

L'applicazione fogliare di minerali riflettenti naturali migliora le prestazioni fisiologiche e la resa della *Vitis vinifera* L. cv. *Chardonnay* in condizioni di stress climatico mediterraneo

AUTORI

Dattola A. *, Gullo G., Accardo A., Zappia R.

*Antonio Dattola: antonio.dattola@unirc.it; Antonella Accardo: aaccardo566@gmail.com; Gregorio Gullo: ggullo@unirc.it; Rocco Zappia: rocco.zappia@unirc.it

Associati:

Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento di Agraria, Reggio Calabria, Italia.

DOI: <https://doi.org/10.5073/vitis.2026.65.03>

Sommario

L'applicazione fogliare di minerali riflettenti naturali migliora le prestazioni fisiologiche e la resa della *Vitis vinifera* L. cv. *Chardonnay* in condizioni di stress climatico mediterraneo 1

Sintesi	2
Premessa	2
Parole chiave	2
1. Introduzione	3
2. Materiali e metodi	4
2.1. Sito sperimentale	4
2.2. Caratterizzazione climatica e termo-pluviometrica dell'area di studio (modelli di Köppen–Geiger e Bagnouls–Gausson)	4
2.3. Disegno sperimentale	5
2.4. Valutazione della resa	6
2.5. <i>Determinazione rifrattometrica degli zuccheri</i>	6
2.6. <i>Determinazione della concentrazione di ioni idrogeno e dell'acidità totale</i>	6
2.7. <i>Indagini ecofisiologiche</i>	6
2.8. <i>Misurazione della clorofilla fogliare</i>	7
2.9 Determinazione dei polifenoli totali e della capacità antiossidante totale	7
2.10 Analisi statistica	8
3. Risultati	8
4. Discussione	15
5. Conclusioni	18
6. Ringraziamenti:	19
7. Riferimenti	19

Sintesi

Premessa:

La viticoltura mediterranea deve affrontare sfide sempre più impegnative dovute al grave stress termico e idrico indotto dai cambiamenti climatici, che minacciano sia la resa che la qualità dell'uva. Questo studio ha valutato l'efficacia delle applicazioni fogliari di tre prodotti minerali riflettenti naturali – zeolite (TZL), Farina di Basalto® (TPB) e caolino (TK) – come strategie di adattamento sostenibili per la *Vitis vinifera* L. 'Chardonnay' coltivata in condizioni tipicamente mediterranee. Le prove sperimentali hanno dimostrato che questi film riflettenti a base minerale sono strumenti agronomici efficaci per mitigare lo stress da calore e siccità. Tutti i trattamenti hanno aumentato significativamente la resa e il peso medio dei grappoli rispetto al controllo non trattato, riducendo le perdite causate dalla disidratazione degli acini. Tra i materiali testati, la zeolite (TZL) ha raggiunto il peso dei grappoli più elevato e prestazioni fisiologiche superiori. Le valutazioni ecofisiologiche hanno confermato che i trattamenti riflettenti hanno preservato la funzione fotosintetica riducendo la fotoinibizione e migliorando sia la fotosintesi netta (Pn) che l'efficienza di utilizzo dell'acqua (WUE). Mentre la zeolite ha fornito la migliore risposta fisiologica e produttiva complessiva, la Farina di Basalto® ha prodotto uve della massima qualità. Nel complesso, l'uso di minerali riflettenti naturali, in particolare la zeolite, emerge come un approccio innovativo e sostenibile dal punto di vista ambientale per ottimizzare l'equilibrio energetico e idrico della vite, mantenendo così una produzione di uva di alta qualità nelle regioni mediterranee sempre più colpite dal riscaldamento globale.

Parole chiave: Resilienza climatica, schermature solari minerali, resilienza dei vigneti, caolino, Farina di Basalto®, zeolite.

Data di presentazione/accettazione: 14 novembre 2025

DATA DI PUBBLICAZIONE 27 gennaio 2026

1. Introduzione

I cambiamenti climatici stanno esercitando una pressione crescente sugli agroecosistemi di tutto il mondo. Gli studi di modellizzazione prevedono costantemente ulteriori aumenti delle temperature globali, regionali e locali, oltre a eventi meteorologici estremi più frequenti e intensi. Sebbene le proiezioni sulle precipitazioni rimangano incerte, diversi indici designano una tendenza verso eventi piovosi meno frequenti ma più intensi, che portano a periodi di siccità prolungati interrotti da tempeste intense (IPCC, 2021). Queste tendenze rappresentano una delle sfide più urgenti per l'agricoltura globale, un settore fortemente dipendente dalla stabilità climatica sia per la produttività che per la qualità. L'aumento delle temperature, le ondate di caldo e la scarsità d'acqua aumentano i costi di produzione, riducono l'efficienza delle rese e possono infine portare all'abbandono dei terreni e alla desertificazione nelle regioni vulnerabili (Lobell et al., 2011; Moriondo et al., 2015). La viticoltura è particolarmente sensibile alle anomalie termiche e radiative, poiché la fisiologia della vite è strettamente regolata dall'interazione tra clima, suolo e topografia. La temperatura svolge un ruolo fondamentale nel determinare la fotosintesi, l'accumulo di zuccheri e la sintesi dei metaboliti secondari (Keller, 2010; Van Leeuwen e Darriet, 2016). Di conseguenza, gli indici bioclimatici utilizzati per definire le zone viticole — come gli indici di Winkler e Huglin — si basano principalmente sulla temperatura. Le attuali tendenze al riscaldamento minacciano l'idoneità di molti vigneti mediterranei, dove il calore e la radiazione eccessivi causano già cambiamenti fenologici, squilibrio zuccheri-acidi, disidratazione degli acini e degradazione degli antociani e dei composti aromatici (Jones et al., 2005; Fraga et al., 2018). Le proiezioni suggeriscono uno spostamento verso nord della viticoltura, poiché l'Europa centrale e settentrionale acquisisce sempre più caratteristiche climatiche mediterranee, con estati più calde e secche e precipitazioni concentrate in primavera e in autunno. Al contrario, molte aree costiere dell'Europa meridionale potrebbero diventare inadatte alla produzione di uva di alta qualità (Hannah et al., 2013). In tali condizioni, le ondate di calore superiori a 40 °C possono aumentare la temperatura fogliare di 8–10 °C rispetto a quella ambiente, superando la soglia critica per il danno fotosintetico (Greer e Weedon, 2012). Ciò provoca fotoinibizione, stress ossidativo e danni irreversibili ai tessuti fotosintetici, accelerando lo sviluppo fenologico e separando la maturità tecnologica da quella fenologica, con il risultato finale di produrre vini troppo maturi e sbilanciati. Per contrastare questi effetti, i viticoltori stanno rivedendo le pratiche di gestione tradizionali e adottando strategie adattive volte a migliorare la resilienza dei vigneti (Santos et al., 2020). Le strategie a lungo termine includono la selezione di portainnesti e marze, l'ottimizzazione della disposizione del vigneto e i sistemi di allevamento, mentre gli approcci a breve termine si concentrano sulla gestione della chioma e sull'uso di materiali riflettenti naturali. Tra questi, le applicazioni fogliari di filtri solari a base minerale come caolino, Farina di Basalto® e zeolite hanno suscitato crescente attenzione, in quanto metodi economici ed ecocompatibili per ridurre la temperatura fogliare, limitare la perdita d'acqua e proteggere l'apparato fotosintetico aumentando la riflettanza negli spettri del visibile, dell'infrarosso e dell'ultravioletto (Glenn et al., 1999; Glenn, 2012; Brito et al., 2018). In questo contesto, il presente

studio valuta le risposte fisiologiche, biochimiche e produttive della *Vitis vinifera* L. 'Chardonnay' a diversi trattamenti con materiali riflettenti, con l'obiettivo di valutarne il potenziale come strategie di adattamento sostenibili per mitigare lo stress da calore e radiazione in condizioni mediterranee.

2. Materiali e metodi

2.1. Sito sperimentale

L'esperimento è stato condotto presso la cantina Azienda Agricola Brancati, situata nel comune di Palizzi, provincia di Reggio Calabria, Italia meridionale, all'interno dell'area geografica di produzione dell'Indicazione Geografica Protetta (IGP) "Palizzi" (Decreto Ministeriale 27/10/1995). Lo studio si è concentrato su *Vitis vinifera* L. 'Chardonnay' (codice 298, iscritta al Registro Nazionale – Gazzetta Ufficiale n. 323, 18/11/1978). Le misurazioni vegetative e produttive sono state raccolte in un periodo di due anni (2023–2024).

Il vigneto, impiantato sette anni prima dello studio, è stato formato secondo un sistema di cordoni speronati unilaterali, con una densità di impianto 5.000 viti/ha (2,5 m tra le file × 0,8 m tra le viti). Ogni vite è stata potata per mantenere 8–10 speroni, ciascuno con due gemme, corrispondenti a un potenziale carico di gemme di 40.000–50.000 gemme/ha. Il portainnesto utilizzato è stato 1103 Paulsen (*Vitis berlandieri* × *V. rupestris*; codice 625, Registro Nazionale – Gazzetta Ufficiale n. 101, 23/04/1971), selezionato per la sua elevata tolleranza alla siccità e alla salinità. Le file erano orientate nord–sud per ottimizzare l'intercettazione giornaliera della radiazione solare. Secondo la Mappa del Suolo Calabrese (ARSAC), il vigneto è situato all'interno del Sottosistema Pedologico 13.6 (Provincia Pedologica 13), caratterizzato da terreni di media tessitura con buona capacità di ritenzione idrica e adeguata profondità di radicazione.

2.2. Caratterizzazione climatica e termo-pluviometrica dell'area di studio (modelli di Köppen–Geiger e Bagnouls–Gausson)

L'area di studio rientra nell'areale del clima mediterraneo, classificato come Csa (clima temperato con estati calde e secche e precipitazioni concentrate in inverno) secondo il sistema Köppen–Geiger—tipico delle regioni costiere mediterranee centrale e meridionale. I dati climatici sono stati raccolti utilizzando una stazione meteorologica in azienda integrata con la piattaforma di monitoraggio VineSense IoT (Netsens LiveData®, Calenzano, Firenze, Italia). Il sistema registrava continuamente la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la radiazione solare, la velocità e la direzione del vento, la pressione atmosferica e le precipitazioni. Quattro unità periferiche wireless dotate di sensori di temperatura, umidità e bagnatura delle foglie garantivano un monitoraggio microclimatico accurato all'interno della chioma del vigneto. Tutti i dati venivano trasmessi in tempo reale a un'interfaccia cloud accessibile tramite computer o dispositivo mobile, supportando la viticoltura di precisione e il monitoraggio ambientale. I dati raccolti

per il periodo 2023–2024 hanno confermato un tipico schema di precipitazioni mediterranee, con una precipitazione media annua di circa 300 mm. Le temperature medie mensili hanno raggiunto il picco a luglio (28,8 °C) e il minimo a febbraio (12,1 °C), indicando una grave siccità estiva. Sia i dati pluviometrici che quelli termici sono stati forniti da ARPACAL – Multi-Risk Functional Centre. Per visualizzare l'equilibrio idroclimatico annuale, è stato costruito un climografo Bagnouls–Gausson, che traccia la temperatura media mensile (°C) rispetto alle precipitazioni (mm) su scala 1:2. In questo modello, i mesi in cui $P < 2T$ sono definiti come aridi. Il modello risultante ha rivelato una siccità estiva prolungata tipica dei climi mediterranei, influenzando in modo significativo le fasi fenologiche chiave e la disponibilità d'acqua nei vigneti non irrigati (Fig. 1).

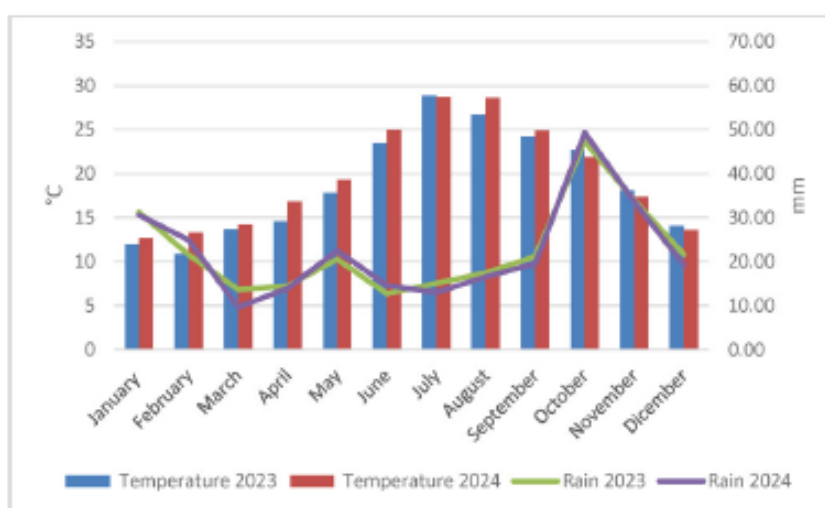


Figura 1 Caratterizzazione climatica dell'area di studio (modello di Bagnouls-Gausson), utilizzando i dati termici e pluviometrici registrati nel 2023 e nel 2024. Fonte dei dati: ARPACAL – Centro funzionale multirischio.

2.3. Disegno sperimentale

L'area sperimentale è stata suddivisa in blocchi randomizzati, per un totale di quattro blocchi. Ogni blocco includeva tre trattamenti con materiali riflettenti e un controllo non trattato (TNT). I trattamenti utilizzati erano tre con materiali riflettenti: Caolino (TK), Farina di Basalto® (TBP), Zeolite (TZL) e controllo trattati solo con acqua. Ogni trattamento includeva cinque piante per blocco, per un totale di 20 piante per trattamento. I materiali riflettenti sono stati applicati con uno spruzzatore a pressione alle dosi raccomandate dai rispettivi produttori, come elencato di seguito: Kaolin Surround WP (Serbios Srl, Rovigo, Italia) a una dose di 5 kg/hl; Farina di Basalto® (Basalti Orvieto Srl, Terni, Italia) a 3 kg/hl; e zeolite (Hydro Fert Srl, Barletta, Italia) da 1,5 kg/hl, garantendo una copertura uniforme. I prodotti sono stati applicati in momenti diversi: BBCH 75 – sviluppo di bacche, BBCH 77 – chiusura del grappolo e BBCH 83 – invaiatura.

2.4. Valutazione della resa

Per ogni trattamento, sono stati determinati i parametri di resa. I pesi di grappoli interi, bacche e rachide sono stati misurati per caratterizzare la composizione dei grappoli. Analisi quantitative e qualitative sono state effettuate su tutti i campioni trattati e sul controllo alla raccolta, che si è verificata alla fine di luglio.

2.5. Determinazione rifrattometrica degli zuccheri

Il contenuto totale di solidi solubili (TSSC) è stato determinato utilizzando un rifrattometro digitale tascabile PAL-1 (ATAGO Co., Ltd., Tokyo, Giappone), che incorpora la Compensazione Automatica della Temperatura (ATC). Lo strumento è stato calibrato con acqua distillata deionizzata a 20° C prima di ogni serie di misurazioni. Il residuo rifrattometrico è espresso in gradi Brix (o gradi di Balling): 1°Brix = 1% contenuto di zucchero ~10 g/L. Questo indice di maturazione indica il peso degli zuccheri nel mosto in grammi ogni 100 grammi di mosto.

2.6. Determinazione della concentrazione di ioni idrogeno e dell'acidità totale

L'acidità titolabile (TA) e il pH sono stati determinati utilizzando un titolatore potenziometrico (serie Titralab AT1000, HACH, Colorado, USA). Un'aliquota di 10 ml di mosto è stata titolata con una soluzione acquosa di idrossido di sodio (NaOH 0,5 N) fino alla neutralizzazione. Lo ftalato di potassio (KHC₈H₄O₄) è stato utilizzato come standard principale per la standardizzazione della base (NaOH). L'acidità titolabile (TA) è stata espressa come percentuale di acido tartarico. Il rapporto zucchero-acido (TSSC/TA) è stato calcolato come il rapporto tra solidi solubili totali e acidità titolabile, quest'ultima espressa in percentuale.

2.7. Indagini ecofisiologiche

Parametri di scambio gassoso, inclusi la fotosintesi netta (A_n , $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), la conduttanza stomatica (g_s , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), la concentrazione intercellulare di CO_2 (C_i , ppm), il tasso di traspirazione (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), l'efficienza nell'uso dell'acqua (WUE , $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol H}_2\text{O}^{-1}$); l'efficienza fotosintetica (A_n/C_i , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) è stata misurata utilizzando un analizzatore di gas a infrarossi (LI-6400XT, Li-COR Inc., Lincoln, NE, USA). Le misurazioni sono state effettuate in condizioni di saturazione della densità di flusso di fotoni fotosintetici ($\text{PPFD} = 2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e concentrazione di CO_2 ambiente (400 ppm), con un flusso d'aria di $500 \mu\text{mol s}^{-1}$, tra le 08:00 e le 11:00 in condizioni di campo. La cuvetta circolare dello strumento (6 cm^2) permetteva l'isolamento di una singola foglia, permettendo di confrontare la composizione dei flussi d'aria in entrata e in uscita per determinare i gradienti di H_2O e CO_2 . Le misurazioni sono state effettuate su tre foglie completamente espanse situate nella parte centrale dei germogli dell'anno corrente, su tre viti per trattamento ($n = 3$) nei quattro trattamenti sperimentali. Tutte le misurazioni ecofisiologiche sono state eseguite durante la finestra fenologica corrispondente agli stadi BBCH 75–77. Le misurazioni di fluorescenza hanno seguito il protocollo standard, includendo luce modulata (ML), un impulso luminoso saturante, luce attinica ($300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), un secondo impulso di saturazione e un impulso di luce rossa

lontana ($30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 720–730 nm), permettendo di determinare la fluorescenza minima e massima delle foglie adattate alla luce (F_0' e F_m'). Durante le misurazioni di fluorescenza, la radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) fornita dal fluorimetro è stata impostata a $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ per garantire il pieno adattamento alla luce.

L'efficienza quantica massima del PSII in condizioni adattate alla luce (F_v'/F_m') è stata calcolata secondo protocolli standard, dove $F_v' = F_m' - F_0'$, e F_v'/F_m' esprime l'efficienza dei centri di reazione aperti PSII. Il coefficiente di spegnimento fotochimico (qP) è stato determinato come

$$qP = \frac{F_m' - F'}{F_m' - F_0'}$$

e riflette lo stato redox della QA del plastochinone, fornendo informazioni sulla proporzione di centri di reazione PSII aperti. La velocità di trasporto degli elettroni (ETR) è stata stimata utilizzando la seguente equazione:

$$ETR = \Phi_{PSII} \times PPFD \times \alpha$$

dove Φ_{PSII} è la resa quantica effettiva di PSII, PPFD è la densità del flusso di fotoni fotosintetici sulla superficie della foglia, e α è il prodotto dell'assorbanza fogliare e della distribuzione dei quanti assorbiti tra PSI e PSII (presumibilmente 0,5). Tutte le misurazioni sono state condotte tra le 10:00 e le 00:00 in condizioni ambientali stabili per minimizzare la variabilità diurna. Per ogni pianta sono state misurate tre foglie e il valore medio è stato utilizzato per l'analisi statistica. La sorgente luminosa nella camera fogliare era costituita da LED che emettevano a 630 nm (90%) e 470 nm (10%).

2.8. Misurazione della clorofilla fogliare

Il contenuto di clorofilla è stato stimato indirettamente misurando l'indice SPAD con un misuratore portatile di clorofilla (SPAD-502, Konica Minolta, Osaka, Giappone). Lo strumento funziona con due sensori ottici a lunghezze d'onda distinte e un rivelatore di fotodiode al silicio (SPD). I dati SPAD sono validi nel rilevare differenze marcate tra i trattamenti (*Dattola et al.*, 2026). Le misurazioni sono state effettuate su 15 foglie completamente espanse e sane per trattamento, in condizioni di luce diffusa per ridurre al minimo la variabilità causata dalle differenze di illuminazione.

2.9 Determinazione dei polifenoli totali e della capacità antiossidante totale

Sono state effettuate analisi del contenuto totale di polifenoli (TP) e della capacità antiossidante totale (TAC). I campioni sono stati omogeneizzati utilizzando un frullatore Ultraturrax (20.000 giri/min; T 25 Basic, IKA Werke, Germania). Il TP e il TAC sono stati analizzati separatamente utilizzando uno spettrofotometro Lambda 35 (Perkin Elmer Corporation, USA). Prima di misurare il TPC e il TAC, sono state preparate le curve standard per ogni test. Il

TPC (mg equivalenti acido gallico FW⁻¹) è stato determinato utilizzando il metodo Folin-Ciocalteu (*Slinkard e Singleton, 1997*). Il TAC è stato determinato utilizzando il saggio TEAC modificato ed espresso come equivalenti µmol Trolox FW-1 (*Pellegrini et al., 1999; Re et al., 1999*).

2.10 Analisi statistica

Il set di dati è stato valutato tramite ANOVA a due fattori, in cui il trattamento e l'anno sono stati considerati fattori fissi, insieme alla loro interazione. Ogni volta che l'effetto del trattamento è risultato significativo, le differenze tra medie sono state valutate utilizzando il test posthoc di Tukey a un livello di significatività di $p < 0,05$. Tutti i valori sono presentati come media \pm errore standard, e lettere distinte indicano differenze statisticamente significative tra i trattamenti per ciascuna variabile misurata. Le analisi statistiche sono state effettuate utilizzando SPSS v.22.0 (IBM Corp., New York, USA). Per approfondire la struttura multivariata del set di dati e identificare modelli che collegano tratti fisiologici, biochimici e produttivi, è stata condotta un'analisi dei componenti principali (PCA) utilizzando XLSTAT 2014 (Addinsoft, New York, USA).

3. Risultati

I trattamenti con Farina di Basalto® (TPB) e zeolite (TZL) hanno prodotto rese di uva significativamente più elevate rispetto al controllo non trattato (TNT). La resa unitaria per vite era di 0,393 kg ($\pm 0,17$) per TZL e 0,262 kg ($\pm 0,13$) per TPB, entrambi superando il trattamento controllo (0,180 kg $\pm 0,10$) e il trattamento con caolino (0,196 kg $\pm 0,03$) (Tabella 1). Allo stesso modo, sono state registrate differenze significative nel peso medio del grappolo. Le viti trattate con zeolite (TZL) hanno prodotto i grappoli più pesanti (118,43 g $\pm 2,82$), seguiti da caolino (TK: 97,31 g $\pm 2,99$) e Farina di Basalto® (TPB: 88,45 g $\pm 3,08$), tutti notevolmente più alti del controllo (67,97 g $\pm 3,54$). Gli aumenti relativi sono stati del 74%, 43% e 30% per TZL, TK e TPB, rispettivamente, rispetto alle viti non trattate (Tabella 1)

Tabella 1 Caratteristiche produttive di grappoli di uva, rachide e bacche di *Vitis vinifera* L. 'Chardonnay' sottoposte a diversi trattamenti minerali riflettenti (TK = caolino; TBP = Farina di Basalto®; TZL = zeolite; TNT = controllo non trattato) durante le stagioni di crescita 2023 e 2024.

Trattamento	Peso medio del grappolo (g)	Peso medio del rachide (g)	Peso medio della bacca (g)
TK	97.313 \pm 2.99b	4.083 \pm 0.52c	1.010 \pm 0.08a
TNT	67.966 \pm 3.54d	3.963 \pm 0.32d	0.760 \pm 0.05c
TBP	88.446 \pm 3.08c	4.246 \pm 0.23b	0.980 \pm 0.04b
TZL	118.433 \pm 2.82a	4.720 \pm 0.85a	0.987 \pm 0.02b
T	**	**	*
Y	ns	*	ns
TxY	ns	ns	ns

I valori sono espressi come media \pm errore standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i trattamenti ($p < 0,05$). T = Effetto del trattamento; Y = effetto anno; TxY = Interazione Trattamento \times Anno; ns = non significativi; $p < 0,05 = *$; $p < 0,01 = **$.

Il peso medio delle bacche è rimasto più alto nei gruppi trattati, raggiungendo 1,01 g ($\pm 0,08$) per TK, 0,98 g ($\pm 0,04$) per TPB e 0,99 g ($\pm 0,02$) per TZL, mentre il controllo ha mostrato valori significativamente inferiori (0,76 g $\pm 0,05$).

Sono state osservate anche differenze statisticamente significative per il peso del rachide, superando i 4 g nelle viti trattate e rimanendo leggermente inferiori nel controllo (Tabella 1). L'effetto dell'anno generalmente non è stato significativo, tranne che per il peso del rachide, indicando che la maggior parte dei tratti è rimasta stabile nelle due stagioni. Non sono state rilevate interazioni significative tra trattamento × anno, confermando che la risposta ai trattamenti è stata costante durante entrambe le stagioni di crescita (Tabella 1).

Al momento della raccolta, i mosti di tutti i trattamenti hanno mostrato acidità titolabile (TA) e valori di pH simili, senza differenze statisticamente significative rispetto al controllo (Tabella 2). L'acidità titolabile media varia dallo 0,58% allo 0,61% di acido tartarico, e il pH medio è stato approssimativamente 3,55–3,65. Tuttavia, sono state osservate differenze significative nel rapporto zuccheri-acidi (TSSC/TA), che è risultato significativamente più alto nelle viti trattate. Il rapporto TSSC/TA ha raggiunto 44,55 (TBP), 43,92 (TK) e 42,34 (TZL), rispetto a 39,50 nel controllo, indicando un miglioramento dell'equilibrio di maturazione (Tabella 2). L'effetto annuale è stato generalmente trascurabile, tranne che per pH e TSSC/TA, mostrando una modesta variabilità stagionale. Non sono state rilevate interazioni significative trattamento × anno per nessuna variabile, confermando che i trattamenti si sono comportati in modo coerente in entrambe le stagioni di crescita. (Tabella 2).

Tabella 2 Indicatori di maturazione dei mosti di *Vitis vinifera* L. 'Chardonnay' ottenuti da viti sottoposte a diversi trattamenti minerali riflettenti (TK = caolino; TBP = Farina di Basalto®; TZL = zeolite; TNT = controllo non trattato) durante le stagioni di crescita 2023 e 2024.

Treat-ment	TSSC (°Brix)	pH	TA (%)	TSSC/TA
TK	25.300±0.32 ^{ns}	3.550±0.03 ^{ns}	0.579±0.02 ^{ns}	43.922±2.72 ^a
TNT	25.667±0.42	3.563±0.02	0.611±0.01	39.503±1.57 ^b
TBP	25.900±0.26	3.653±0.08	0.591±0.05	44.550±4.04 ^a
TZL	24.467±0.59	3.503±0.05	0.581±0.03	42.336±1.86 ^a
T	ns	ns	ns	*
Y	ns	*	ns	*
TxY	ns	ns	ns	ns

I valori sono espressi come media ± errore standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i trattamenti ($p < 0,05$). T = Effetto del trattamento; Y = effetto anno; T×Y = Interazione Trattamento × Anno; ns = non significativi; $p < 0,05 = *$.

Soil Plant Analysis Development (SPAD) index è risultato significativamente più alto in tutte le viti trattate rispetto al controllo (Tabella 3). Tuttavia, il trattamento con zeolite (TZL) ha mostrato il valore SPAD più alto (39,23 ±0,41),

seguito dalla Farina di Basalto® (TPB: 38,02 ±0,48) e dal caolino (TK: 37,64 ±0,59), rappresentando aumenti rispettivamente di circa il 18%, 15% e 14%, rispetto alle viti non trattate (33,07 ±0,33). Questi risultati indicano che i trattamenti riflettenti hanno conservato l'integrità della clorofilla e ridotto la degradazione del pigmento con un'elevata irradianza. L'effetto anno non è stato significativo, mostrando che i valori SPAD sono rimasti stabili durante le due stagioni di crescita. Analogamente, l'interazione trattamento × anno non è stata significativa, il che significa che la risposta dello SPAD ai trattamenti è stata costante nel tempo, senza cambiamenti nelle prestazioni del trattamento tra il 2023 e il 2024 (Tabella 3). La temperatura delle foglie ha mostrato differenze evidenti tra i trattamenti (Tabella 3). Il controllo non trattato ha mostrato i valori più alti, indicando un maggiore assorbimento di calore in assenza di materiali riflettenti. Al contrario, caolino, Farina di Basalto® e zeolite hanno tutti ridotto la temperatura delle foglie, con TK e TBP che mostrano l'effetto di raffreddamento più forte (Tabella 3). Il fattore di trattamento è stato significativo, confermando che le particelle riflettenti mitigano efficacemente il riscaldamento delle foglie. Al contrario, né l'anno né l'interazione trattamento × anno ha influenzato la temperatura delle foglie, indicando che la risposta ai trattamenti è stata coerente in entrambe le stagioni di crescita (Tabella 3).

Tabella 3 Effetto dei diversi trattamenti minerali riflettenti sull'indice SPAD e sulla temperatura delle foglie di *Vitis vinifera* L. 'Chardonnay' durante le stagioni di crescita 2023 e 2024. I trattamenti includono caolino (TK), Farina di Basalto® (TBP), zeolite (TZL) e il controllo non trattato (TNT).

Treat-ment	SPAD Index	T Leaf °C
TK	37.643±0.59 ^a	32.68 ^b
TNT	33.065±0.33 ^b	34.21 ^a
TBP	38.021±0.48 ^a	32.42 ^b
TZL	39.230±0.41 ^a	33.58 ^b
T	**	*
Y	ns	ns
TxY	ns	ns

I valori sono espressi come media ± errore standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i trattamenti ($p < 0,05$). T = Effetto del trattamento; Y = effetto anno; TxY = Interazione Trattamento × Anno; ns = non significativi; $p < 0,05 = *$; $p < 0,01 = **$.

Le misurazioni fluorometriche hanno rivelato che i con trattamenti minerali riflettenti hanno influenzato significativamente l'efficienza fotochimica della PSII (Tabella 4). L'efficienza massima di PSII nelle foglie adattate alla luce (F_v'/F_m') è stata più alta nel trattamento TZL (0,65 ±0,03), seguita da TBP (0,61 ±0,02) e TK (0,59 ±0,04), mentre il controllo ha registrato un valore sostanzialmente inferiore (0,46 ±0,01). Analogamente, la resa quantica effettiva

di PSII (ϕ PSII) è stata significativamente migliorata nelle viti trattate, raggiungendo $0,16 \pm 0,04$ (TZL) e $0,15 \pm 0,03$ (TPB), rispetto a $0,07 \pm 0,04$ nel controllo. Anche il quenching fotochimico (qP), indicatore dello stato redox dei centri di reazione PSII, ha seguito lo stesso schema, con i valori più alti in TZL ($0,31 \pm 0,03$) e TPB ($0,25 \pm 0,01$), intermedi in TK ($0,23 \pm 0,02$) e più bassi nel controllo ($0,14 \pm 0,03$). La velocità di trasporto elettronico (ETR), che rappresenta il flusso elettronico fotosintetico, è risultato nettamente più alto in TZL ($115,73 \mu\text{mol di elettroni m}^{-2} \text{s}^{-1} \pm 2,88$), TPB ($111,81 \pm 2,41$) e TK ($98,65 \pm 2,15$) rispetto al controllo ($77,81 \pm 1,76$). Questi risultati confermano che i materiali riflettenti hanno mitigato la fotoinibizione e mantenuto un'attività fotochimica efficiente sotto elevato stress luminoso. L'effetto del trattamento è stato significativo per tutti i parametri della fluorescenza della clorofilla, indicando che le applicazioni dei minerali riflettenti hanno costantemente influenzato le prestazioni fotochimiche PSII. L'effetto trattamento \times anno è stato significativo solo per ϕ PSII e qP, suggerendo che le condizioni stagionali abbiano influenzato questi specifici componenti dell'attività PSII. L'interazione trattamento \times anno è stata significativa solo per qP, mentre i parametri restanti hanno mostrato risposte al trattamento stabili in entrambe le stagioni di crescita.

Tabella 4 Effetto dei diversi trattamenti minerali riflettenti sui parametri di fluorescenza della clorofilla e fluorescenza in *Vitis vinifera* L. 'Chardonnay' durante le stagioni di crescita 2023 e 2024. I trattamenti includono caolino (TK), Farina di Basalto® (TBP), zeolite (TZL) e il controllo non trattato (TNT). Parametri misurati: F_v'/F_m' = massima efficienza di PSII nelle foglie adattate alla luce; ϕ PSII = rendimento quantistico effettivo del fotosistema II; qP = coefficiente di tempra fotochimica; ETR = velocità di trasporto elettroni.

Treatment	F_v'/F_m'	ϕ_{PS2}	qP	ETR $\mu\text{mol}_{\text{electrons}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$
TK	0.59 ± 0.04^a	0.13 ± 0.02^a	0.23 ± 0.02^b	98.65 ± 2.15^b
TNT	0.46 ± 0.01^b	0.07 ± 0.04^b	0.14 ± 0.03^c	77.81 ± 1.76^c
TBP	0.61 ± 0.02^a	0.15 ± 0.03^a	0.25 ± 0.01^b	111.81 ± 2.41^a
TZL	0.65 ± 0.03^a	0.16 ± 0.04^a	0.31 ± 0.03^a	115.73 ± 2.88^a
T	*	*	**	**
Y	ns	*	*	ns
TxY	ns	ns	*	ns

I valori sono espressi come media \pm errore standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i trattamenti ($p < 0,05$). T = Effetto del trattamento; Y = effetto anno; T \times Y = Interazione Trattamento \times Anno; ns = non significativi; $p < 0,05 = *$; $p < 0,01 = **$.

Le misurazioni dello scambio gassoso fogliare hanno dimostrato un chiaro miglioramento dell'attività fotosintetica nelle viti trattate (Tabella 5). I trattamenti riflettenti hanno notevolmente migliorato le prestazioni fotosintetiche delle viti. Il tasso netto di fotosintetico (A_n) è aumentato del 29–39%, mentre la conduttanza stomatica (g_s) è quasi raddoppiata, riflettendo un miglioramento dell'efficienza di diffusione e carbossilazione della CO_2 . La

concentrazione intercellulare di CO₂ (Ci) variava da 138 ± 15 a 161 ± 15 μmol/mol con errori standard sovrapposti, indicando l'assenza di differenze significative tra i trattamenti. Il tasso di traspirazione (E) è stato anch'esso aumentato fino al 34%. I risultati mostrano differenze nell'efficienza dell'uso dell'acqua (WUE), calcolate come il rapporto tra AN e E (WUE-E) e il rapporto tra AN e GS (WUE-gs) tra i vari trattamenti.

Tabella 5 Effetto dei diversi trattamenti minerali riflettenti sui parametri di scambio gassoso fogliare in *Vitis vinifera* L. 'Chardonnay' durante le stagioni di crescita 2023 e 2024. I trattamenti includono caolino (TK), Farina di Basalto® (TBP), zeolite (TZL) e il controllo non trattato (TNT). Parametri misurati: An = tasso fotosintetico netto; gs = conduttanza stomatica; Ci = concentrazione intercellulare di CO₂; E = tasso di traspirazione; WUE-gs = efficienza dell'uso dell'acqua basata sulla conduttanza stomatica, WUE-E = efficienza dell'uso dell'acqua basata sulla traspirazione; An/Ci = efficienza fotosintetica.

Treatment	An μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	gs mol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	Ci ppm	E mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹	WUE-gs μmol CO ₂ ·m- mol H ₂ O ⁻¹	WUE-E μmol CO ₂ ·m- mol H ₂ O ⁻¹	An/Ci mol m ⁻² s ⁻¹
TK	4.77±0.03 ^b	0.20±0.05 ^a	140.3±14.11	2.01±0.04 ^b	23.85±0.73 ^c	2.37±0.11 ^a	0.034±0.02 ^a
TNT	3.70±0.16 ^c	0.10±0.03 ^b	160.9±13.12	1.77±0.10 ^c	37±0.88 ^a	2.09±0.01 ^b	0.023±0.04 ^b
TBP	4.98±0.01 ^a	0.21±0.02 ^a	138.3±15.17	2.71±0.10 ^a	23.71±0.65 ^c	1.83±0.11 ^c	0.036±0.02 ^a
TZL	5.13±0.02 ^a	0.19±0.01 ^a	142.5±16.12	2.13±0.09 ^b	27±0.16 ^b	2.40±0.13 ^a	0.036±0.01 ^a
T	*	*	ns	*	**	**	*
Y	ns	*	ns	*	ns	ns	ns
TxY	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns

I valori sono espressi come media ± errore standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i trattamenti ($p < 0,05$). T = Effetto del trattamento; Y = effetto anno; T×Y = Interazione Trattamento × Anno; ns = non significativi; $p < 0,05 = *$; $p < 0,01 = **$.

I risultati mostrano differenze significative nell'efficienza dell'uso dell'acqua (WUE) tra i vari trattamenti e l'efficienza dell'uso dell'acqua (WUE-E) è migliorata del 13–15%. In particolare, il TK (caolino) ha mostrato un valore elevato AN/gs (23,85) e un valore AN/E (2,37), suggerendo una conduttanza stomatica efficiente e una gestione ottimale dell'acqua. TNT (controllo) ha registrato il valore AN/gs più alto (37), ma un AN/E relativamente basso (2,09), indicando che, nonostante un'elevata conduttanza stomatica, è stata persa più acqua per unità di carbonio assimilato. Il TBP (Farina di Basalto®) ha mostrato un valore AN/gs di 23,71 e un AN/E di 1,84, suggerendo una gestione dell'acqua meno efficiente rispetto a TK e TZL, con una traspirazione relativamente più alta. Infine, il TZL (zeolite) ha dimostrato un buon valore AN/gs (27) e un AN/E di 2,41, indicando un'efficienza stomatica efficace e una gestione complessiva favorevole dell'acqua. Analogamente, il rapporto tra assimilazione netta e concentrazione intercellulare di CO₂ (An/Ci) è aumentato di circa il 57%, evidenziando il miglioramento complessivo dell'efficienza fotosintetica nelle viti trattate. Nel complesso, i trattamenti hanno migliorato l'assimilazione della CO₂ e ridotto l'impatto negativo dello stress idrico, portando a un miglioramento delle prestazioni fotosintetiche e del raffreddamento della chioma grazie a una regolazione stomatica ottimizzata.

Il contenuto totale di polifenoli (TPB) e la capacità antiossidante totale (TAC) dei campioni di uva 'Chardonnay' hanno mostrato valori comparabili in tutti i trattamenti (TZL, TK, TPB e TNT). I valori medi di TPB variavano da 1,79 a 1,85 mg di GAE g FW⁻¹, mentre i valori TAC erano tra 12,1 e 12,6 μmol trolox g FW⁻¹ (Tabella 6). L'assenza di differenze statisticamente significative indica che i trattamenti non hanno influenzato in modo marcato né l'accumulo totale di polifenoli né il potenziale antiossidante dell'uva. La coerenza complessiva tra i trattamenti suggerisce che le uve 'Chardonnay' hanno mantenuto un profilo fenolico e antiossidante stabile nelle diverse condizioni testate. L'effetto anno (Y) non è stato significativo per la TP ma significativo per la TAC, suggerendo che la variabilità climatica interannuale influenzava la capacità antiossidante senza influenzare i livelli totali di polifenoli. La mancanza di un'interazione significativa tra trattamento × anno (T×Y) indica che la risposta di entrambi i parametri ai trattamenti applicati è stata coerente negli anni (Tabella 6).

Tabella 6 Polifenoli totali (TP) e capacità antiossidante totale (TAC) nelle uve 'Chardonnay' sottoposte a diversi trattamenti in vigneto. I trattamenti includono caolino (TK), Farina di Basalto® (TBP), zeolite (TZL) e il controllo non trattato (TNT).

Treatment	TP (mg GAE g FW ⁻¹)	TAC (μmol Trolox g FW ⁻¹)
TZL	1.82 ± 0.07	12.4 ± 0.5
TK	1.79 ± 0.06	12.1 ± 0.4
TPB	1.85 ± 0.05	12.6 ± 0.6
TNT	1.80 ± 0.08	12.3 ± 0.5
T	ns	ns
Y	ns	*
TxY	ns	ns

*I valori sono espressi come media ± errore standard. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative tra i trattamenti (p < 0,05). T = Effetto del trattamento; Y = effetto anno; T×Y = Interazione Trattamento × Anno; ns = non significativi; p < 0,05 = *;*

L'Analisi dei Componenti Principali (PCA) è stata eseguita per esaminare le relazioni tra variabili produttive, fisiologiche e qualitative. I primi due componenti principali spiegano il 94,67% della varianza totale (Tabella 7), confermando che la rappresentazione a dimensione ridotta forniva un riassunto robusto del set di dati. Le variabili legate alla produttività e alle prestazioni ecofisiologiche (peso del grappolo, SPAD, Fv'/Fm', qP, ETR, An, gs, An/Ci) erano fortemente associate al primo componente principale (F1), mentre le variabili che descrivono la chimica del mosto (pH, TSSC) erano più strettamente legate a F2.

Tabella 7 Valori Cos^2 (%) delle variabili che contribuiscono alla formazione delle prime tre componenti principali (F1, F2, F3) dell'Analisi delle Componenti Principali (PCA).

Variables	F1	F2	F3
Average bunch weight	0.7243	0.2736	0.0021
Average rachis weight	0.5114	0.2368	0.2518
Average berry weight	0.9173	0.0003	0.0824
TSSC	0.1854	0.8030	0.0115
pH	0.0001	0.9888	0.0111
TA	0.8022	0.0626	0.1352
TSSC/TA	0.7156	0.1912	0.0931
SPAD Index	0.9877	0.0122	0.0000
Fv'/Fm'	0.9810	0.0147	0.0043
ϕ PS2	0.9856	0.0003	0.0141
qP	0.8922	0.0689	0.0389
ETR	0.9383	0.0000	0.0617
An	0.9987	0.0004	0.0010
gs	0.9149	0.0456	0.0395
E	0.4552	0.4559	0.0889
WUE-E	0.0339	0.8096	0.1565
WUE-gs	0.3381	0.8031	0.1475
An/Ci	0.9939	0.0048	0.0013
TP	0.3340	0.6555	0.0105
TAC	0.5822	0.4091	0.0088

Tabella 8 Valori Cos^2 (%) delle osservazioni che contribuiscono alla formazione delle prime tre componenti principali (F1, F2, F3) dell'Analisi delle Componenti Principali (PCA). I trattamenti includono caolino (TK), Farina di Basalto® (TBP), zeolite (TZL) e il controllo non trattato (TNT).

Observations	F1	F2	F3
TK	0.2412	0.0252	0.7336
TPB	0.9960	0.0012	0.0028
TNT	0.2871	0.6941	0.0188
TZL	0.4888	0.4721	0.0390

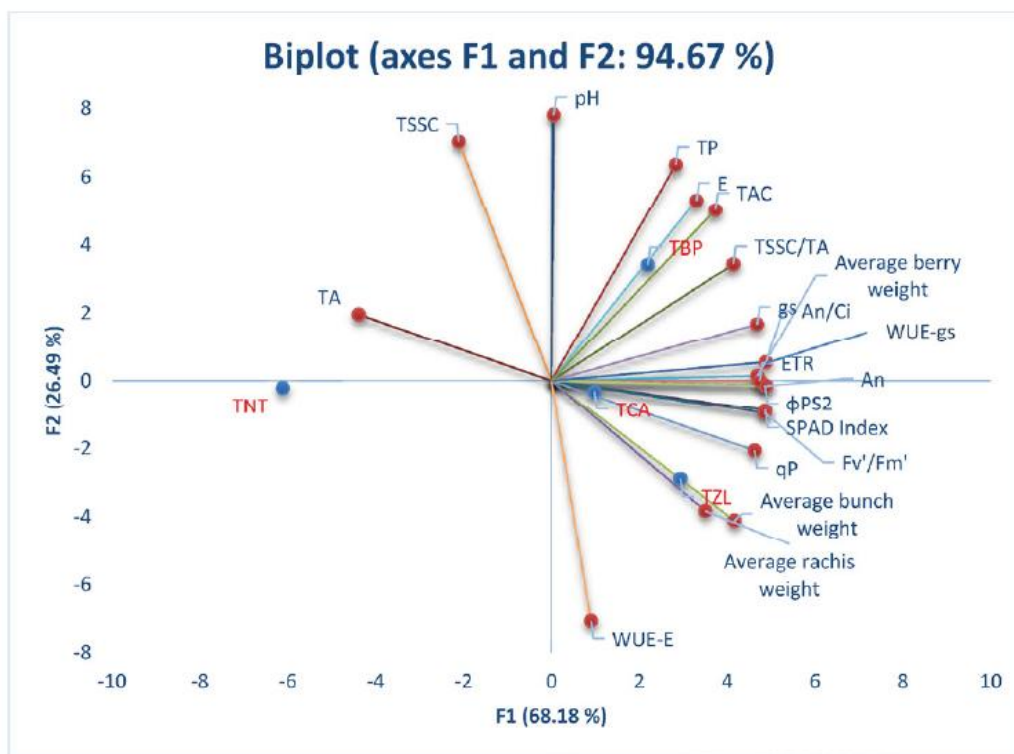


Figura 2 Biplot dell'Analisi dei Componenti Principali (PCA), che spiega il 94,67% della varianza totale, illustra la distribuzione dei trattamenti basandosi sulle principali variabili vegetative, produttive e qualitative di *Vitis vinifera* L. 'Chardonnay'. I trattamenti includono caolino (TK), Farina di Basalto® (TBP), zeolite (TZL) e il controllo non trattato (TNT).

4. Discussione

Le stagioni di crescita coperte da questo studio sono state caratterizzate da siccità prolungata e temperature elevate, condizioni che influenzano sempre più la viticoltura in tutte le principali regioni viticole, in particolare nelle zone collinari e costiere dell'Italia centrale e meridionale. Questi estremi climatici hanno influenzato negativamente la gestione dei vigneti, il potenziale di resa e il profilo analitico e aromatico dei mosti. Negli ultimi decenni, come confermato dai modelli meteorologici avversi durante il ciclo di crescita della vite, tali fenomeni si sono intensificati, rendendo la gestione dei vigneti sempre più impegnativa e richiedendo interventi agronomici tempestivi e preventivi. In queste condizioni, le perdite di resa sono spesso associate a una riduzione del peso dei grappoli e alla disidratazione delle bacche dovuta a scottature solari.

I risultati di questo studio dimostrano chiaramente che in *Vitis* l'uso di prodotti minerali riflettenti può mitigare efficacemente gli effetti dannosi della siccità e dello stress termico sulle prestazioni dei vigneti negli ambienti mediterranei. Entrambi i trattamenti hanno migliorato significativamente la resa, la struttura dei grappoli e il peso delle bacche, mantenendo l'integrità del grappolo, come dimostrato dai pesi più elevati del rachide. Aumenti di rese dopo l'applicazione di prodotti antitranspiranti o riflettenti per diverse colture da frutto, tra cui *Vaccinium*

corymbosum (Spiers et al., 2003), *Olea europaea* (Saour & Makee, 2003), *Malus domestica* (Glenn et al., 2001), *Pyrus communis* (Puterka et al., 2000) e *Citrus sinensis* e *Citrus clementina* (Gullo et al., 2020a, b). Questi risultati, presi insieme, supportano l'ipotesi che i prodotti riflettenti siano efficaci nel ridurre lo stress in condizioni ambientali estreme.

Tra i trattamenti, il TZL, seguito dal TPB, ha costantemente prodotto le migliori prestazioni vegetative e produttive, aumentando la resa per vite e il peso del grappolo rispetto al controllo. La modulazione controllata dello spettro luminoso tramite la gestione della chioma o rivestimenti riflettenti rappresenta un approccio agronomico valido per mitigare gli effetti dannosi da calore e radiazioni eccessive, in particolare nelle zone viticole semi-aride colpite dal riscaldamento globale.

La luce all'interno della chioma è composta sia da componenti diretti che filtrati, che variano in base alle proprietà ottiche di foglie, frutti e germogli. L'intervallo spettrale rilevante per i processi fisiologici delle piante va da 280 a 800 nm, comprendendo UV-B (280–320 nm), UV-A (300–400 nm), radiazione fotosinteticamente attiva (PAR, 400–700 nm) e rosso lontano (FR, 700–800 nm). La PAR stessa include bande blu (400–500 nm), verdi (500–600 nm) e rosse (600–700 nm), che influenzano in modo differenziale l'attività fotosintetica e fotomorfogenica. L'uso di film minerali riflettenti migliora la riflettanza della chioma nelle regioni UV e visibili, ottimizzando la distribuzione della PAR e favorendo così un'attività fisiologica equilibrata.

Dal punto di vista fisiologico, i trattamenti hanno preservato il contenuto di clorofilla e l'integrità fotosintetica.

I valori più alti di SPAD osservati nelle viti trattate confermano che i film riflettenti hanno prevenuto la degradazione del pigmento sotto stress. Risultati comparabili sono stati riportati in *Physalis peruviana* (Segura-Monroy et al., 2015) e *Carya illinoensis* (Lombardini et al., 2005). Smirnoff (1993) ha descritto la riduzione della clorofilla come un segno distintivo dello stress ossidativo causato dalla degradazione del pigmento o dalla sintesi compromessa; di conseguenza, mantenere i livelli di SPAD riflette una riduzione del danno ossidativo nelle viti trattate.

Le misurazioni fluorometriche (F_v'/F_m' , ϕ_{PSII} , qP ed ETR) hanno indicato che i rivestimenti riflettenti riducono efficacemente la fotoinibizione e migliorano l'efficienza del trasporto degli elettroni. Temperature elevate combinate con radiazioni eccessive e disponibilità d'acqua limitata sono note per compromettere la funzionalità del fotosistema II (PSII), causando un fenomeno chiamato "photoassimilative down-regulation", che può evolvere verso la fotoinibizione cronica o disfunzioni fotosintetiche irreversibili (Ohira et al., 2005). Tale stress può portare alla denaturazione dei pigmenti delle antenne e dei centri di reazione, culminando nella degradazione proteolitica della proteina D1.

Per contrastare questo, le piante attivano meccanismi fotoprotettivi — principalmente un quenching non fotochimico tramite il ciclo violaxantina–anterosantina–zeaxantina (VAZ) — che dissipano l'energia in eccesso sotto forma di calore, prevenendo il fotodanno e la senescenza precoce delle foglie. La dissipazione termica rappresenta

fino al 97% dell'energia assorbita in eccesso, mentre la fotorespirazione e la fluorescenza della clorofilla contribuiscono con frazioni minori (Smirnoff, 1993). Temperature fogliari superiori a 35 °C riducono drasticamente l'efficienza fotochimica, misurabile come diminuzione di F_v/F_m (Björkman e Demmig, 1987). Il rapporto teorico ottimale F_v/F_m è 0,83; valori più bassi indicano stress o danno PSII. In questo studio, valori più elevati di F_v/F_m' e ETR nelle viti trattate confermano che i film minerali riflettenti hanno preservato l'efficienza del PSII e limitato il danno termico. Le misurazioni dello scambio gassoso supportano ulteriormente questi risultati. Le viti trattate con zeolite (TZL) e Farina di Basalto® (TBP) hanno mostrato un'assimilazione netta di CO₂ e una conduttanza stomatica più elevate rispetto ai controlli non trattati. Ciò suggerisce che i materiali riflettenti migliorano efficacemente l'efficienza nell'uso dell'acqua (WUE), permettendo alle viti di mantenere l'apertura stomatica e l'attività fotosintetica con una disponibilità idrica limitata. Riducendo la temperatura delle foglie e moderando la traspirazione, questi trattamenti miglioravano il rapporto tra assimilazione del carbonio e perdita d'acqua, un fattore cruciale per mantenere la produttività durante condizioni di siccità. TK (caolino), con il suo alto valore AN/g_s (23,85) e AN/E (2,37), suggerisce una conduttanza stomatica efficiente e una gestione ottimale dell'acqua. Il TNT (controllo), invece, ha mostrato il più alto AN/g_s (37) ma un AN/E relativamente più basso (2,09), suggerendo che, nonostante una buona conduttanza stomatica, la perdita d'acqua per unità di assimilazione del carbonio fosse maggiore. Queste risposte fisiologiche sono in linea con studi precedenti sull'uso di materiali riflettenti per migliorare l'efficienza dell'uso dell'acqua in altre specie (Glenn e Puterka, 2005; Brito *et al.*, 2018; Dattola e Gullo, 2024; Gullo *et al.*, 2020a, b).

I risultati mostrano differenze significative nell'efficienza dell'uso dell'acqua (WUE) tra i trattamenti. TK (caolino) ha mostrato un forte valore WUE-g_s (AN/g_s) (23,85) e WUE-E, AN/E (2,37), suggerendo una conduttanza stomatica efficiente e una gestione ottimale dell'acqua. Il TNT (controllo) ha mostrato il valore AN/g_s più alto (37), ma un AN/E relativamente più basso (2,09), indicando un uso dell'acqua meno efficiente. Il TBP (Farina di Basalto®) aveva un valore AN/g_s di 23,71 e un AN/E di 1,84, suggerendo un'efficienza moderata rispetto a TK e TZL, con una traspirazione relativamente superiore. Infine, TZL (zeolite) ha mostrato valori favorevoli sia per AN/g_s (27) che per AN/E (2,41), indicando una buona gestione complessiva dell'acqua. Inoltre, i nostri risultati sono in accordo con studi precedenti che hanno dimostrato che l'esposizione alla luce delle chiome della vite influenza l'accumulo di solidi solubili, acidi organici e composti fenolici (Dokoozlian e Kliewer, 1996; Bergqvist *et al.*, 2001). Per quanto riguarda l'acidità dell'uva, le concentrazioni di acidi malico e tartarico — che insieme rappresentano circa il 90% dell'acidità totale — sono state stabili durante i trattamenti, confermando che i rivestimenti riflettenti non alterano la composizione del mosto. *Vitis vinifera* è unica tra le colture da frutto per la sua capacità di accumulare grandi quantità di acido tartarico L(+), raggiungendo 150 mM L⁻¹ all'invasatura e 25–75 mM L⁻¹ (3,8–11,3 g L⁻¹) a maturità (Ribéreau-Gayon *et al.*, 2005).

Sebbene il TPB fosse leggermente meno efficace del TZL in termini di produttività, eccelle nei parametri

qualitativi, come la stabilità del pH e l'equilibrio zucchero/acido, suggerendo che la scelta del prodotto può essere adattata a specifici obiettivi di produzione. Il caolino (TK) ha fornito miglioramenti moderati ma è stato complessivamente meno efficace, probabilmente a causa delle differenze nella dimensione delle particelle, nella riflettività e nell'aderenza che ne hanno influenzato la persistenza e la copertura.

Le analisi chimiche del mosto hanno confermato che la qualità dell'uva non è stata influenzata negativamente dai trattamenti. Acidità e pH titolabili sono rimasti all'interno dell'intervallo ottimale per la vinificazione, dimostrando che i guadagni di produttività non sono stati ottenuti a scapito della composizione del mosto. I risultati multivariati (PCA) rafforzano queste osservazioni: la zeolite (TZL) ha raggruppato i carichi più alti per tratti fotosintetici e produttivi, mentre la Farina di Basalto® (TPB) è stata associata a parametri legati alla qualità dell'uva. Il controllo non trattato è stato raggruppato separatamente, riflettendo la sua minore efficienza fisiologica e maggiore suscettibilità allo stress termico e radiativo.

Nel complesso, questo studio evidenzia i benefici agronomici e fisiologici delle applicazioni dei minerali riflettenti come strategia preventiva nella viticoltura mediterranea. Migliorando l'efficienza fotosintetica, l'efficienza nell'uso dell'acqua e la resilienza del vigneto alle crescenti ondate di calore e siccità previste negli scenari climatici futuri.

Inoltre, la concentrazione di caolino utilizzata in questo trial era probabilmente elevata. Infatti, concentrazioni eccessivamente alte riducono intrinsecamente la radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) che raggiunge la superficie della foglia, causando una riduzione della capacità fotosintetica. Questo probabilmente spiega, almeno in parte, le prestazioni inferiori osservate con il caolino in questo studio. Pertanto, sia la concentrazione della sospensione sia la specie/cultivar rappresentano fattori critici che possono influenzare i risultati.

L'adozione di tali pratiche sostenibili può quindi contribuire a mantenere sia la resa che la qualità dell'uva, supportando la viticoltura adattativa al clima nelle regioni più vulnerabili al riscaldamento globale.

5. Conclusioni

Questo studio dimostra chiaramente che lo scenario climatico attuale, caratterizzato da un aumento dello stress termico e idrico, compromette significativamente la produttività e la qualità della vite. Le prove sperimentali hanno confermato che le applicazioni fogliari di prodotti minerali riflettenti naturali come caolino, Farina di Basalto® e zeolite rappresentano una strategia agronomica efficace per mitigare gli impatti negativi delle alte temperature e della siccità su *Vitis vinifera* L. 'Chardonnay'. Questi trattamenti non solo aumentano la resa, aumentando il peso medio del grappolo e della bacca, ma preservavano anche l'efficienza fotosintetica delle foglie, come dimostrato da parametri ecofisiologici migliorati (indice SPAD, fluorescenza della clorofilla e scambio gassoso). Tra i materiali testati, la zeolite ha ottenuto i risultati più soddisfacenti sia in termini di produzione che di prestazioni fisiologiche, sottolineando la sua capacità di sostenere le viti in condizioni ambientali avverse. Un aumento dell'efficienza nell'uso dell'acqua, la riduzione della fotoinibizione e il mantenimento della funzionalità fotosintetica durante i

periodi critici di stress rappresentano risultati chiave per una viticoltura sostenibile e resiliente al clima. Questi risultati supportano l'adozione di strategie preventive basate su rivestimenti riflettenti naturali in grado di ottimizzare il bilancio energetico e idrico della vite senza compromettere la composizione del mosto o la qualità della resa. In conclusione, la gestione dei vigneti durante il cambiamento climatico richiede approcci innovativi e sostenibili basati su una profonda comprensione della fisiologia della vite. L'uso di film minerali riflettenti—in particolare zeolite e Farina di Basalto®—emerge come una risorsa preziosa per mantenere la produttività e la qualità dei frutti nelle aree vinicole mediterranee sempre più esposte al riscaldamento globale.

6. Ringraziamenti:

Gli autori riconoscono con gratitudine il sostegno finanziario del Programma di Sviluppo Rurale (PSR) Calabria 2014–2020 – Misura 16 – Intervento 16.2.1 – Operazione 16.2.1.2 – Progetto pilota "La Vigna del Padre" (Domanda SIAN n. 24250071859, CUP: E59J23003100006). Un ringraziamento speciale è rivolto alla Terre Grecaniche Cooperative per aver gentilmente ospitato la sperimentazione e a tutto il personale tecnico coinvolto nel monitoraggio sul campo e nella raccolta dati. Gli autori desiderano inoltre esprimere la loro sincera gratitudine al Project Manager, Salvatore Orlando, per la sua professionalità.

Conflitti di interesse

Gli autori dichiarano di non avere conflitti di interesse.

Contributo dell'autore

Concettualizzazione: [D. A., G. G., Z. R.] Metodologia: [D. A., G. G.] Indagine: [D. A., G. G.] Cura dei dati: [D. A., G. G.] Analisi formale: [A. A., D. A.] Validazione: [D. A., G. G.] Visualizzazione: [D. A., G. G.] Software: [D. A., G. G.] Risorse: [Z. R.] Acquisizione di finanziamenti: [Z. R.] Amministrazione del progetto: [Z. R.] Supervisione: [G. G., Z. R.] Scrittura – bozza originale: [D. A., G. G.] Scrittura – revisione e revisione: [D. A., G. G.]

Gli autori dichiarano che non sono stati utilizzati strumenti di intelligenza artificiale nella preparazione, analisi o stesura di questo manoscritto. Tutto il lavoro è stato condotto dagli autori secondo le buone pratiche scientifiche.

7. Riferimenti

Bergqvist, J., Dokoozlian, N., Ebisuda, N., 2001: Sunlight exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the Central San Joaquin Valley of California. *American Journal of Enology and Viticulture*, 52, 1–7. DOI: 10.5344/ajev.2001.52.1.1.

Björkman, O., Demmig, B., 1987: Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta*, 170, 489–504.

Brito, C., Dinis, L. T., Moutinho-Pereira, J., Correia, C., 2019: Kaolin, an emerging tool to alleviate the effects of abiotic stresses on crop performance. *Scientia Horticulturae*, 250, 310-316. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.02.070.

- Brito, C., Guedes, J., Oliveira, H.,** 2018: Effects of kaolin and zeolite on grapevine physiology under heat stress. *Scientia Horticulturae*, 239, 35–43. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.04.012.
- Dattola, A., Gullo, G.,** 2024: Effect of two reflective materials on the physiological and production behaviour of bergamot (*Citrus bergamia* Risso et Poiteau) plants. *Scientia Horticulturae*, 338, 113636. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.113636.
- Dattola, A.; Gullo, G.; Zappia, R.,** 2026: Comparative Effectiveness of Kaolinite, Basalt Powder, and Zeolite in Mitigating Heat Stress and Increasing Yield of Almond Trees (*Prunus dulcis*) Under Mediterranean Climate. *Agriculture* 2026, 16, 220. DOI: 10.3390/agriculture16020220.
- Dokoozlian, N. K., Kliewer, W. M.,** 1996: Influence of light on grape berry growth and composition during fruit development. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121(5), 869–8
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Santos, J. A.,** 2018: Climate change impacts on viticulture and wine quality: A review. *Food and Energy Security*, 7(2), e00139. DOI: 10.1002/fes3.139.
- Glenn, D. M.,** 2012: “The mechanisms of plantstress mitigation by kaolin-based particle films” *HortScience* 47(6):710-711. DOI: 10.21273/HORTSCI.47.6.710.
- Glenn, D. M.; Puterka, G. J.; vanderZwet, T.; Byers, R. E.; Feldhake, C.,** 1999: Hydrophobic particle films: a new paradigm for suppression of arthropod pests and plant diseases. *Journal of Economic Entomology*, Vol. 92 (4) 1 August, pp. 759–771. DOI: 10.1093/jee/92.4.759.
- Glenn, D. M., Puterka, G. J., Drake, S., Unruh, T. R., Knight, A. L., Baherle, P., Prado, E., Baugher, T.,** 2001: Particle film application influences apple leaf physiology, fruit yield, and fruit quality. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126, 175–181.
- Greer, D. H., Weedon, M. M.,** 2012: High temperature effects on photosynthesis and transpiration in grapevine leaves. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 18(1), 1–9. DOI: 10.1111/j.1755-0238.2011.00168.x.
- Gullo, G., Dattola, A., Vonella, V., Zappia, R.,** 2020a: Effects of two reflective materials on gas exchange, yield, and fruit quality of sweet orange trees (*Citrus sinensis* L. Osb.). *European Journal of Agronomy*, 118, 9. DOI: 10.1016/j.eja.2020.126071.
- Gullo, G., Dattola, A., Vonella, V., Zappia, R.,** 2020b: Improvement of productive performance in clementine trees (*Citrus clementina* Hort. ex Tan.) sprayed with reflective materials. *International Journal of Fruit Science*, 20, S1681–S1695.
- Hannah, L., Roehrdanz, P. R., Ikegami, M., Shepard, A. V., Shaw, M. R., Tabor, G., Hijmans, R. J.,** 2013: Climate change, wine, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(17), 6907–6912. DOI: 10.1073/pnas.1210127110.
- IPCC 2021:** Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>, (Accessed: November 2024).
- Jones, G. V., White, M. A., Cooper, O. R., Storchmann, K.,** 2005: Climate change and global wine quality. *Climatic Change*, 73(3), 319–343. DOI: 10.1007/s10584-005-4704-2.
- Keller, M.,** 2010: *The Science of Grapevines: Anatomy and Physiology* (2nd ed.). Academic Press, San Diego, CA, USA.

- Lobell, D. B., Schlenker, W., Costa-Roberts, J.**, 2011: Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616–620. DOI: 10.1126/science.1204531.
- Lombardini, L., Marvin K. Harris, Glenn, D. M.**, 2005. "Effects of particle film application on leaf gas exchange, water relations, nut yield, and insect populations in mature pecan trees". *HortScience* (40)5 1376-1340.
- Moriondo, M., Bindi, M., Giannakopoulos, C.**, 2015: Climate change impacts on viticulture: A European perspective. *Regional Environmental Change*, 15(8), 1741–1756. DOI: 10.1007/s10113-014-0712-0.
- Ohira, S., Morita, N., Suh, H. J., Jung, J., Yamamoto, Y.**, 2005: Quality control of Photosystem II under light stress: Turnover of aggregates of the D1 protein in vivo. *Photosynthesis Research*, 84, 29–33. DOI: 10.1007/s11120-004-7310-7.
- Pellegrini, N., Re, R., Yang, M., and Rice-Evans, C.**, 1999: Screening of dietary carotenoids and carotenoid-rich fruit extracts for antioxidant activities applying the ABTS+ radical cation decolorization assay. *Methodes in Enzymology*, 299, 589–603. DOI: 10.1016/S0076-6879(99)99037-7.
- Puterka, J. G., Glenn, D. M., Sekutowski, D. G., Unruh, T. R., Jones, S. K.**, 2000: Progress toward liquid formulations of particle films for insect and disease control in pear. *Environmental Entomology*, 29, 329–339. DOI: 10.1603/0046-225X(2000)029[0329:PTLFOP]2.0.CO;2.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., and Rice-Evans, C.**, 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free radical biology and medicine*, 26, 1231– 1237. DOI: 10.1016/S0891-5849(98)00315-3.
- Ribéreau-Gayon, P., Dubourdieu, D., Donèche, B., Lonvaud, A.**, 2005: Trattato di Enologia I – Microbiologia del vino e vinificazioni. Edagricole, Bologna.
- Santos, J. A., Malheiro, A. C., Fraga, H., Moutinho-Pereira, J.**, 2020: Viticulture under climate change: Adaptation strategies. *Agriculture*, 10(6), 221. DOI: 10.3390/agriculture10060221.
- Saour, G., Makee, H.**, 2003: Effects of kaolin particle film on olive fruit yield, oil content and quality. *Advances in Horticultural Science*, 17, 204–206.
- Segura-Monroy, S., Uribe-Vallejo, A., Ramirez-Godoy, A., Restrepo-Diaz, H.**, 2015: Effect of kaolin application on growth, water use efficiency, and leaf epidermis characteristics of *Physalis peruviana* L. seedlings under two irrigation regimes. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17, 1585–1596. <http://hdl.handle.net/123456789/3818>.
- Slinkard, K., and Singleton, V. L.**, 1997: Total phenol analysis: Automation and comparison with manual methods. *American Journal of Enology and Viticulture*, 28, 49–55. DOI:10.5344/ajev.1977.28.1.49.
- Smirnoff, N.**, 1993: The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. *New Phytologist*, 125, 27–58.
- Spiers, J. D., Matta, F. B., Marshall, D. A.**, 2003: Effects of kaolin clay particle film on southern highbush (*Vaccinium corymbosum* L.) blueberry plants. *Small Fruits Review*, 2, 29–36. DOI: 10.1300/J301v02n04_04.
- van Leeuwen, C., Darriet, P.**, 2016: The impact of climate change on viticulture and wine quality. *Journal of Wine Economics*, 11(1), 150–167. DOI: 10.1017/jwe.2015