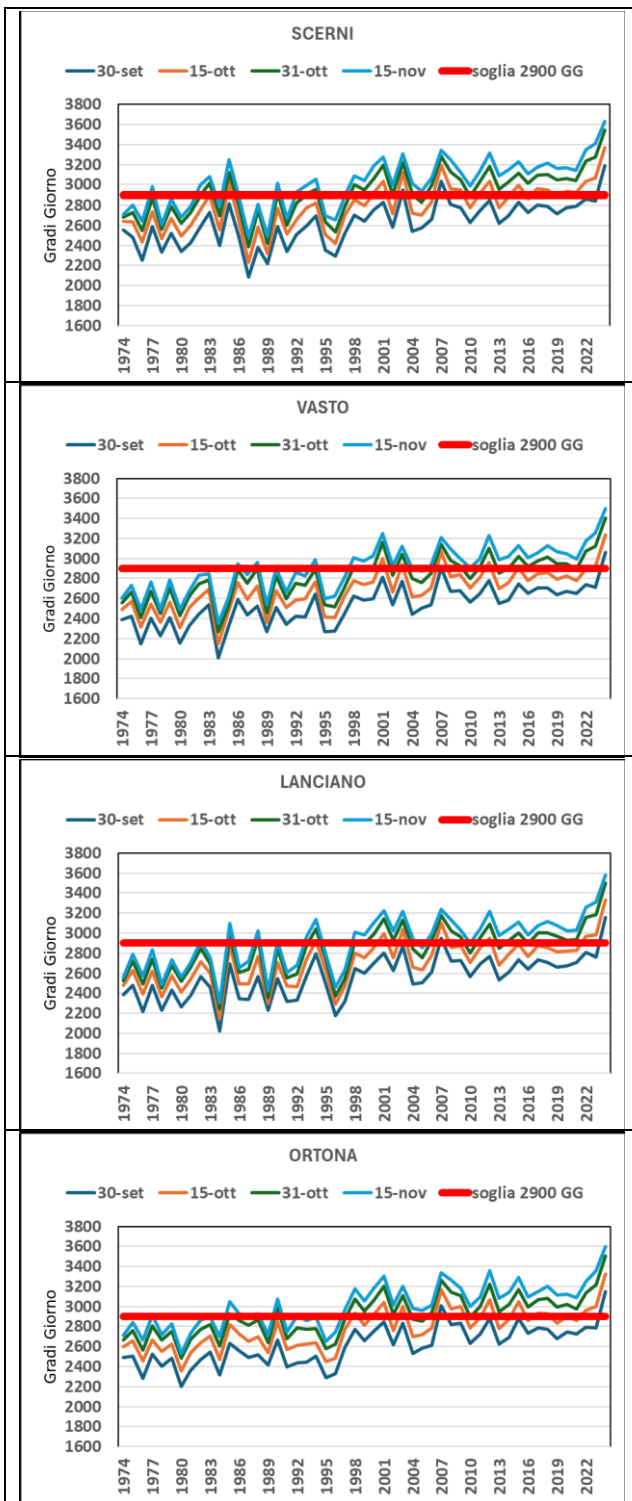


Fig. 1- Mappa della Regione Abruzzo con i nomi delle 9 stazioni meteorologiche e con in alto a destra le classi di altitudine.

Fig. 1 – Map of Abruzzo Region with the names of the 9 meteorological stations and on the upper right the altitude class

Risultati e Discussione

Le aree olivicole della regione Abruzzo sono state interessate da un significativo aumento delle temperature e quindi delle sommatorie termiche su base 7,5°C. A partire dal 1998 in tutte le località è stata rilevata una maggiore disponibilità bioclimatica, che determina il superamento della soglia di 2900 gradi giorno già a partire dalla metà di ottobre, in particolare nelle zone centro-meridionali (Fig.2).



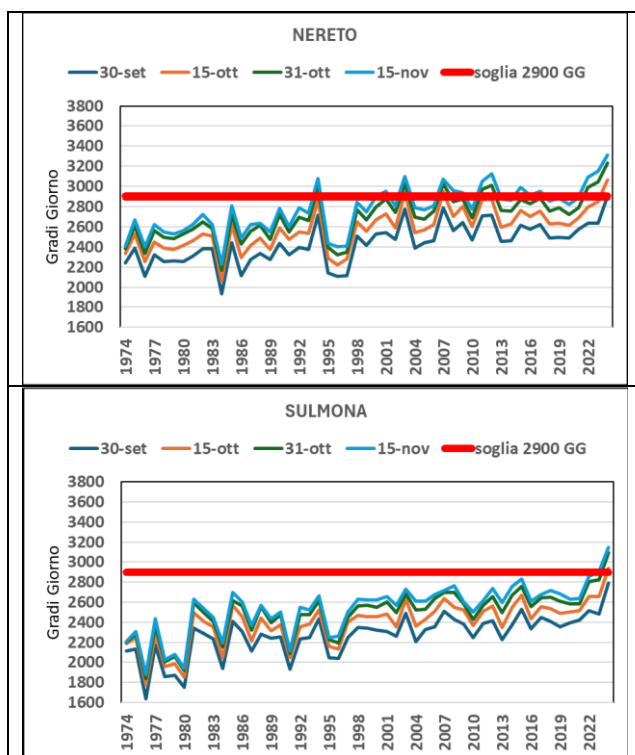


Fig. 2 - Andamento delle sommatorie termiche nelle aree olivicole della regione Abruzzo

Fig. 2 - Trend of thermal sums in the olive-growing areas of the Abruzzo region

Conclusioni

Le mutate condizioni ambientali, dovute ai cambiamenti climatici, incidono sulla qualità dell'olio e richiedono una particolare attenzione per la determinazione delle epoche di raccolta in funzione dell'andamento climatico annuale.

Lo studio condotto evidenzia, in linea generale, che l'anticipo dell'epoca di raccolta, cui si assiste da almeno 20 anni, ha un diretto riscontro con quanto rilevato a livello climatico. Il calcolo delle sommatorie termiche, unito a osservazioni di campo, costituisce un utile strumento per orientare le scelte aziendali.

L'obiettivo futuro sarà quello di monitorare e valutare, su specifiche varietà di olivo e in diversi areali regionali, dal momento del raggiungimento dei 2900 gradi giorno in poi, il livello di maturazione delle olive misurato attraverso l'indice di Jaen e la qualità relativa degli olii in rapporto al contenuto di acidi oleico, palmitico e linoleico.

Bibliografia

- Curci G., Guijarro J.A., Di Antonio L., Di Bacco M., Di Lena B., Scorzini., 2021. A.R. Building a local climate reference dataset: Application to the Abruzzo region (Central Italy), 1930–2019. *Int J Climatol.* 2021; 41:4414–4436. <https://doi.org/10.1002/joc.70814436>
- Panelli G, Perri E. 2012 Scelte varietali in Olivicoltura. Collana divulgativa Accademia nazionale dell'olivo volume XVIII – Spoleto (PG)
- Peterson, T.C., Vose, R., Schmoyer, R. AND Razuvaëv, V. (1998) Global historical climatology network (GHCN) quality control of monthly temperature data. *International Journal of Climatology*, 18, 1169–1179. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199809\)18:113.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199809)18:113.0.CO;2-U)
- WMO, 2018. Guide to Climatological Practices. WMO-No. 100, Geneva.

PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF QUERCUS SUBER L. TO TRUNK INJECTION AND FOLIAR APPLICATION OF POTASSIUM PHOSPHONATE UNDER DECLINE CONDITIONS ASSOCIATED WITH *PHYTOPHTHORA CINNAMOMI*

RISPOSTE FISIOLOGICHE DI QUERCUS SUBER L. A ENDOTERAPIA E APPLICAZIONE FOGLIARE CON FOSFONATO DI POTASSIO IN CONDIZIONI DI DEPERIMENTO ASSOCIATO A *PHYTOPHTHORA CINNAMOMI*

Ana Fernandes de Oliveira^{1*}, Massimiliano Giuseppe Mameli¹, Salvatore Seddaiu², Giuseppino Pira², Bruno Scanu³, Luca Sarais², Pino Angelo Ruiu², Daniela Satta¹

¹ AGRIS Sardegna – Servizio Ricerca nell'Arboricoltura, Via De Martini, 244 – 07100 Sassari (SS)

² AGRIS Sardegna – Servizio Ricerca per la sughericoltura e la selvicoltura, Via Limbara 9 – 07029 Tempio Pausania (OT)

³ Università degli Studi di Sassari – Dipartimento di Agraria, Viale Italia, 39/A – 07100 Sassari (SS)

*afoliveira@agrisricerca.it

Abstract

Cork oak decline is a complex syndrome often associated with *Phytophthora* spp. and exacerbated by increasing thermal and water stress in the Mediterranean region. This study evaluated the effect of potassium phosphonate treatments in the physiology of cork oak trees, applied via trunk injection (Endotherapy) or foliar spray (Spray), over the 2023–2025 period in Sardinia (Italy). Using PLS-PM modeling, interactions between environmental variables, photochemical parameters, and stem dynamics were analyzed. Results indicate that, although climate remains the primary driver of growth, treatments enhanced tree resilience by modulating tree water deficit (TWD) and improving photosynthetic efficiency. Both techniques ensured physiological performance superior to untreated control, with endotherapy showing short term stability. Despite the natural exhaustion of the exogenous effect by the third year, treated trees maintained lasting protection of their hydraulic architecture, confirming the effectiveness of these treatments for the protection of cork oak forests.

Parole chiave

Quercus suber L., *Phytophthora* spp., Fosfonato di potassio, Modellizzazione PLS-PM, Resilienza idrica

Keywords

Quercus suber L., *Phytophthora* spp., Potassium phosphonate, PLS-PM modeling, Water resilience

Introduzione

Il settore forestale mediterraneo sta affrontando un'intensificazione dei fenomeni di deperimento delle sugherete, riconosciuto come una sindrome multifattoriale risultante dall'interazione tra stress abiotici, in particolare siccità prolungata e ondate di calore, e stress biotici, tra cui patogeni afferenti al *Phytophthora* spp. (FAO, 2025; Gosling *et al.*, 2023; Seddaiu *et al.* 2020). Questo gruppo di oomiceti, responsabile di marciumi radicali, trova condizioni ideali di diffusione in piante già indebolite, come osservato recentemente in vaste aree della Sardegna (Seddaiu *et al.*, 2025). Tra le strategie di difesa sostenibile, il fosfonato di potassio si è dimostrato efficace nel modulare le risposte di difesa endogene delle piante, stimolando la produzione di fitoalessine e la lignificazione cellulare (Caitlin *et al.*, 2025). Sebbene l'endoterapia garantisca un'elevata stabilità e persistenza del principio attivo nei tessuti vascolari, essa presenta limitazioni operative legate a costi elevati e impatto invasivo in contesti forestali (Garbelotto *et al.*, 2007). Al contrario, l'applicazione fogliare mediante irrorazione della chioma rappresenta una strategia più flessibile e scalabile che, pur richiedendo l'impiego di coadiuvanti e applicazioni più frequenti, consente una distribuzione più efficace e omogenea su larga scala (Serrano *et al.*, 2023).

Nel presente studio è stata valutata l'efficacia delle due modalità di applicazione (endoterapia vs irrorazione fogliare) in impianto di *Quercus suber* L. a Tempio Pausania (Sardegna). Attraverso un approccio olistico basato sulla modellizzazione PLS-PM, l'obiettivo è stato quello di integrare variabili ambientali, gestionali e risposte fisiologiche (foglia, pianta e tronco) per identificare i driver determinanti dell'accrescimento radiale e del deficit idrico, nonché di definire una gerarchia dei fattori climatici rispetto agli effetti dei trattamenti applicati.

Materiali e Metodi

La prova è stata condotta nel triennio 2023-2025 presso la sughereta sperimentale "Cusseddu Miali Parapinta" (AGRIS Sardegna, Tempio Pausania, 470 m s.l.m.). Tutte le piante testate sono risultate positive a *Phytophthora cinnamini*, la cui presenza è stata confermata mediante isolamenti diretto dalla rizosfera attraverso l'applicazione della tecnica del *baiting* e successiva identificazione molecolare basata sull'analisi delle sequenze della regione ITS rDNA (White *et al.*, 1990). Nel corso del triennio 2023-2025 è stata valutata l'efficacia nel contrastare la progressione della malattia attraverso l'implementazione di due tipologie di trattamento con fosfonato di potassio. Sono stati confrontati tre gruppi da 10 piante: 1) Endoterapia, tramite iniezione (Chemjet Injector, UK) di fosfonato di

potassio al 20% (Kalex, Alba Milagro, IT); 2) Terapia fogliare (Spray), tramite irrorazione della chioma allo 0,56% con lo stesso prodotto; 3) Controllo, piante non trattate.

Il monitoraggio fisiologico ha previsto misure mensili di scambi gassosi, fluorescenza della clorofilla (CIRAS-3, CFM-3, PP Systems, USA) e potenziale idrico del germoglio (Camera di Scholander M-600, PMS Instruments, USA). Contemporaneamente i dendrometri LVDT (GMR Strumenti, IT) hanno registrato in continuo le variazioni di diametro e sulla base del *zero-growth concept* (Zweifel et al., 2016) sono stati stimati l'accrescimento radiale del tronco (GRO) e il deficit idrico del fusto (TWD). I parametri meteo (ARPA Sardegna) ed il contenuto idrico del suolo (misurato tramite sonde Waterscout SM100, Spectrum Technologies, USA) hanno completato il set di dei dati ambientali. Per quantificare le relazioni causali tra ambiente, tempo intercorso dal trattamento e risposte della pianta, è stata utilizzata la modellizzazione PLS-PM (*Partial Least Squares Path Modeling*). Il modello è stato validato in due fasi (modello di misura e strutturale), calcolando la significatività dei coefficienti di percorso e dei carichi esterni tramite una procedura di *bootstrapping* non parametrico con 1000 ricampionamenti $\alpha = 0,05$.

Risultati e Discussione

La Tab. 1 sintetizza i risultati della valutazione del modello PLS-PM a due fasi: (1) analisi del modello di misura (modello esterno) e (2) analisi del modello strutturale (modello interno). I parametri di bontà di adattamento

(GoF) globale indicano una buona adeguatezza generale del modello (GoF Esterno = 0,974; GoF Interno = 0,745). L'indice Rho di D.G. (Dillon-Goldstein) globale pari a 0,712 conferma la buona affidabilità composita e la consistenza interna complessive del modello. I valori dell'affidabilità (AVE) indicano una buona validità convergente delle relazioni tra le variabili latenti e rispettive variabili manifeste: il valore più alto si riscontra per la variabile Ambiente (0,835), e i valori relativi al Trattamento e all'Accrescimento e Deficit idrico dell'albero sono accettabili (rispettivamente 0,508 e 0,525).

La bassa accettabilità dei singoli indicatori (*outer loadings*) trattamento Spray, NPQ e gs suggerisce che potrebbero essere eliminati dal modello poiché contribuiscono in maniera ridotta a spiegare le rispettive variabili latenti in confronto con le altre variabili manifeste. Il modello strutturale presenta un potere predittivo eterogeneo per i costrutti endogeni: molto forte per l'Accrescimento e Deficit idrico dell'albero ($R^2 = 0,898$), moderato-forte per la Pianta ($R^2 = 0,628$), moderato-debole per la Foglia e trascurabile per il trattamento. Sulla base dei valori p e dei Critical Ratio si osservano relazioni strutturali: altamente significative tra Ambiente, Pianta e Accrescimento e Deficit; significative con correlazione negativa ($r = -0,102$) tra Trattamento e Accrescimento e Deficit; significativa con forte correlazione positiva ($r = 0,708$) tra Foglia e Accrescimento e Deficit; non significativa da Anno e Pianta con $p = 0,514$ e $p = 0,555$, rispettivamente.

Tab. 1 - Sintesi dei parametri del modello di misura (modello esterno) e del modello strutturale (modello interno) ottenuti tramite l'analisi PLS-PM. Si riportano: carichi esterni (*outer loadings*), indice di varianza spiegata (R^2), la varianza media estratta (AVE), il coefficiente di correlazione (r), il rapporto critico (*Critical Ratio*) e il valore di significatività (p -value).
Tab. 1 - Summary of the parameters for the measurement model (outer model) and the structural model (inner model) obtained through PLS-PM analysis. Reported parameters include: *outer loadings*, coefficient of determination (R^2), Average Variance Extracted (AVE), correlation coefficient (r), *Critical Ratio*, and significance value (p -value).

Modello	Variabile latente	Tipo	Variabili manifeste	Outer Loadings	R ²	R ² Bootstrap	AVE	Correl. (r)	Critical Ratio	Pr > t
PLS-PM	Ambiente	Esogena	PP	-0,824						
			Tmax	0,985			0,835	0,916	5,058	0,000
			Tmin	0,960						
			SWC	-0,876						
	Anno	Esogena	2023-25	1,000				-0,464	0,539	0,514
	Trattamento	Endogena	Controllo	-0,838						
			Endo	0,904	0,002	0,098	0,508	-0,102	-2,056	0,004
			Spray	-0,067						
	Foglia - Fotochimica primaria & scambi gassosi	Endogena	gs	0,598						
			A	0,875						
			T	0,956						
			QPSII	0,881	0,217	0,227	0,609	0,708	1,875	0,005
			NPQ	0,247						
			J	0,881						
	Pianta - Stato idrico e termico	Endogena	SWP	-0,380						
			Tleaf	0,970	0,628	0,655	0,542	0,717	-0,436	0,555
	Accrescimento & Deficit idrico dell'Albero	Endogena	GRO	0,981						
			TWD	0,297	0,898	0,887	0,525			
	GoF Esterno	GoF Interno	GoF Esterno (Bootstrap)				GoF Interno (Bootstrap)			
Mod. Fit	0,974	0,745	0,949				0,764			
							Rho di D.G.			

PP = precipitazioni cumulate (mm); Tmax e Tmin = temperature massima e minima dell'aria (°C); SWC = contenuto idrico del suolo (%); gs = conduttanza stomatica; A = assimilazione netta di CO₂; T = tasso di traspirazione fogliare; QPSII = efficienza quantica effettiva del fotosistema II; NPQ = dissipazione non-fotochimica dell'energia; J = tasso di trasporto degli elettroni; SWP = potenziale idrico del rametto; Tleaf = temperatura fogliare; GRO = accrescimento radiale del tronco; TWD = Deficit idrico dell'albero.

PP = cumulative precipitation (mm); Tmax and Tmin = maximum and minimum air temperatures (°C); SWC = soil water content (%); gs = stomatal conductance; A = net CO₂ assimilation; T = leaf transpiration rate; QPSII = quantum yield of photosystem II; NPQ = non-photochemical quenching; J = electron transport rate; SWP = stem water potential; Tleaf = leaf temperature; GRO = stem radial growth; TWD = tree water deficit.

Il diagramma di percorso e l'analisi del modello PLS-PM hanno evidenziato il ruolo dominante e diretto dell'Ambiente (fattori meteorologici ed ambientali) quale motore del sistema nell'esercitare un'influenza diretta, preponderante e positiva sia sul fronte dell'accrescimento e del deficit idrico dell'albero (spiegando circa il 90% della varianza totale del modello), che sullo stato idrico e termico della pianta ($\beta = 0,780$). Il trattamento ha avuto un effetto diretto, tendendo a modulare TWD/GRO ($\beta = -0,216$) in particolare la tesi Endo (peso positivo maggiore sul costruito, $w = 0,590$), e un effetto indiretto, mediando positivamente gli scambi gassosi fogliari e la resa fotochimica primaria (A, T, QPSII). L'apparato fogliare, reso più efficiente dai trattamenti, ha influenzato positivamente l'accrescimento ($\beta = 0,290$).

Sebbene la variabile Pianta sia ben spiegata dal modello ($R^2 = 0,628$) e guidata principalmente dall'ambiente, lo stato idro-termico momentaneo si è rivelato un indicatore di stress ambientale piuttosto che un driver biologico diretto della crescita; quest'ultima ha risposto invece direttamente ai fattori climatici ed all'efficienza fotosintetica. Il fattore anno non ha inciso significativamente sul trattamento o sull'accrescimento finale, ma ha mostrato un effetto negativo sull'attività fogliare $\beta = -0,340$: ciò indica che la variabilità climatica stagionale del triennio ha condizionato l'efficienza fotochimica e gli scambi gassosi indipendentemente dagli interventi applicati.

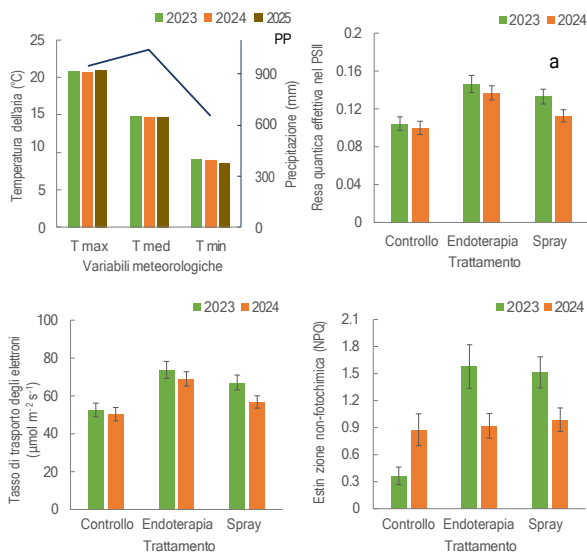


Fig. 2 - Valori medi annuali dei parametri meteorologici nel triennio e valori medi $\pm$ errore standard degli indicatori di efficienza fotochimica primaria nel biennio 2023-24. Lettere maiuscole e minuscole indicano, rispettivamente, differenze statisticamente significative tra anni e trattamenti ($p < 0,05$).

Fig. 2 - Annual mean values of meteorological parameters over the three-year period, and mean values $\pm$ standard error of primary leaf photochemistry indicators for the 2023-24 period. Uppercase and lowercase letters indicate, respectively, statistical differences among years and treatments ($p < 0.05$).

Le Fig. 2 e 3 evidenziano l'impatto significativo dei trattamenti sulla fisiologia fogliare e sullo stato idrico della pianta nel triennio 2023-2025. Entrambi gli interventi hanno garantito una maggiore capacità di conversione dell'energia luminosa e un'efficace strategia di difesa allo stress (NPQ), conferendo alle piante una resilienza superiore. Le tesi Endoterapia e Spray hanno mostrato A, gs e T superiori al controllo, con performance più elevate e stabili per l'endoterapia, specialmente nel 2023. L'SWP evidenzia un controllo più marcato dello stress idrico nelle tesi trattate: i valori più negativi nel 2023 riflettono il maggiore sforzo traspirativo sostenuto dall'efficienza di gs.

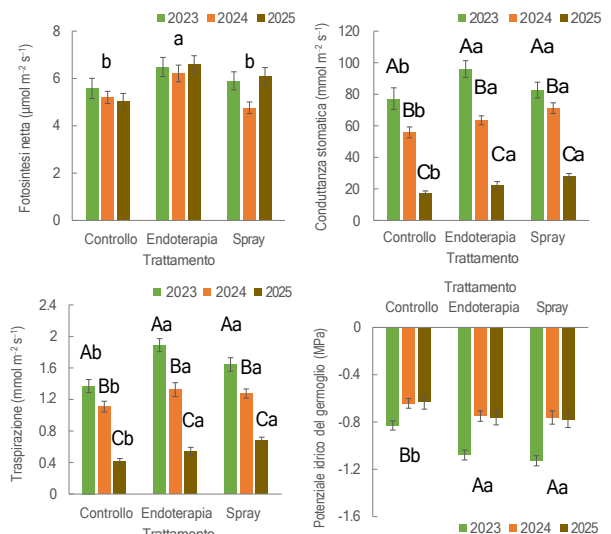


Fig. 3 - Valori medi $\pm$ errore standard dei parametri eco-fisiologici fogliari e dello stato idrico della pianta. Lettere maiuscole e minuscole diverse indicano, rispettivamente, differenze significative tra anni e trattamenti ($p < 0,05$).

Fig. 3 - Mean values $\pm$ standard error of leaf eco-physiological parameters and plant water status. Different uppercase and lowercase letters indicate, respectively, significant differences between years and treatments ($p < 0.05$).

Il calo generalizzato dei parametri osservato nel 2025 sottolinea l'influenza tempo intercorso dal trattamento, evidenziando una progressiva modulazione dell'efficacia nel lungo periodo. Tuttavia, anche con la stabilizzazione delle risposte fisiologiche al termine del triennio, le piante trattate hanno mantenuto un vantaggio competitivo e una migliore efficienza di scambi gassosi rispetto al controllo. Il calo di gs e T nel 2025 evidenzia l'influenza del fattore Anno (tempo post-trattamento), indicando una progressiva modulazione dell'efficacia nel lungo periodo. Sebbene l'intensità di A e gs sia stata più elevata nel 2023, il triennio ha mostrato una stabilizzazione delle risposte fisiologiche; tuttavia, le piante trattate hanno mantenuto un costante vantaggio competitivo rispetto al controllo.

La Fig. 4 conferma tale dinamica attraverso i dati di GRO e TWD, fornendo una prova concreta di quanto l'efficacia degli interventi possa evolvere nel tempo, pur garantendo una protezione strutturale persistente.

Nel biennio 2023-2024, tutte le tesi hanno mostrato una crescita sostenuta (>25 -30 mm), seguita da una contrazione generalizzata nel 2025 (~ 20 mm). I valori di TWD evidenziano però la resilienza indotta dai trattamenti: agendo come efficaci modulatori dello stress idrico, Endo e Spray hanno permesso alle piante di mantenere uno stato idrico ottimale, anche a distanza di tempo dall'applicazione, riducendo significativamente il deficit rispetto al controllo.

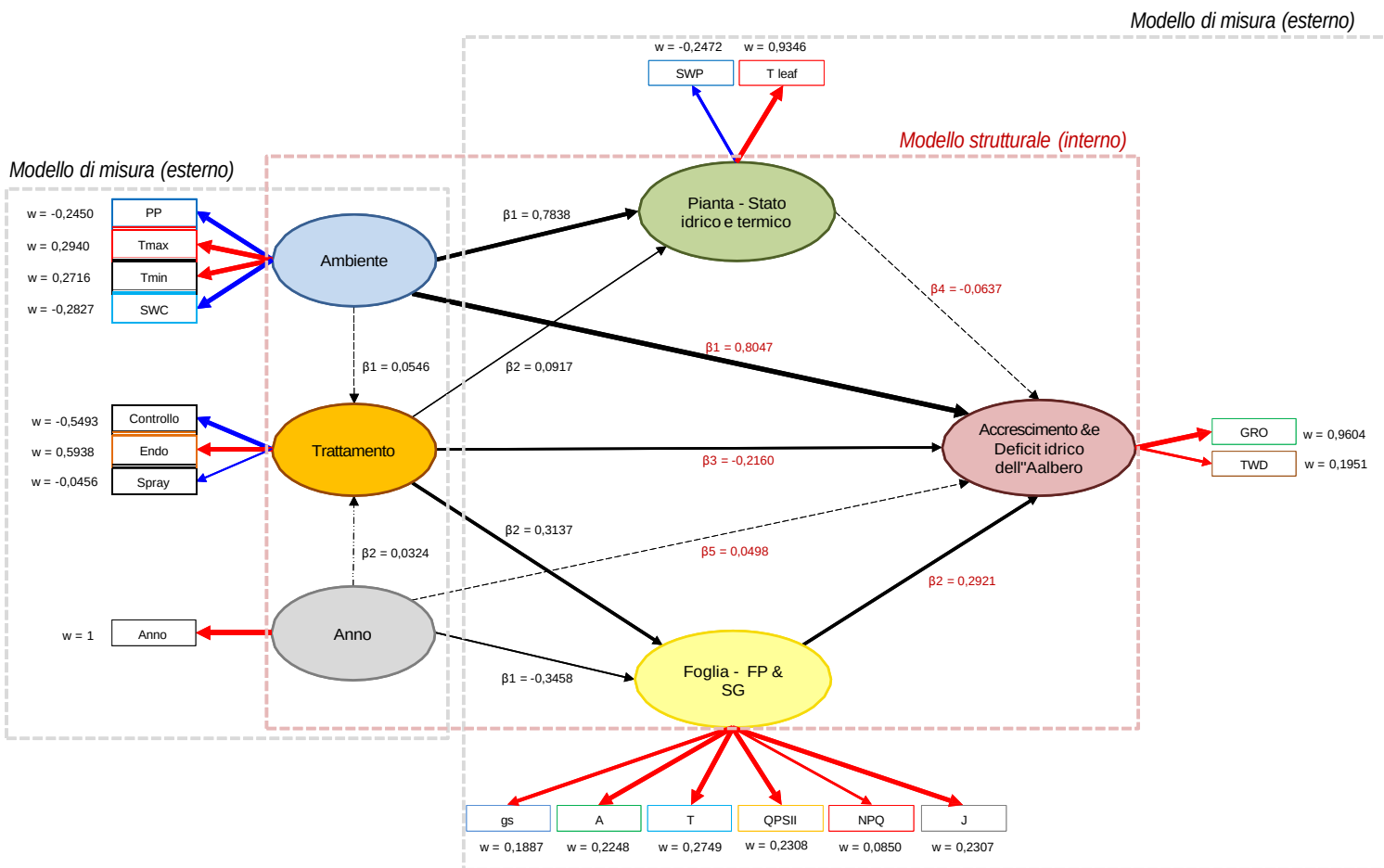


Fig. 1 - Diagramma di percorso del modello PLS-PM (modelli strutturale e di misura) che descrive la relazione tra le variabili latenti e manifeste relative all'accrescimento dell'albero e al deficit idrico. Lo spessore delle frecce è proporzionale al coefficiente di percorso (β_i) e ai carichi esterni delle variabili manifeste (w). Le frecce rosse e blu rappresentano, rispettivamente, una correlazione diretta o inversa con il costrutto latente.

Fig. 1 - Path diagram of the PLS-PM (structural and measurement models) describing the relationship between latent and manifest variables denoting tree growth and water deficit. Arrow thickness is proportional to the path coefficient (β_i) and to the outer loadings of the manifest variables (w). Red and blue arrows represent, respectively, direct or inverse correlation with the latent construct.

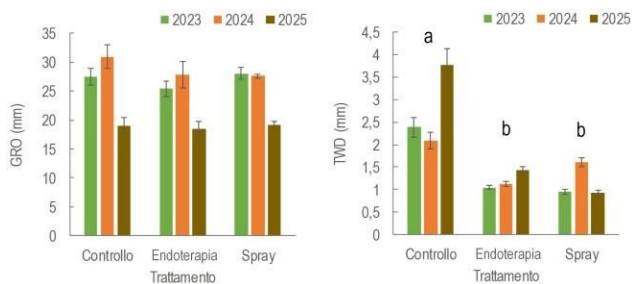


Fig. 4 - Accrescimento radiale irreversibile del tronco (GRO) e deficit idrico dell'albero (TWD). Valori medie annuali $\pm$ errore standard. Lettere maiuscole e minuscole diverse indicano, rispettivamente, differenze significative tra anni e trattamenti ($p < 0,05$).

Fig. 4 - Irreversible stem radial growth (GRO) and tree water deficit (TWD). Means values $\pm$ standard error. Uppercase and lowercase letters indicate, respectively, statistical differences among years and treatments ($p < 0.05$).

Conclusioni

La modellizzazione PLS-PM integrata a dati ambientali e fisiologici si è dimostrata un approccio efficace per decifrare la risposta della sughera ai trattamenti contro *Phytophthora cinnamoni*. Sebbene il clima sia il driver principale della crescita, gli interventi endoterapici e fogliari agiscono come modulatori della resilienza funzionale, attraverso un duplice meccanismo: la modulazione diretta dello stress idrico del fusto ed il potenziamento dell'efficienza fotosintetica della chioma. L'analisi del tempo trascorso dal trattamento ha rivelato che, sebbene la spinta metabolica sia massima nelle fasi più vicine all'applicazione, l'efficacia si mantiene significativa per tre anni, garantendo una protezione duratura dell'architettura idraulica.

Mentre l'accrescimento risente maggiormente del naturale esaurimento dell'effetto esogeno, la capacità di contenere il deficit idrico e mantenere scambi gassosi superiori al controllo delle piante trattate conferma la validità di questi interventi nel migliorare la stabilità fisiologica nel medio-lungo termine.

Bibliografia

- FAO. 2025. The status of Mediterranean forests 2025. Rome.
- Garbelotto M., Schmidt D.J., Harnik T.Y. 2007. Phosphite injections and bark application of phosphite + Pentrabark™ control sudden oak death in coast live oak. *Arboriculture & Urban Forestry*. 33(5): 309-317.
- Gosling R.H., Jackson R.W., Elliot M., Nichols C.P. 2024. Oak declines: Reviewing the evidence for causes, management implications and research gaps. *Ecological Solutions and Evidence*, 5, e12395.
- Seddaïu, S., Brandano, A., Ruiiu, P.A., Sechi, C., Scanu, B. 2020. An Overview of *Phytophthora* Species Inhabiting Declining *Quercus suber* Stands in Sardinia (Italy). *Forests*, 11: 971.
- Seddaïu, S., Riddell C., Piras G. Puiu P.A., Sarais L., Mello A., Cock P.J.A., Brandano A., Green S., Scanu B. Detection and diversity of *Phytophthora* species from declining *Quercus suber* stands using both DNA metabarcoding and soil baiting techniques. *Mycol Progress* 24, 19.
- Serrano M.S., González M. Romero M.A, Alconero M., Sánchez M.E. 2023. Mineral nutrients improve phosphonate effectiveness against cork oak root disease *For. Ecol. Manag.*, 543 (2023), Article 121152.
- White T.J., Bruns T., Lee S., Taylor J. 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal DNA for phylogenetics. *PCR protocols: a guide to methods and applications*. Academic Press, San Diego, 315–322.

FROM FRAGMENTED DATA TO AGRICULTURAL INTELLIGENCE: A PROPOSED UNIFIED PLATFORM FOR MULTI-SOURCE INFORMATION SYNTHESIS

DALLA FRAMMENTAZIONE DEI DATI ALL'INTELLIGENZA AGRONOMICA: UNA PROPOSTA PIATTAFORMA UNIFICATA PER LA SINTESI DI INFORMAZIONI MULTI-SORGENTE

Desta Gebre Gebremedhin¹, Daniele Andreis¹, Fabio Zottele¹, Cecilia Mattedi¹, Francesco Centurioni¹, Stefano Corradini¹

Abstract

At the Centro Trasferimento Tecnologico (CTT) of Fondazione Edmund Mach, extensive soil, meteorology, plant disease, phenology, and irrigation datasets are maintained across diverse research units. To harness this accumulated institutional knowledge, this work proposes an end-to-end infrastructure stack that unifies multi-source datasets into a coherent agricultural data ecosystem. A decoupled data abstraction layer serves as a mediator between legacy databases and modern frameworks and provides a transparent interface through standardized APIs and WebGIS applications. Using software agents for real-time data harmonization and spatiotemporal alignment, it sets a rigorous foundation for mathematical models and AI-driven workflows to perform advanced predictive analytics.

Parole chiave

Agricoltura, middleware, WebGIS, ecosystem, AI-driven

Keywords

Agricultural; middleware; WebGIS; ecosystem; AI-driven.

Introduction

Modern agricultural systems increasingly rely on complex digital infrastructures for environmental monitoring and resource management. These systems are often developed independently within specific research domains and evolve over prolonged periods of time. At Fondazione Edmund Mach (FEM), the CTT has supported agricultural and environmental research for decades, leading to the accumulation of a large and valuable body of data and research outcomes. As a result of different technological phases and domain-specific developments, these datasets currently reside across heterogeneous platforms, including the [Trentino Agricultural Soil Map](#), weather stations' data repositories, plant disease and phenological time-series datasets.

These systems are robust and highly successful within their respective domains. Being independently managed however limits interoperability and cross-disciplinary analysis. A unified platform integrating these distinct data streams could further enhance data-driven workflows and improve the usability of existing research assets (Fountas et al., 2015; Wolfert et al., 2017).

Across CTT's core thematic areas—*Territorio, ambiente e produzioni animali*; *Protezione delle piante e produzioni vegetali*; and *Enologia, alimenti e bevande*—the managed datasets range from high-frequency geospatial data to complex phenological sequences. The intrinsic multi-scale and multi-format nature of these data types creates significant technical barriers to manual integration, reinforcing the necessity for a unified, AI-ready infrastructure (Allemang & Teegarden, 2017).

In this context, the current work proposes a conceptual unified agricultural data ecosystem organized as a four-layer

hierarchical infrastructure stack to integrate and augment the CTT's existing digital assets. The architecture integrates legacy systems through a decoupled middleware layer through a decoupled middleware layer. This layer harmonizes data into a unified ecosystem that provides high-fidelity streams required for hybrid modeling and future AI-driven applications, including Agentic AI and Physics-Informed Neural Networks (PINNs).

As immediate future work, a PINN-based precision irrigation framework that solves the Richards equation governing soil moisture diffusion has been identified as a research priority. The model will leverage CTT's first-hand datasets on soil pedology, texture, and physicochemical composition for parameterization and calibration. Integrating these soil profiles with AI-enabled irrigation models, existing resources such as Trentino Agricultural Soil Map can evolve from static mapping systems into predictive tools for water-resource management. This direction builds upon recent work on neural-network architectures for groundwater flow (Schiano Di Cola et al., 2024) and inverse PINN frameworks for transport processes in porous media (Berardi et al., 2025).

Materials and Methods

Data Sources and Repositories

The unified ecosystem will be built over FEM-CTT data and ICT infrastructure. Core datasets include: Trentino agricultural soil repository: first-hand soil texture and physicochemical data; weather stations's data: high-frequency environmental time-series collected from [FEM meteo services](#), and A long-term dataset of plant disease and phenological data for multiple crops (Corradini and Andreis, 2019; Gelmetti et al., 2016).

Data Consolidation and Interoperability

To unify multi-source data streams, a multi-domain integration strategy built around a middleware layer will be used following the ecosystem approach proposed by Allemang & Teegarden (2017). The system utilizes a Middleware Integration Layer to ensure consistency as data moves from legacy storage to modern applications.

Unified Infrastructure Stack

The platform is organized into four-layered hierarchical design to facilitate scalable integration preserving the integrity of legacy systems. The stack is specifically tuned to handle data velocities and formats of FEM's data repositories, maintaining consistency with the structural logic of the broad architectural requirements for distributed IoT environments discussed in (Gubbi et al., 2013).

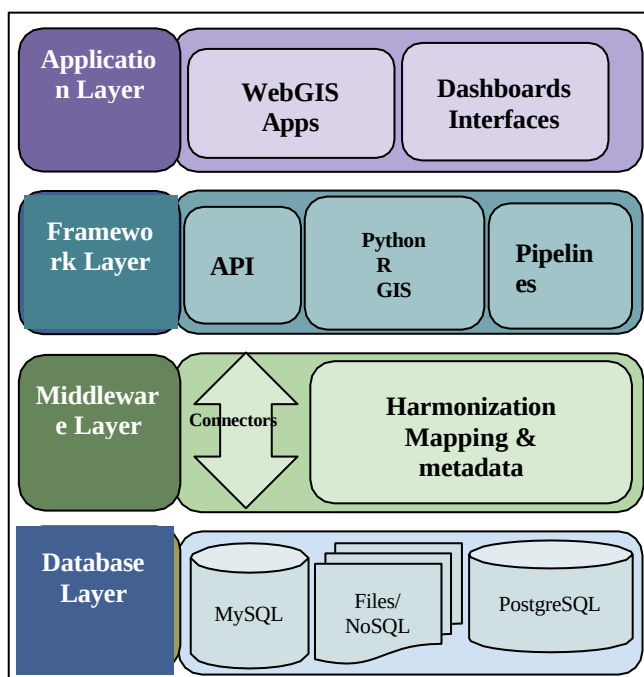


Fig. 1 - Layered architecture of unified multi-source agricultural data ecosystem.

Fig. 1 - Architettura a strati di un ecosistema unificato di dati agricoli provenienti da diverse fonti.

The proposed layers are discussed next and depicted in Figure 1:

Database Layer: Composed of FEM's heterogeneous database infrastructure in their native state; relational databases (PostgreSQL, MySQL), NoSQL repositories, and diverse file systems. These databases provide a stable foundation for the middleware to effectively map schemas and unify the data stream.

Middleware Layer: Is the core component of the platform. Maps legacy database systems to upper layers through standard APIs and connector services. performs data harmonization, standardization, and schema mapping.

Framework Layer: built over middleware to set up high-performance data processing environments using libraries and tools like PostGIS, R and Python libraries, Geopandas and PyTorch. Custom on demand software agents that

automate ETL (Extract, Transform, and Load) operations are also hosted to enable analytics for big agricultural data (Kamilaris et al., 2017). These agents ensure data integrity by detecting outliers in real time and aligning diverse environmental data streams across both space and time (Mestre et al., 2015; Rivera et al., 2023).

Application Layer: Provides end-user services through WebGIS interfaces and interactive dashboards. A standardized gateway for agricultural decision support, following established geographic information standards to guarantee cross-platform compatibility (Longley et al., 2015).

Automation and Data Quality Assurance

A core methodological innovation is the deployment of software agents mainly within the Framework Layer. These agents are to be programmed to perform real-time ingestion and analysis-ready data preparation automatically synchronizing meteorological time-series with geospatial soil data. This minimizes the need for manual processing and creates a consistent data foundation for advanced AI-driven workflows. The architecture will support emerging predictive approaches, such as Physics-Informed Neural Networks (PINNs) and Agentic AI systems, both of which rely on accurately aligned and harmonized datasets from multiple sources.

Conclusions

This work will unify multi-source agricultural database systems at Fondazione Edmund Mach (FEM) as part of the ongoing evolution of the institution's extensive agricultural datasets into a cohesive, analysis-ready ecosystem. It is designed as a modular platform stack with end-to-end architecture—spanning from low-level storage to high-level application interfaces—integrating legacy independent databases with modern framework to provide a consistent and interoperable foundation for agricultural research. It takes advantage of software agents to harmonize data and align measurements across space and time.

Beyond providing a unified agricultural data ecosystem, the platform will serve as a foundation where new tools and technologies will be integrated over time, keeping the platform adaptable to evolving research needs.

Automated software agents will be initially introduced to facilitate the collection of data from FEM weather stations, with future work capitalizing on progressively integrating additional agentic software to improve existing pipelines, automate new tasks, and incorporate AI-driven components such as Agentic AI and Physics-Informed Neural Networks. This phased approach enables FEM to support increasingly sophisticated workflows in precision agriculture and geospatial analytics, while advancing sustainable, data-driven agroecosystems.

Bibliography

- Allemang D., Teegarden B., 2017. A Global Data Ecosystem for Agriculture and Food. *F1000Research*, 6: 1–14.
Berardi M., Difonzo F. V., Icardi M., 2025. Inverse Physics-Informed Neural Networks for transport models in porous

- materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 434: 117621.
- Corradini S., Andreis D., 2019. Meteo e agricoltura. Tutti i servizi della fondazione Mach. CODIPRA NEWS.
- Fountas S., Carli G., Tsiropoulos Z., Vatsanidou A., Spyrou C., 2015. Farm management information systems: Current situation and future perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115: 40–50.
- Gelmetti A., Andreis D., Candioli E., Corradini S., Margoni M., Torresani R., 2016. Smart Monitoring per gestire i dati in campagna. *L'Informatore Agrario*, 12: 64.
- Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M., 2013. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7): 1645–1660.
- Kamilaris A., Kartakoullis A., Prenafeta-Boldú F. X., 2017. A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143: 23–37.
- Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., Rhind D. W., 2015. *Geographic Information Science and Systems*. Wiley, New York, 450 pp.
- Mestre G., Ruano A., Duarte H., Silva S., Khosravani H., Pesteh S., Ferreira P. M., Horta R., 2015. An Intelligent Weather Station. *Sensors*, 15: 31005–31022.
- Rivera A., Ponce P., Mata O., Molina A., Meier A., 2023. Local Weather Station Design and Development for Cost-Effective Environmental Monitoring and Real-Time Data Sharing. *Sensors*, 23(22): 9060.
- Schiano Di Cola V., Bauduin V., Berardi M., Notarnicola F., Cuomo S., 2024. Investigating neural networks with groundwater flow equation loss. *Mathematics and Computers in Simulation*, 230: 10.1016/j.matcom.2024.10.039.
- Schiano Di Cola V., Cuomo S., Severino G., Berardi M., 2025. Algebraic multigrid methods for uncertainty quantification of source-type flows through randomly heterogeneous porous media. *Applied Numerical Mathematics*, 218: [page range not available].
- Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M. J., 2017. Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153: 69–80.

THERMOPLUVIOMETRIC ANALYSIS OF THE STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL, FROM 2000 TO 2025: OVER TWO DECADES OF CLIMATE DATA

ANALISI TERMOPLUVIOMETRICA DELLO STATO DI SAN PAOLO, BRASILE, DAL 2000 AL 2025: OLTRE DUE DECENNI DI DATI CLIMATICI

Angelica Praela-Pantano ^{(1)*}, Orivaldo Brunini ⁽²⁾, Jane Maria Silveira de Carvalho ⁽¹⁾, Romilson Moraes Yamamura ⁽¹⁾, Elizandra C. Gomes ⁽²⁾, Humberto Ribeiro Rocha ⁽³⁾

(1) Instituto Agronômico de Campinas – Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento de Biosistemas Agrícolas e Pós-Colheita – Campinas, São Paulo, Brazil

(2) Fundação de Apoio à Pesquisa Agrícola – Fundag – Campinas, Brazil

(3) Department of Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo, SP, Brazil

* apraela@gmail.com

Abstract

The state of São Paulo is located in the southeastern of Brazil, whit altitudes (from 0 to 2,790 m), resulting in significant climate variability. The study aims to identify regional patterns, extreme warming, cooling, and precipitation events. Average daily minimum temperature and monthly precipitation data, recorded in July. It was observed that the first decade (2000 to 2009) high variability in lowest temperatures (6.7°C to 17.23°C). The mountainous and southern regions experienced the lowest temperatures, while the northwestern region experienced the highest temperatures. Regarding precipitation, the study identified that the state can be divided into 4 regions includes the hinterland with the lowest volumes in July, all with high variability. The analysis conducted over two decades revealed that the state has significant climatic diversity, with minimum temperatures from 0°C to 20°C, and precipitation from 0 mm to 375 mm. Both temperature and precipitation showed high variability between locations and within the period analyzed.

Parole-chiave:

temperatura, precipitazioni, inverno, San Paolo

Keywords:

temperature, precipitation, winter, São Paulo

Introduzione

Lo stato di San Paolo si trova nella regione sud-orientale del Brasile e possiede la più grande rete di stazioni meteorologiche del paese. Attualmente, sono presenti circa 230 stazioni coordinate dalla Segreteria di Stato per l'Agricoltura e l'Approvvigionamento e gestite dall'Istituto Agronomico di Campinas, in collaborazione con la Fondazione per il Sostegno alla Ricerca Agricola. Lo stato presenta un'ampia variabilità altitudinale (che va da quasi zero nelle zone costiere a circa 1800 m nelle regioni montuose), il che determina un'elevata variabilità climatica tra le diverse località. Le stazioni meteorologiche sono distribuite su tutto il territorio statale, coprendo aree che vanno dalla costa meridionale al nord-ovest, considerata la regione più calda, passando per le regioni montuose, considerate le più fredde dello stato di San Paolo. È interessante notare che il numero di stazioni meteorologiche è aumentato nel corso del tempo, passando da 70 (2000) a 230 nel 2025, il che ha permesso una maggiore copertura delle condizioni climatiche dello stato (www.ciiagro.org.br). Nel 1989 è stato avviato un progetto denominato Centro Integrato di Informazione Agrometeorologica (CIIAGRO), tuttora in corso, per monitorare la situazione nello stato. I dati raccolti vengono resi disponibili in un database e fungono da supporto per diverse organizzazioni della società civile, operanti nei settori dell'agricoltura, della sanità, dell'ambiente e della protezione civile. Queste informazioni sono fondamentali

per lo studio delle anomalie e delle avversità climatiche, in particolare per l'agricoltura, direttamente colpita dalla carenza e dallo stress idrico, nonché dalle anomalie termiche. Tali condizioni influenzano direttamente eventi come inondazioni, rischio di incendi e siccità, che a loro volta incidono sulla produzione alimentare, compromettendo la sicurezza alimentare. In generale, permangono difficoltà nell'ottenere serie storiche di attributi climatici per una determinata regione. Queste difficoltà sono dovute a diversi fattori, come la mancanza di attrezzature, materiali per la misurazione e/o la conservazione dei dati, personale, archiviazione e disponibilità dei dati, e persino burocrazie che ne impediscono l'accesso. L'utilizzo di serie storiche ridotte implica una maggiore probabilità di inferenze distorte, alterando l'interpretazione del comportamento di una data regione (GENNEVILLE & BOOCK, 1983). Considerando le differenze climatiche osservate nello stato, questo studio si propone di identificare le condizioni estreme di temperatura e precipitazione nell'arco di due decenni, sulla base dei dati climatici registrati dal CIIAGRO (dal 2000 al 2025).

Materiali e Metodi

I dati meteorologici utilizzati per questo studio fanno parte del database del Centro Integrato di Informazione Agrometeorologica (CIIAGRO), appartenente all'Istituto Agronomico di Campinas/SAA in collaborazione con la

Fondazione per il Supporto alla Ricerca Agricola (Fundag). La rete di stazioni è stata avviata nel 1890 e attualmente conta 230 stazioni distribuite in tutto lo stato di San Paolo, fornendo uno studio più completo e significativo delle condizioni climatiche presenti nello stato. Il monitoraggio attuale si basa su stazioni meteorologiche automatiche distribuite in tutto lo stato di San Paolo, che registrano dati climatici: temperatura (massima e minima), umidità relativa, velocità del vento, radiazione solare e precipitazioni. Questi dati vengono trasmessi tramite modem e memorizzati in un database, che costituisce la base per diversi prodotti offerti gratuitamente agli utenti. Tali prodotti supportano il processo decisionale, ad esempio: pianificazione del calendario agricolo, preparazione del terreno, applicazione di pesticidi, tempistica e monitoraggio dell'irrigazione, monitoraggio della maturazione e della stagione di semina/raccolta, controllo e gestione di parassiti e malattie, trasporto di prodotti agricoli e supporto alle operazioni forestali per il monitoraggio del rischio di incendi, gelate e altri fenomeni avversi (forti venti e precipitazioni eccessive). La Figura 1 mostra la distribuzione delle stazioni nello stato.



Fig. 1- Mappa dello stato di San Paolo che indica l'ubicazione delle stazioni meteorologiche automatiche.

Fonte: www.ciiagro.org.br

Fig. 1 - Map of the state of São Paulo showing the location of automatic weather stations. Source: www.ciiagro.org.br

Per ottenere i dati utilizzati in questo studio, è stato consultato il database per il periodo dal 2000 al 2025 (26 anni) e sono stati estratti i dati giornalieri relativi alla temperatura minima (°C) e alle precipitazioni (mm). Le informazioni sulla temperatura minima media giornaliera e sulle precipitazioni mensili sono state utilizzate per il mese di luglio, in quanto è il mese più freddo e generalmente più secco, e le variazioni osservate possono influenzare direttamente il comportamento e l'evoluzione delle colture agricole dei climi temperati (sviluppo, fioritura, fabbisogno idrico e numero di ore di freddo), interferendo direttamente con la produzione agricola.

Risultati e Discussione

Analizzando il primo decennio (dal 2000 al 2009), l'indagine ha rivelato una grande variabilità tra le località. Nel 2000, le temperature minime più basse sono state registrate a Capivari (6,57 °C) e Ibiúna (6,61 °C). Nel 2001, Capivari ha nuovamente registrato una delle temperature più basse (6,72 °C), mentre Mirante do Paranapanema ha registrato la temperatura minima più alta, pari a 17,23 °C. Il contrasto termico all'interno dello stato è stato notevole, con una differenza di circa 9 °C tra Capivari e Tupã nello stesso anno (2000). Le regioni montuose e interne meridionali hanno concentrato le temperature minime più basse, mentre nel nord-ovest di San Paolo le temperature minime sono state più elevate (Figura 1).

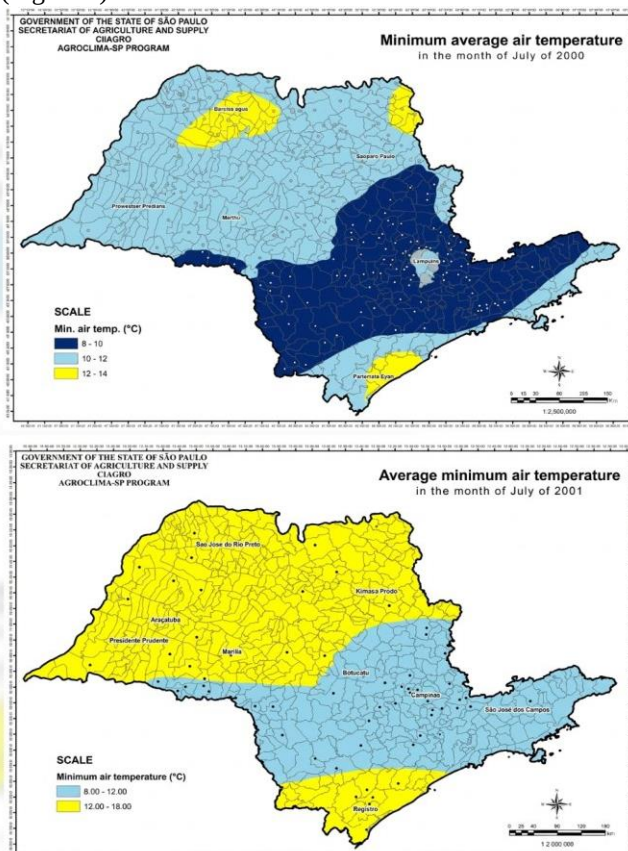


Fig. 2 – Temperature minime giornaliere nel luglio 2000 (a) e 2001 (b).

Fig. 2 – Daily minimum temperatures in July 2000 (a) and 2001 (b).

Le maggiori variazioni delle temperature minime sono state osservate a partire dal 2020, quando diverse località hanno registrato cali significativi delle temperature minime rispetto al periodo precedente (2000-2019). Ad Auriflama, le temperature sono variate da 15,44 °C a soli 1,31 °C, a Capivari (da 9,05 °C a 4,14 °C), a Limeira (da 9,63 °C a 3,31 °C) e a Tupã (da 8,98 °C a 5,10 °C), indicando un inverno più rigido nel 2021 (Figura 3b).

All'interno della serie analizzata, un altro anno che merita attenzione è il 2024, quando si è osservato che le

temperature minime sono rimaste stabili nella maggior parte delle località, come ad esempio Auriflama (15,66 °C) e Fernandópolis (16,30 °C), tra le più alte, mentre Apiaí è rimasta la località più fredda con una media di 8,08 °C per il mese. Nel 2025, tuttavia, un inverno con diversi fronti freddi è passato a luglio, determinando temperature minime significativamente più basse quell'anno. Le temperature minime medie mensili osservate per il 2025 hanno indicato un calo, con temperature minime inferiori alla norma per Apiaí (6,32 °C), Limeira (5,82 °C) e Capivari (7,25 °C). Anche nella regione nord-occidentale, considerata più calda, Fernandópolis ha registrato una media mensile di 14,17 °C a luglio, considerata una temperatura fredda per la regione (Figura 4).

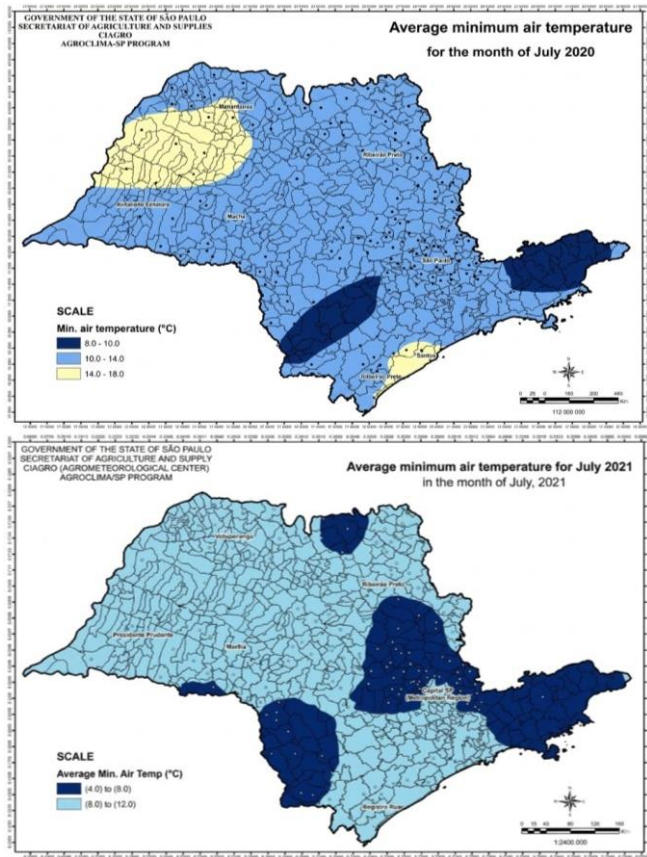


Fig. 3 – Temperature minime giornaliere nel luglio 2020 (a) e 2021 (b).
 Fig. 3 – Daily minimum temperatures in July 2020 (a) and 2021 (b).

Per quanto riguarda le precipitazioni, lo studio ha individuato quattro regioni che possono essere suddivise: la costa e la Serra do Mar (da 100 a 380 mm), il nord-ovest (da 0 a 70 mm), la Vale do Ribeira (da 80 a 350 mm) e la regione centrale, che comprende l'entroterra con i volumi più bassi nel mese di luglio (da 20 a 120 mm).

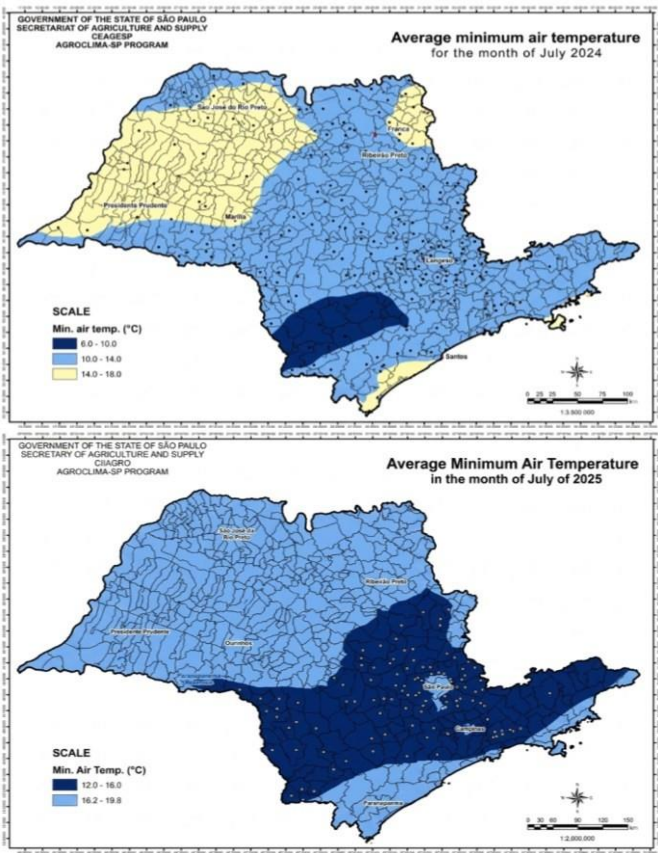


Fig. 4 – Temperature minime giornaliere nel luglio 2024 (a) e 2025 (b).
 Fig. 4 – Daily minimum temperatures in July 2024 (a) and 2025 (b).



Fig. 5 – Rappresentazione delle precipitazioni accumulate nel mese di luglio, per regione, nello stato di San Paolo, in Brasile.
 Fig. 5 – Representation of accumulated precipitation in the month of July, by region, in the state of São Paulo, Brazil.

Conclusioni

La regione meridionale dello stato ha registrato le temperature minime più basse, mentre le regioni della Serra do Mar e della Vale do Ribeira hanno registrato i

maggiori volumi di precipitazioni rispetto alle altre regioni analizzate.

Il numero di stazioni meteorologiche è aumentato da 70 (2000) a 230 (2025), garantendo una maggiore copertura delle condizioni termopluviometriche dello stato, elemento essenziale per il processo decisionale e l'organizzazione delle attività, soprattutto in ambito agricolo e per la prevenzione dei disastri naturali da parte della protezione civile.

Ringraziamenti

Questo studio è stato finanziato, in parte, dalla Fondazione per la Ricerca di San Paolo (FAPESP), Brasile. Numero di pratica 2021/11762-5; Istituto Agronomico/SAA/APTA; FUNDAG.

Bibliografia

Geneville, M.S.; Boock, A. Modelo estocástico para simulação da precipitação pluviométrica diária de uma região, 1983. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.18, n.9, p.959-966.

Sanches, R. G., Santos, B. C. dos, Neves, G. Z. de F., Silva, M. S. D., & Souza, P. H. de. (2022). Análise da tendência pluviométrica na região central do estado de São Paulo. Revista Brasileira De Climatologia, 30(18), 777–797.

CIIAGRO – Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (www.ciiagro.org.br).

SUSTAINABLE SOIL MANAGEMENT UNDER MEDITERRANEAN CONDITIONS: AGROECOLOGICAL APPROACHES FROM A LONG-TERM EXPERIMENT IN TUSCANY (ITALY)

GESTIONE SOSTENIBILE DEL SUOLO IN UN AMBIENTE MEDITERRANEO: APPROCCI AGROECOLOGICI IN UN ESPERIMENTO DI LUNGO TERMINE IN TOSCANA (ITALIA)

Margherita Santoni¹, Anita Maienza¹, Francesco Serafini^{2*}, Ottorino-Luca Pantani², Lorenzo Ferretti², Carlo Viti², Matteo Daghighio², Filippo Gallese¹, Tanguy Labaeye³, Gaio Cesare Pacini²

¹ Institute of BioEconomy-National Research Council (IBE-CNR), Via Madonna del Piano, 10, 50019 Sesto Fiorentino Florence, Italy

² Department of Agriculture, Food, Environment and Forestry (DAGRI), University of Florence, Piazzale delle Cascine, 18, 50144, Florence, Italy

³ Spie Batignolles Paysage, Avenue Du General Gallieni, 30, 92000, Nanterre, France

* francesco.serafini@unifi.it

Abstract

Soil health is central to sustainable food production and EU monitoring policies. In Mediterranean agroecosystems, agroecological management may enhance soil functioning, but amendment-specific effects remain unclear, especially in stockless organic systems. We assessed pelleted manure, fresh manure and on-farm biodynamic compost at the Montepaldi Long-Term Experiment (MoLTE), established in 1991 in Tuscany, Italy. Soil functioning was evaluated through chemical, physical and biological indicators covering nutrient status, structural integrity and biological activity, including microbial communities, microarthropods and earthworms. Crop yield was measured. During 2020–2023, amendments caused no significant short-term changes in soil indicators. Instead, crop rotation and climatic variability, especially the shift from annual cereal to perennial legume ley, drove soil dynamics and biological responses. Results suggest that amendment effects on soil health may require longer monitoring.

Parole chiave

Salute del suolo, agricoltura biodinamica; agricoltura biologica; compost; monitoraggio basato su indicatori

Keywords

Soil health, Biodynamic agriculture; Organic agriculture; Organic compost; Indicator-based monitoring

Introduzione

La salute del suolo è essenziale per la produzione alimentare, poiché circa il 95% delle derrate alimentari mondiali dipende dal suolo (Kopittke et al., 2019). Negli ultimi decenni, agricoltura biologica e biodinamica hanno acquisito rilevanza per la loro attenzione alla fertilità del suolo e all'equilibrio ecologico (Santoni et al., 2022), escludendo fertilizzanti e pesticidi sintetici e basandosi su processi biologici e input organici (Folina et al., 2025). In questo quadro, l'agroecologia rappresenta un approccio generale che integra i principi ecologici nella progettazione e gestione di agroecosistemi sostenibili (Gliessman, 1998).

Nel bacino del Mediterraneo, considerato un hotspot del cambiamento climatico, l'adozione di pratiche agroecologiche è particolarmente rilevante a causa dell'aumento previsto di caldo e siccità (Ali et al., 2022). Le condizioni semi-aride, l'elevata evapotraspirazione e la scarsità di precipitazioni contribuiscono a bassi livelli di sostanza organica del suolo (SOM), aumentando il rischio di degradazione ed erosione (Grilli et al., 2021). Strategie come rotazioni diversificate, copertura continua del suolo, riduzione del disturbo e ammendanti organici possono quindi favorire l'accumulo di SOM, migliorare l'efficienza d'uso dell'acqua e sostenere la produttività in condizioni climatiche variabili (Pulighe et al., 2025).

Anche l'Unione Europea ha posto la salute del suolo al centro delle proprie politiche. La Soil Monitoring Law definisce sani i suoli in buone condizioni chimiche, fisiche e biologiche e pone l'obiettivo di raggiungere suoli sani entro il 2050 (European Commission 2025). La EU Soil Strategy for 2030 riconosce inoltre la salute del suolo come fondamentale per sicurezza alimentare, biodiversità e obiettivi climatici, promuovendo sistemi di valutazione armonizzati e confrontabili tra Stati membri (European Commission 2021). Questo richiede indicatori integrati, sensibili alla gestione, capaci di descrivere dimensioni chimiche, fisiche e biologiche del suolo.

Gli esperimenti di lungo termine (LTEs) sono essenziali perché molte risposte del suolo alla gestione, come accumulo di SOM, miglioramento strutturale e recupero biologico, sono lente e dipendenti dal contesto. Tuttavia, negli LTE mediterranei restano rare le valutazioni integrate che combinano indicatori chimici, fisici e biota del suolo (Maienza et al., 2025).

La letteratura mostra che la gestione agroecologica può migliorare diversi indicatori di salute del suolo. Tra le pratiche agroecologiche più studiate, gli ammendanti organici mostrano effetti positivi sulla qualità del suolo (Maienza et al., 2025). Il compost può apportare SOM stabile, sostenere la diversità microbica e migliorare porosità e stabilità degli aggregati (Iraji et al., 2025), contribuendo

alla rigenerazione del suolo, al sequestro del carbonio e alla resilienza climatica (Krause et al., 2024). Tuttavia, l'efficacia di lungo periodo dipende da disponibilità, qualità degli input organici e riciclo degli scarti prodotti in azienda. Il compostaggio può essere una tra le pratiche adottate nelle aziende agricole che riduce la dipendenza da input esterni. Questo studio valuta gli effetti di tre ammendanti organici — letame organico pellettato, letame bovino organico fresco e letame bovino biodinamico compostato — sulla salute del suolo in un LTE mediterraneo. Le risposte sono state analizzate tramite indicatori chimici, fisici e biologici, includendo comunità microbiche, mesofauna e macrofauna. La resa colturale è stata inoltre misurata per collegare le risposte del suolo alle performance agronomiche.

Materiali e Metodi

La prova è stata impostata secondo un disegno a blocchi randomizzati, con due blocchi di gestione corrispondenti ai sistemi OldOrg e NewOrg. All'interno di ciascun blocco sono stati confrontati cinque trattamenti: controllo non trattato (NoNe), letame bovino organico pellettato applicato a $1,5 \text{ t ha}^{-1}$ (PeMa), letame bovino organico fresco da azienda certificata applicato a 30 t ha^{-1} (OrMa), lo stesso letame OrMa miscelato con preparati biodinamici e compostato in loco presso MoLTE per sei mesi, applicato a 8 t ha^{-1} (BaMa), e letame bovino biodinamico compostato prodotto in azienda biodinamica certificata e compostato per sei mesi, applicato a 8 t ha^{-1} (BdMa).

Gli ammendanti sono stati distribuiti due volte, nel settembre 2020 e nel settembre 2021. Le dosi scelte riflettono le quantità realisticamente utilizzate nelle aziende biologiche e biodinamiche regionali.

Sono stati valutati indicatori chimici, fisici e biologici del suolo.

Per le analisi chimiche sono stati raccolti campioni di suolo nel settembre del 2020, 2021 e 2022. Su ciascun campione sono stati determinati carbonio organico, azoto organico e fosforo disponibile.

Come indicatori fisici sono stati scelti la stabilità degli aggregati e la resistenza alla penetrazione.

La stabilità degli aggregati è stata valutata su campioni essiccati all'aria, con l'obiettivo di analizzare lo slaking, cioè la disaggregazione degli aggregati dovuta al rapido assorbimento d'acqua e alla compressione dell'aria intrappolata.

La resistenza alla penetrazione del suolo è stata misurata tra 0 e 50 cm di profondità con penetrometro manuale Eijkelkamp.

Come indicatori biologici sono stati scelti i lombrichi, i microartropodi e le comunità fungine.

L'abbondanza dei lombrichi è stata stimata tramite estrazione manuale di cubi di suolo di $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}$ e successiva conta del numero dei lombrichi.

I microartropodi del suolo sono stati campionati nello strato 0–10 cm secondo D'avino et al. (2023). E' stato poi calcolato l'indice di Qualità Biologica del Suolo (QBS-ar).

Le comunità fungine sono state analizzate alla fine dell'esperimento, nel 2022, dopo due applicazioni degli

ammendanti. Il DNA totale è stato estratto con FastDNA™ SPIN Kit for Soil.

Infine, è stata valutata la resa colturale, campionando aree di $0,25 \text{ m}^2$, sia per *Triticum aestivum* L. che per *Medicago sativa* L., le due colture presenti tra il 2020 e il 2023. Dopo l'essiccazione in stufa della granella e del foraggio a $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ fino a peso costante, è stata calcolata la resa in sostanza secca, espressa in t ha^{-1} .

Risultati e Discussione

Lo studio ha valutato gli effetti di diversi ammendanti organici — letame pellettato, letame fresco e compost biodinamico prodotto in azienda — sulla salute del suolo in un esperimento mediterraneo di lungo termine, utilizzando indicatori chimici, fisici e biologici, insieme alla resa colturale.

Nel complesso, nessun ammendante ha prodotto effetti significativi e coerenti sugli indicatori chimici, fisici o biologici nel periodo 2020–2023. Le differenze osservate sono state principalmente attribuite alla rotazione colturale e alle condizioni pedoclimatiche, più che al tipo di ammendante. Questo suggerisce che tre anni siano probabilmente insufficienti per rilevare cambiamenti stabili nella salute del suolo, soprattutto per parametri come sostanza organica, stabilità di struttura e fauna edafica.

Dal punto di vista chimico, il carbonio organico del suolo (SOC) ha mostrato un aumento temporaneo dopo l'applicazione degli ammendanti, seguito da un ritorno verso i valori iniziali. Tuttavia, lo stesso andamento è stato osservato anche nel controllo non fertilizzato, indicando che la variazione non era dovuta direttamente agli ammendanti.

Anche il fosforo disponibile ha seguito un andamento simile, con aumento nel 2021 e diminuzione nel 2022, probabilmente legato a dinamiche stagionali, rotazione e processi di adsorbimento o precipitazione del fosforo (Wuest, 2015; Menezes-Blackburn et al., 2017). Il fosforo totale era maggiore in NewOrg rispetto a OldOrg, ma tale differenza sembra riflettere un'eterogeneità spaziale iniziale tra blocchi, più che un effetto dei trattamenti. L'azoto organico non ha mostrato risposte significative. Nel complesso, questi risultati sono coerenti con studi che indicano come aumenti persistenti di SOM e nutrienti richiedano applicazioni ripetute e tempi più lunghi (Montemurro et al., 2007; Sánchez-Monedero et al., 2019). Anche gli indicatori fisici non hanno evidenziato effetti consistenti dei trattamenti. La stabilità degli aggregati presentava già differenze prima della fertilizzazione; dopo due applicazioni, solo BaMa ha mostrato una riduzione della stabilità di struttura. La resistenza alla penetrazione è aumentata progressivamente da circa 100 a 200 N cm^{-2} durante lo studio, indipendentemente dagli ammendanti. Questo aumento è probabilmente legato al passaggio da frumento, coltura annuale, a erba medica, coltura poliennale. Sebbene la letteratura riporti spesso effetti positivi degli ammendanti organici sulla stabilità degli aggregati (Tejada and Gonzalez, 2008; Celik et al., 2010; Ramos 2017), tali miglioramenti richiedono generalmente incrementi duraturi di SOM e apporti organici cumulativi (Peltre et al., 2015; Annabi et al., 2011). Risultati simili sono stati osservati da

Stroud et al. (2024), che non hanno rilevato differenze significative nella stabilità degli aggregati dopo 3–5 anni di incorporazione di ammendanti organici. Nei suoli mediterranei, alte temperature e siccità possono accelerare la mineralizzazione della SOM, rendendo necessari periodi più lunghi per osservare miglioramenti strutturali (Morales-Salmerón et al., 2025).

Gli indicatori biologici hanno mostrato i segnali più chiari, ma legati soprattutto al tempo e alla rotazione, non agli ammendanti. La probabilità di rilevare lombrichi è aumentata nel corso dell'esperimento, senza differenze significative tra trattamenti o blocchi. Questo andamento è coerente con il passaggio da frumento a erba medica, che garantisce copertura continua e minore disturbo, condizioni favorevoli alle popolazioni di lombrichi (Hoeffner et al., 2021; Peigné et al., 2009). Il risultato conferma, inoltre, osservazioni precedenti condotte nel MoLTE sulla sensibilità dei lombrichi al tipo di coltura e all'intensità del disturbo (Pantani et al., 2022).

Anche i microartropodi hanno risposto principalmente alla rotazione colturale, piuttosto che alla distribuzione degli ammendanti. Il QBS-ar è aumentato da circa 90 nel frumento del 2021 a circa 130 nel primo anno di erba medica e a circa 195 nel secondo anno, mentre l'abbondanza totale è cresciuta dal 2021 al 2022 e poi si è stabilizzata. Questo indica che il passaggio a una coltura perenne ha migliorato rapidamente l'idoneità dell'habitat per la mesofauna, probabilmente grazie a maggiore copertura, input di lettiera e radici, e microclima più favorevole. Tale interpretazione è coerente con Menta et al. (2018), secondo cui l'uso del suolo influenza fortemente il QBS-ar.

Le comunità fungine sono risultate stabili tra trattamenti e blocchi. Gli indici di diversità alfa Chao1 e Shannon non hanno mostrato differenze significative, e nemmeno NMDS e PERMANOVA hanno evidenziato separazioni nella struttura comunitaria. Considerando che i funghi sono bioindicatori sensibili e affidabili della salute ecosistemica (Warnasuriya et al., 2023), questa stabilità suggerisce che le differenze tra ammendanti non siano state sufficienti, nel breve periodo, a modificare in modo rilevabile la comunità fungina.

La resa colturale ha mostrato risposte specifiche per coltura. Nel frumento, le rese sono state più basse in BaMa e BdMa, intermedie nel NoNe e PeMa, e più alte con OrMa. Nell'erba medica, invece, l'aumento di resa è stato osservato solo in OldOrg–PeMa, mentre in NewOrg non sono emerse differenze tra trattamenti. Questi risultati confermano che le risposte produttive agli ammendanti organici nel breve periodo sono variabili e dipendono da coltura, caratteristiche dell'ammendante, suolo, gestione e clima, come riportato da Wortman et al. (2017).

Nel complesso, i risultati indicano che, nel breve periodo, il tipo di ammendante ha avuto un effetto limitato rispetto a rotazione colturale, fase della coltura, disturbo del suolo e variabilità pedoclimatica. Gli indicatori biologici, in particolare lombrichi e microartropodi, hanno mostrato una risposta più rapida al passaggio da frumento a erba medica, mentre gli indicatori chimici e fisici sono rimasti più stabili o dominati da variazioni temporanee. Lo studio evidenzia

quindi l'importanza di monitoraggi più lunghi e di approcci integrati multi-indicatore per distinguere gli effetti reali degli ammendanti e della gestione dei sistemi biologici mediterranei.

Conclusioni

Questo studio rappresenta, secondo gli autori, la prima valutazione integrata della salute del suolo in condizioni mediterranee basata su un insieme completo di indicatori chimici, fisici e biologici. A differenza di molti studi in cui gli indicatori biologici sono assenti o limitati a una sola componente (Maienza et al., 2025), sono stati analizzati diversi livelli trofici del biota del suolo: comunità fungine, microartropodi e lombrichi. Questo approccio multidimensionale è coerente con le politiche e i sistemi di valutazione della salute del suolo, che definiscono i suoli sani attraverso condizioni chimiche, fisiche e biologiche integrate.

I risultati indicano che la rotazione colturale e la variabilità climatica, in particolare il passaggio da frumento a erba medica, sono stati i principali fattori nel determinare la dinamica del suolo. Gli effetti più evidenti nel breve periodo sono quindi legati a fattori di sistema, come copertura permanente, minore disturbo e diversificazione colturale, in linea con i principi dell'Agricoltura Conservativa (Scialabba et al., 2014), più che al tipo di ammendante applicato.

Il proseguimento del monitoraggio presso il Montepaldi Long-Term Experiment è essenziale per rilevare eventuali effetti cumulativi degli ammendanti su struttura, nutrienti e comunità biotiche.

Evidenze di lungo termine basate su indicatori integrati possono supportare valutazioni comparabili e strategie agroecologiche più adatte ai sistemi biologici mediterranei, soprattutto in condizioni di crescente variabilità climatica.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano Concetta Vazzana e Giovanna Casella per il loro impegno e supporto nella realizzazione del progetto.

Bibliografia

- Ali, E., Cramer W., Carnicer, J., Georgopoulou, E., Hilmi, N.J.M., Le Cozannet, G., Lionello, P., 2022. Mediterranean region. In: Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. CUP 4, 2233–2272.
- Annabi, M., Le Bissonnais, Y., Le Villio-Poitrenaud, M., Houot, S., 2011. Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil, Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 144, Issue 1, Pages 382–389, ISSN 0167-8809. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.07.005>.
- Celik, I., Gunal, H., Budak, M., Akpinar, C., 2010. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil

- conditions, *Geoderma*, Volume 160, Issue 2, Pages 236-243, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.09.028>.
- D'Avino, L., Bigiotti, G., Vitali, F., Tondini, E., L'Abate, G., Jacomini, C., Cassi, F., Menta, C., 2023. QBS-ar SISS Working Group. QBS-ar and QBS-ar_BF index toolbox for biodiversity assessment of microarthropods community in soil. Zenodo.
- European Commission, 2025. Soil Monitoring Law. European Commission.
- European Commission, 2021. New EU Forest Strategy for 2030. European Commission.
- Folina, A., Kakabouki, I., Baginetas, K., Bilalis, D., 2025. Integration of Bioresources for Sustainable Development in Organic Farming: A Comprehensive Review. *Resources*, 14, 102. <https://doi.org/10.3390/resources14070102>.
- Gliessman, S.R., 1998. *Agroecology: ecological processes in sustainable agriculture*. Ann Arbor Press, Michigan.
- Grilli, E., Carvalho, S.C.P., Chiti, T., Coppola, E., D'Ascoli, R., La Mantia, T., et al., 2021. Critical range of soil organic carbon in southern Europe lands under desertification risk, *Journal of Environmental Management*, Volume 287, 112285, ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112285>.
- Hoeffner, K., Hotte, H., Cluzeau, D., Charrier, X., Gastal, F., Pérès, G., 2021. Effects of Temporary Grassland Introduction into Annual Crop Rotations and Nitrogen Fertilisation on Earthworm Communities and Forage Production. *Applied Soil Ecology* 162: 103893. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103893>.
- Iraji, F., Ballesta, J., Mongil-Manso, J., Pellejero, G., Miguélez, D., Najafi, P., Trujillo-Gonzalez, J., 2025. The effects of compost application on soil properties: Agricultural and environmental benefits. *International Journal Of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 10.57647/ijrowa-2025-8144.
- Kopittke, P. M., Menzies, N. W., Wang, P., McKenna, B. A., & Lombi, E., 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment international*, 132, 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>.
- Krause, H.M., Mäder, P., Fliessbach, A. et al., 2024. Organic cropping systems balance environmental impacts and agricultural production. *Sci Rep* 14, 25537 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76776-1>.
- Maienza, A., Buttafuoco, G., Biancofiore, G., et al., 2025. Soil Quality Indicators in Agroecological Practices: Lessons From a Systematic Review of Long-Term Experiments. *European Journal of Soil Science* 76, no. 4: e70138. <https://doi.org/10.1111/ejss.70138>.
- Menezes-Blackburn, D., Giles, C., Darch, T., George, T.S., Blackwell, M., Stutter, M., Shand, C., Lumsdon, D., Cooper, P., Wendler, R., Brown, L., Almeida, D.S., Wearing, C., Zhang, H., Haygarth, P.M., 2017. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. *Plant Soil*. 2018;427(1):5-16. doi: 10.1007/s11104-017-3362-2.
- Menta, C., Conti, F.D., Pinto, S., Bodini, A., 2018. Soil Biological Quality index (QBS-ar): 15 years of application at global scale, *Ecological Indicators*, Volume 85, 2018, Pages 773-780, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.11.030>.
- Montemurro, F., Maiorana, M., Convertini, G. et al., 2007. Alternative sugar beet production using shallow tillage and municipal solid waste fertiliser. *Agron. Sustain. Dev.* 27, 129–137 (2007). <https://doi.org/10.1051/agro:2006032>
- Morales-Salmerón, L., Fernández-Boy, E., León, R., Navarro-Fernández, C.M., Domínguez, M.T., 2025. Influence of the quality of organic amendments on Mediterranean agricultural soils following a drought episode. *Journal of Environmental Management*, Volume 380, 125093, ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125093>.
- Pantani, O.L., Ferretti, L., Santoni, M., Massenzio, S., D'Acqui, L.P., Pacini, G.C., 2022. Assessment of the Impact of Conventional and Organic Agroecosystems Management Options and Conservation Tillage on Soil Fertility at the Montepaldi Long Term Experiment, Tuscany. *European Journal of Agronomy* 140 (October): 126575. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126575>.
- Peigné, J., Cannavacuolo, M., Gautronneau, Y., Aveline, A., Giteau, J.L., Cluzeau, D., 2009. Earthworm populations under different tillage systems in organic farming. *Soil and Tillage Research*, Volume 104, Issue 2, Pages 207-214, ISSN 0167-1987. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.02.011>.
- Peltre, C., Nyord, T., Bruun, S., Jensen, L.S., Magid, J., 2015. Repeated soil application of organic waste amendments reduces draught force and fuel consumption for soil tillage, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 211, Pages 94-101, ISSN 0167-8809. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.004>.
- Pulighe, G., Belocchi, A., Tani, A. C., Lupia, F., 2025. Impacts of agricultural management practices on water cycle, soil erosion and crop yields in a Mediterranean agroecosystem, *Science of The Total Environment*, Volume 995, 180111, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180111>.
- Ramos, M.C., 2017. Effects of compost amendment on the available soil water and grape yield in vineyards planted after land levelling, *Agricultural Water Management*, Volume 191, Pages 67-76, ISSN 0378-3774. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.013>.
- Sánchez-Monedero, M.A., Cayuela, M.L., Sánchez-García, M., Vandecasteele, B., D'Hose, T., López, G., Martínez-Gaitán, C., Kuikman, P.J., Sinicco, T., Mondini, C., 2019. Agronomic Evaluation of Biochar, Compost and Biochar-Blended Compost across Different Cropping Systems: Perspective from the European Project FERTIPLUS. *Agronomy*, 9, 225. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050225>
- Santoni, M., Ferretti, L., Migliorini, P. et al., 2022. A review of scientific research on biodynamic agriculture. *Org. Agr.* 12, 373–396. <https://doi.org/10.1007/s13165-022-00394-2>.

- Scialabba, N., Pacini, G.C., Soren, M., 2014. Smallholder Ecologies.
- Stroud, J. L., Kemp, S. J., Sturrock, C. J., 2024. The effect of organic matter amendments on soil surface stability in conventionally cultivated arable fields. *Soil Use and Management*, 40, e12985. <https://doi.org/10.1111/sum.12985>.
- Tejada, M., Gonzalez, J.L., 2012. Influence of two organic amendments on the soil physical properties, soil losses, sediments and runoff water quality, *Geoderma*, Volume 145, Issues 3–4, 2008, Pages 325-334, ISSN 0016-7061. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.03.020>.
- Warnasuriya, S.D., Udayanga, D., Manamgoda, D.S., Biles, C., 2023. Fungi as environmental bioindicators. *Science of The Total Environment*, Volume 892, 164583, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164583>.
- Wortman, S.E., Holmes, A.A., Miernicki, E., Knoche, K. Pittelkow, C.M., 2017. First-Season Crop Yield Response to Organic Soil Amendments: A Meta-Analysis. *Agronomy Journal*, 109: 1210-1217. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.10.0627>.
- Wuest, S.B., 2015. Seasonal Variation in Soil Bulk Density, Organic Nitrogen, Available Phosphorus, and pH. *Soil Science Society of America Journal*, 79: 1188-1197. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.02.0066>.