

Film di particelle minerali come strumenti di adattamento al cambiamento climatico: impatti sulla crescita, resa e mitigazione dello stress nelle viti

AUTORI

Antonio Dattola *, Gabriella Impallomeni, Beatrix Petrovicova, Rocco Zappia e Gregorio Gullo

Dipartimento di AGRARIA, Università del Mediterraneo di Reggio Calabria, 89124 Reggio Calabria, Italia

* Correspondence: antonio.dattola@unirc.it

DOI: <https://doi.org/10.3390/plants15152346>

Sintesi

La viticoltura è sempre più minacciata dagli effetti del cambiamento climatico, in particolare dall'aumento delle temperature e dalla siccità prolungata, che possono influire negativamente sulla gestione dei vigneti, sulla produttività e sulla qualità dell'uva. Per aumentare la resilienza dei vigneti in condizioni mediterranee, questo studio ha valutato l'efficacia dell'uso di due film di particelle minerali - caolino calcinato e Farina di Basalto® - come strumenti di adattamento a breve termine per viti di Nocera (*Vitis vinifera* L.) coltivate nell'area della DOC di Faro (Sicilia). I trattamenti sono stati applicati in fasi fenologiche chiave per valutarne la capacità di mitigare lo stress termico e preservare l'attività fisiologica durante i periodi estivi più caldi. Entrambe le formulazioni hanno migliorato significativamente le componenti della resa rispetto alle viti non trattate, principalmente riducendo la disidratazione degli acini e mantenendo la massa dei grappoli e degli acini. Le viti trattate hanno inoltre mostrato una maggiore efficienza fotosintetica, maggiore conduttanza stomatica e una migliore efficienza nell'uso dell'acqua, indicando una protezione efficace dell'apparato fotosintetico dallo stress indotto dal calore e dalla luce. La composizione del mosto ha beneficiato dei trattamenti, dimostrando un aumento dei solidi solubili totali. Il profilo polifenolico ha rivelato risposte metaboliche specifiche per ciascun trattamento: il caolino ha promosso un accumulo più alto di flavanoli e antiossidanti, mentre la Farina di Basalto® ha favorito gli acidi fenolici e i flavonoli protettivi contro i raggi UV. Nel complesso, i film di particelle minerali si sono rivelati preziosi strumenti per mantenere la produttività e la qualità dell'uva nelle stagioni calde e secche, supportando la resilienza del vigneto senza alterare la maturità tecnologica.

Parole chiave: caolino; vite; cambiamento climatico; Farina di Basalto®

Data di presentazione: 22 giugno 2026

Data di accettazione: 28 luglio 2026

DATA DI PUBBLICAZIONE 30 luglio 2026

1. Introduzione

L'agricoltura è un pilastro fondamentale dell'economia globale, utilizzando circa il 38% della superficie terrestre e quasi il 70% delle risorse globali di acqua dolce per l'irrigazione. Tuttavia, il cambiamento climatico, unito alla crescita prevista della popolazione mondiale a 9,7 miliardi entro il 2050, dovrebbe intensificare la pressione sugli agroecosistemi [1]. Le regioni mediterranee sono particolarmente vulnerabili, poiché l'aumento delle temperature, i modelli di precipitazione alterati e la maggiore frequenza di eventi estremi minacciano la produttività delle colture e la sostenibilità a lungo termine [2]. In viticoltura, questi cambiamenti climatici alterano l'equilibrio tra clima, suolo e topografia che regola la fisiologia della vite, la composizione dell'uva e la qualità del vino. Di conseguenza, i viticoltori stanno adottando sempre più strategie che migliorano la resilienza dei vigneti mantenendo al contempo la qualità della produzione [3]. Queste misure di adattamento includono sia interventi strutturali a lungo termine, come combinazioni di portainnesto-innesto, densità di impianto e sistemi di allevamento, sia pratiche agronomiche a breve termine volte a ridurre la temperatura e la traspirazione fogliare [4-6]. Tra queste ultime, i film di particelle minerali riflettenti hanno attirato l'attenzione come strumenti sostenibili per mitigare lo stress termico e radiativo. Diversi studi hanno dimostrato che le applicazioni di film di particelle possono ridurre la temperatura della chioma, migliorare la distribuzione della luce e aumentare l'efficienza fotosintetica su più colture [7-10].

In viticoltura, il film di particelle di caolino (KPF) aumenta la riflettanza delle foglie e degli acini, abbassando così la temperatura superficiale e migliorando il bilancio energetico della pianta in condizioni di alta radiazione. Questo effetto di raffreddamento è stato associato a una migliore efficienza del fotosistema II, a una maggiore capacità fotosintetica e a un aumento dell'efficienza nell'uso dell'acqua, oltre a ridurre la fotoinibizione e lo stress ossidativo. Le applicazioni del caolino sono state anche collegate a un miglioramento della qualità dell'uva, tra cui maggiore acidità, pH più basso e un aumento del contenuto fenolico (in particolare per le antocianine) in condizioni calde e secche [11]. Oltre ai suoi effetti fisici, il caolino influenza la regolazione ormonale, in particolare le dinamiche di ABA e IAA, e migliora il metabolismo antiossidante durante lo stress estivo, contribuendo a migliorare le relazioni idriche, la fotosintesi e a ridurre i danni ossidativi [12-14]. Stimola inoltre le vie di fenilpropanoidi e flavonoidi, aumentando l'accumulo di fenoli e antocianine negli acini [15]. Nei climi caldi e aridi, è stato dimostrato che i film riflettenti migliorano la colorazione delle bacche e aumentano il rapporto antocianine-solidi solubili durante la maturazione [16,17]. Effetti simili sono stati riportati per i prodotti fogliari a base di silicio, che possono migliorare la tolleranza allo stress e modulare il metabolismo secondario [18]. Altri

minerali riflettenti, come la Farina di Basalto®, sono stati recentemente studiati come alternative o complementari al caolino. Petracca *et al.* hanno dimostrato che la deposizione di basalto sulle superfici delle foglie non interferisce con le misurazioni dello scambio gassoso o la fotofisiologia PSII, confermandone l'idoneità per studi ecofisiologici [19] e supportando il suo uso pratico nei vigneti per alleviare lo stress termico e idrico in condizioni mediterranee [20–22]. Anche materiali a base di silice, incluso il silicato di potassio, sono stati valutati per i loro potenziali effetti sulla composizione dell'uva. In uno studio comparativo su uve Touriga Nacional e Touriga Franca (*Vitis vinifera* L.), il caolino tendeva ad aumentare il contenuto fenolico, antociani, tannini e fenoli totali, evidenziando il suo potenziale nel preservare la qualità dell'uva sotto stress climatico [23].

All'interno di questo contesto, il presente studio si propone di valutare l'efficacia di due prodotti minerali riflettenti – il caolino calcinato, i cui effetti mitiganti a breve termine contro lo stress legato al clima sono ben documentati, e la Farina di Basalto® di nuova formulazione – sulla crescita vegetativa e sulla resa produttiva di viti di Nocera coltivate nell'area della DOC Faro in Sicilia. Applicando questi trattamenti alla zona medio-superiore della chioma durante le fasi fenologiche chiave, lo studio mira a determinare se il prodotto a base di basalto possa rappresentare un'alternativa praticabile o complementare al caolino in condizioni climatiche mediterranee, in particolare in relazione alla riduzione dello stress termico e al miglioramento delle prestazioni della vite.

2. Risultati

2.1. Effetti dei trattamenti sulle componenti di resa

La performance produttive delle viti di Nocera sono state notevolmente influenzate dai trattamenti con film di particelle minerali durante entrambe le stagioni di crescita, come confermato dai dati biennali presentati nella Tabella 1. In condizioni di siccità e alte temperature, gli effetti positivi del caolino (KT) e della Farina di Basalto® (BPT) sono stati principalmente associati a miglioramenti nello sviluppo degli acini e dei grappoli piuttosto che a modifiche nell'attività riproduttiva. Questa interpretazione è supportata dall'assenza di differenze significative nel numero di grappoli per pianta (BP) in entrambi gli anni (Tabella 1), indicando che i miglioramenti della resa sono stati determinati dall'aumento della massa degli acini e dei grappoli piuttosto che dal numero di grappoli o dalla fertilità dei germogli.

Tabella 1. Componenti di produzione delle viti Nocera cv. sottoposte trattamenti diversi (BPT = Farina di Basalto®; KT = caolino; UT = non trattato). YP = resa per pianta (kg pianta⁻¹); ARW = peso medio del rachide (g); ABW = peso medio del grappolo (g); ABeW = peso medio dell'acino (g); BP = numero di grappoli per pianta. I

Film di particelle minerali come strumenti di adattamento al cambiamento climatico: impatti sulla crescita, resa e mitigazione dello stress nelle vitiPubblicato su Plants 2026, 15, 2346

valori sono espressi come media $\pm$ deviazione standard e si riferiscono ai dati raccolti in due stagioni di crescita.

Year (Y)	Treatment (T)	YP kg Plant ⁻¹	ARW g	ABW g	ABeW g	BP n.
2024	BPT	1.83 $\pm$ 0.06 a	5.58 $\pm$ 0.04 b	262.1 $\pm$ 5.5 b	2.75 $\pm$ 0.02 a	7.10 $\pm$ 0.60 ns
	KT	1.66 $\pm$ 0.05 a	7.27 $\pm$ 0.05 a	260.0 $\pm$ 6.0 a	2.63 $\pm$ 0.03 a	5.90 $\pm$ 0.55 ns
	UT	1.52 $\pm$ 0.04 b	4.15 $\pm$ 0.10 c	219.0 $\pm$ 5.0 c	2.29 $\pm$ 0.03 b	5.15 $\pm$ 0.50 ns
2025	BPT	1.87 $\pm$ 0.07 a	5.66 $\pm$ 0.05 b	266.4 $\pm$ 6.2 b	2.79 $\pm$ 0.03 a	7.00 $\pm$ 0.70 ns
	KT	1.68 $\pm$ 0.04 a	7.35 $\pm$ 0.06 a	264.6 $\pm$ 5.8 a	2.67 $\pm$ 0.04 a	5.78 $\pm$ 0.60 ns
	UT	1.54 $\pm$ 0.05 b	4.29 $\pm$ 0.12 c	223.2 $\pm$ 5.3 c	2.33 $\pm$ 0.04 b	5.10 $\pm$ 0.55 ns
T		*	*	*	*	ns
Y		ns	ns	ns	ns	ns
T $\times$ Y		ns	ns	ns	ns	ns

All'interno di ogni anno, lettere diverse indicano differenze significative tra i trattamenti secondo il test di Tukey ($p < 0,05$). Le righe T, Y e T $\times$ Y si riferiscono agli effetti complessivi dell'anno, del trattamento e della loro interazione basati su ANOVA bidirezionale. * indica un effetto statisticamente significativo ($p < 0,05$), mentre "ns" indica un effetto non significativo.

La resa per pianta (YP) delle viti trattate è risultata significativamente più elevata sia nel 2024 che nel 2025 (Tabella 1). Il trattamento BPT ha costantemente prodotto la risposta maggiore, raggiungendo rispettivamente 1,83 e 1,87 kg pianta⁻¹ nel 2024 e nel 2025, corrispondenti a aumenti di circa il 20-21% rispetto alle viti non trattate (UT). Anche il trattamento KT ha migliorato la resa per pianta (YP), anche se in misura minore (+8-9% nelle due stagioni). Questi risultati sono in linea con la maggiore produttività su scala ettaro precedentemente riportata e confermano che entrambi i trattamenti hanno migliorato l'accumulo di biomassa frutticola in condizioni di stress estivo.

Sono state inoltre rilevate differenze significative nel peso medio del rachide (ARW), con un andamento costante nel corso negli anni (Tabella 1). KT ha mostrato i valori ARW più elevati (7,27 g nel 2024 e 7,35 g nel 2025), rappresentando aumenti di circa il 70-75% rispetto all'UT. Anche la BPT ha indotto miglioramenti significativi, anche se meno pronunciati. Ciò suggerisce una maggiore efficacia del caolino nel sostenere lo sviluppo del rachide e la funzionalità strutturale durante la crescita e la maturazione delle bacche. Allo stesso modo, entrambi i trattamenti hanno aumentato significativamente il peso medio del grappolo (ABW) in ogni stagione (Tabella 1). KT e BPT hanno prodotto grappoli più pesanti, con aumenti di circa il 19-20% rispetto all'UT, confermando il ruolo benefico dei film di particelle riflettenti nel supportare lo sviluppo del grappolo e nel mantenere il turgore degli acini durante la maturazione tardiva. Il peso medio della bacca (ABeW) ha seguito la stessa tendenza: la BPT ha prodotto i valori più alti in entrambi gli anni (2,75-2,79 g), corrispondenti a aumenti di circa il 20% rispetto all'UT, mentre la KT ha aumentato il peso degli acini di circa il 14-15% (Tabella 1). Questi risultati supportano l'ipotesi che

entrambi i trattamenti abbiano attenuato la disidratazione e preservato lo stato idrico degli acini in condizioni di elevato stress termico. Nel complesso, il nostro dataset biennale dimostra chiaramente che sia il caolino che la Farina di Basalto® hanno migliorato le prestazioni produttive delle viti in condizioni di stress abiotico estivo (Tabella 1).

La BPT è risultata generalmente più efficace nell'aumentare l'accumulo di resa, mentre la KT ha esercitato un'influenza maggiore sullo sviluppo del rachide e sulla conservazione dei tessuti, evidenziando risposte fisiologiche specifiche per ciascun trattamento.

2.2. Effetti dei trattamenti sulla composizione dell'uva

Le caratteristiche compositive dell'uva Nocera alla raccolta sono state solo parzialmente influenzate dai trattamenti con film di particelle minerali, come mostrato dal dataset biennale presentato nella Tabella 2. Tra i parametri misurati, i solidi solubili totali (TSS) sono stati l'unica variabile costantemente e significativamente influenzata in entrambe le stagioni. In ogni anno, sia il caolino (KT) che la Farina di Basalto® (BPT) hanno prodotto valori di TSS significativamente più elevati rispetto alle viti non trattate (UT), confermando un incremento dell'accumulo di zuccheri correlato al trattamento. Le uve BPT hanno mostrato il TSS più elevato sia nel 2024 (23,70 °Brix) che nel 2025 (23,66 °Brix), corrispondente a un aumento medio di circa il 15% rispetto all'UT (20,60-20,68 °Brix). Anche il KT ha aumentato il TSS, raggiungendo 22,80-22,96 °Brix, equivalente a un miglioramento di circa il 10% rispetto all'UT (Tabella 2). Non sono state rilevate differenze significative per il pH in nessuna delle due stagioni (Tabella 2).

Tabella 2. Caratteristiche compositive delle uve Nocera cv. alla vendemmia a seguito di diversi trattamenti (BPT = Farina di Basalto®; KT = caolino; UT = non trattato). pH = livello di acidità del mosto; TSS = solidi solubili totali (°Brix); TA = acidità titolabile (% acido tartarico); TSS/TA = rapporto zuccheri/acidi, contenuto di zucchero = solidi solubili per bacca (mg acino⁻¹). I valori sono espressi come media ± deviazione standard e si riferiscono ai dati raccolti in due stagioni di crescita.

Year (Y)	Treatment (T)	pH	TSS °Brix	TA %	TSS/TA	Sugar Content mg Berry ⁻¹
2024	BPT	3.18 ± 0.06 ns	23.70 ± 0.06 a	0.95 ± 0.05 ns	25.40 ± 2.20 ns	651.80 ± 19.42a
	KT	3.25 ± 0.14 ns	22.80 ± 0.38 a	1.07 ± 0.13 ns	21.80 ± 2.10 ns	599.60 ± 18.24 b
	UT	3.58 ± 0.20 ns	20.60 ± 0.40 b	0.90 ± 0.05 ns	23.00 ± 1.30 ns	471.70 ± 19.42 c
2025	BPT	3.22 ± 0.08 ns	23.66 ± 0.05 a	0.93 ± 0.05 ns	25.74 ± 2.35 ns	659.10 ± 20.15 a
	KT	3.33 ± 0.16 ns	22.96 ± 0.42 a	1.11 ± 0.15 ns	22.14 ± 2.34 ns	612.60 ± 19.10 b
	UT	3.66 ± 0.22 ns	20.68 ± 0.42 b	0.92 ± 0.05 ns	23.18 ± 1.35 ns	481.80 ± 16.02 c
T		ns	*	ns	ns	*
Y		ns	ns	ns	ns	ns
T × Y		ns	ns	ns	ns	ns

All'interno di ogni anno, lettere diverse indicano differenze significative tra i trattamenti secondo il test di Tukey (p < 0,05). Le righe T, Y e Y × T si riferiscono agli effetti complessivi dell'anno, del trattamento e della loro interazione basati sull'ANOVA a

due vie. * indica un effetto statisticamente significativo ($p < 0,05$), mentre "ns" indica un effetto non significativo.

L'acidità titolabile (TA) non ha mostrato differenze significative tra i trattamenti in entrambi gli anni. Sebbene le uve KT abbiano presentato valori numericamente più alti di TA (1,07-1,11%), queste differenze non erano statisticamente significative e quindi rappresentano tendenze piuttosto che effetti guidati dal trattamento. I valori di TA sono rimasti simili nelle uve BPT e UT in entrambe le stagioni, suggerendo che i trattamenti non hanno modificato sostanzialmente la ritenzione acida alla vendemmia (Tabella 2).

Il rapporto TSS/TA non ha mostrato differenze significative tra i trattamenti in nessuno dei due anni, e i valori leggermente più alti osservati nelle uve BPT dovrebbero anch'essi essere considerati tendenze non significative. Il rapporto più basso osservato nelle uve KT era principalmente attribuibile alla loro acidità leggermente superiore (Tabella 2). Oltre alla TSS, i trattamenti hanno influenzato anche il contenuto di zuccheri nelle bacche, calcolato come la quantità di solidi solubili per bacca. In entrambe le stagioni, il BPT ha costantemente prodotto il più alto contenuto di zuccheri (651,80-659,10 mg di bacca⁻¹), seguito da KT (599,60-612,60 mg di bacca⁻¹), mentre le uve UT hanno mostrato valori nettamente inferiori (471,70-481,80 mg di bacca⁻¹). Queste differenze riflettono l'effetto combinato di un maggiore TSS e una maggiore massa di bacche nelle viti trattate. Il miglioramento osservato nelle bacche BPT corrisponde a un incremento di circa il 35-40% rispetto alle bacche UT, mentre le bacche KT hanno mostrato un miglioramento di circa il 25-30%. Nel complesso, il nostro dataset biennale indica che le applicazioni di film di particelle minerali hanno principalmente migliorato la maturità tecnologica dell'uva grazie all'aumento dell'accumulo di zucchero, esercitando al contempo un'influenza limitata e statisticamente non significativa sui parametri relativi all'acidità. Qualsiasi differenza numerica di pH, TA o TSS/TA dovrebbe quindi essere interpretata come una tendenza non significativa piuttosto che come un effetto confermato del trattamento.

2.3. Effetti dei trattamenti con film di particelle sulla funzione PSII

Le prestazioni fotosintetiche delle viti Nocera sono state fortemente influenzate da entrambi i trattamenti con film di particelle minerali, come dimostrato dai dati biennali presentati nella Tabella 3. Sono state osservate differenze significative per tutti i parametri fotochimici tranne nel NPQ, e l'assenza di interazioni trattamento × anno indica che queste risposte sono state coerenti in entrambe le stagioni.

Tabella 3. Parametri di prestazione fotosintetici (F_v'/F_m' , $\Phi PSII$, qP , NPQ e velocità di trasporto degli elettroni, ETR) misurati nelle viti Nocera sotto diversi trattamenti (Farina di Basalto® (BPT), caolino (KT))

e non trattato (UT)). F_v'/F_m' rappresenta l'efficienza massima del fotosistema II (PSII) in foglie adattate alla luce; Φ PSII (resa quantica effettiva di PSII); qP (quenching fotochimico); NPQ (quenching non fotochimico); ETR (velocità di trasporto degli elettroni). I valori sono espressi come media $\pm$ deviazione standard e si riferiscono ai dati raccolti in due stagioni di crescita.

Year (Y)	Treatment (T)	F_v'/F_m'	Φ PSII	qP	NPQ	ETR $\mu\text{mol e}^- \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$
2024	BPT	0.58 ± 0.02 a	0.12 ± 0.02 a	0.22 ± 0.02 a	2.28 ± 0.12 ns	97.5 ± 2.0 b
	KT	0.61 ± 0.01 a	0.14 ± 0.03 a	0.24 ± 0.01 a	2.28 ± 0.08 ns	111.0 ± 3.5 a
	UT	0.44 ± 0.10 b	0.03 ± 0.04 b	0.12 ± 0.02 b	1.93 ± 0.03 ns	66.0 ± 3.7 c
2025	BPT	0.60 ± 0.02 a	0.14 ± 0.02 a	0.24 ± 0.02 a	2.32 ± 0.14 ns	99.8 ± 2.3 b
	KT	0.63 ± 0.01 a	0.16 ± 0.03 a	0.26 ± 0.01 a	2.32 ± 0.10 ns	113.7 ± 3.9 a
	UT	0.46 ± 0.12 b	0.05 ± 0.04 b	0.14 ± 0.02 b	1.95 ± 0.03 ns	68.6 ± 3.9 c
T		*	*	*	ns	*
Y		ns	ns	ns	ns	ns
T $\times$ Y		ns	ns	ns	ns	ns

All'interno di ciascun anno, lettere diverse indicano differenze significative tra i trattamenti secondo il test di Tukey ($p < 0,05$). Le righe T, Y e Y $\times$ T si riferiscono agli effetti complessivi dell'anno, del trattamento e della loro interazione basati su ANOVA a due vie. * indica un effetto statisticamente significativo ($p < 0,05$), mentre "ns" indica un effetto non significativo.

L'efficienza massima del fotosistema II nelle foglie adattate alla luce (F_v'/F_m') è risultata significativamente inferiore nelle viti non trattate (UT), raggiungendo valori compresi tra 0,44 e 0,46, rispetto sia alla Farina di Basalto® (BPT) che al caolino (KT). Nel corso del biennio, le foglie BPT hanno mantenuto valori compresi tra 0,58 e 0,60, mentre le foglie di KT hanno raggiunto valori compresi tra 0,61 e 0,63 (Tabella 3), corrispondenti a incrementi rispettivi di circa il 30% e il 38% rispetto alle foglie UT. Sebbene questi valori siano rimasti al di sotto di quelli tipicamente riportati per condizioni non stressanti, indicano chiaramente un miglioramento della funzionalità PSII nelle viti trattate in condizioni di siccità e alte temperature. Un andamento simile è stato osservato per la resa quantica effettiva del PSII (Φ PSII). Le viti UT hanno costantemente mostrato i valori più bassi (0,03–0,05), mentre le piante BPT e KT hanno raggiunto rispettivamente 0,12–0,14 e 0,14–0,16 (Tabella 3). Nonostante gli ampi aumenti percentuali, il risultato chiave è che entrambi i trattamenti hanno significativamente aumentato Φ PSII rispetto a UT in entrambi gli anni, confermando un miglioramento dell'efficienza fotochimica in condizioni di stress. L'estinzione fotochimica (qP) ha seguito la stessa tendenza; le viti UT hanno mostrato i valori più bassi (0,12–0,14), mentre le vite BPT e KT hanno raggiunto rispettivamente 0,22–0,24 e 0,24–0,26 (Tabella 3). Questi aumenti corrispondono a miglioramenti di circa il 77% per la BPT e del 92% per la KT rispetto a UT, indicando una maggiore proporzione di centri di reazione PSII aperti nelle viti trattate. Al contrario, l'estinzione non fotochimica (NPQ) non ha mostrato differenze significative tra i trattamenti in entrambi gli anni, con valori compresi tra 1,93 a 2,32 (Tabella 3).

Questa mancanza di variazione suggerisce che i trattamenti non hanno modificato sostanzialmente i meccanismi di dissipazione del calore. Il tasso di trasporto degli elettroni (ETR) ha mostrato l'effetto del trattamento più chiaro e costante. UT ha prodotto i valori più bassi, mentre BPT e KT hanno aumentato significativamente l'ETR a 97,5–99,8 e 111,0–113,7 $\mu\text{mol e}^{-} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, rispettivamente (Tabella 3). Questi valori corrispondono a aumenti di circa il 47% per il BPT e del 67% per il KT rispetto a UT, con il KT che supera il BPT di circa il 14% in entrambe le stagioni. Nel complesso, il nostro dataset biennale dimostra che le applicazioni di film di particelle minerali hanno migliorato sostanzialmente le prestazioni fotochimiche del PSII in condizioni stress abiotico estivo. Sebbene entrambi i trattamenti abbiano migliorato l'efficienza fotosintetica, il trattamento KT ha prodotto costantemente la risposta più forte attraverso i parametri, indicando una maggiore capacità di sostenere il trasporto elettronico e mantenere la funzionalità PSII ad alte temperature e condizioni di siccità.

2.4. Efficienza fotosintetica e microclima fogliare con trattamento fogliare

I dati presentati nella Tabella 4 dimostrano chiaramente che sia i trattamenti fogliari, Farina di Basalto® (BPT) che il caolino (KT), hanno migliorato sostanzialmente le prestazioni fisiologiche delle foglie rispetto al controllo non trattato (UT). Il miglioramento più marcato è stato osservato nella fotosintesi netta (A_n), dove le viti trattate hanno costantemente mostrato tassi di assimilazione più elevati in entrambe le stagioni. Nel 2024, A_n è aumentata da 5,58 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nelle viti UT a 7,82 e 8,14 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ nelle viti trattate con BPT e KT, rispettivamente, corrispondenti a miglioramenti di circa il 39–45%. Queste tendenze sono state confermate nel 2025, indicando un effetto del trattamento stabile e riproducibile nel corso degli anni. Questo miglioramento costante nell'assimilazione del carbonio suggerisce che entrambi i trattamenti hanno efficacemente mitigato lo stress a livello fogliare e migliorato l'attività fotosintetica, probabilmente grazie a un miglioramento del microclima fogliare o un potenziamento dei meccanismi di fotoprotezione, come spesso riportato per film di caolino e trattamenti fogliari a base minerale.

La conduttanza stomatica (g_s) ha seguito un andamento simile, con le viti trattate che hanno mostrato un aumento di oltre il doppio rispetto al controllo UT. Sebbene l'aumento percentuale abbia superato il 100%, in questo manoscritto sono riportate solo differenze qualitative; tuttavia, l'entità di questa risposta sottolinea sostanziale un miglioramento nella regolazione stomatica in entrambi i trattamenti. L'aumento simultaneo di A_n e g_s suggerisce che le foglie trattate mantengono condizioni di scambio gassoso più favorevoli, supportando un maggiore assorbimento di CO_2 senza causare un'eccessiva perdita d'acqua.

Nonostante questi cambiamenti, il tasso di traspirazione (Tr) non ha mostrato differenze significative tra i trattamenti in nessuno dei due anni, come indicato dalla notazione "ns" nella Tabella 4. Questa stabilità in Tr , unita ai marcati aumenti di An , ha portato a un miglioramento significativo dell'efficienza nell'uso dell'acqua (WUE) nelle viti trattate. Il trattamento KT, in particolare, ha mostrato i valori più alti di WUE ($3,74$ – $3,78 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$), rappresentando un miglioramento di circa il 35% rispetto al controllo UT. Ciò suggerisce che il KT ha migliorato la capacità della pianta di assimilare il carbonio per unità d'acqua traspirata, un vantaggio chiave in condizioni di elevata domanda evaporativa. Le implicazioni fisiologiche di questo modello sono in linea con i benefici noti dei film di particelle riflettenti nella riduzione del carico termico fogliare e nel miglioramento del comportamento stomatico. Il rapporto An/Ci , indicatore dell'efficienza della carbossilazione, è aumentato significativamente con entrambi i trattamenti. Le viti BPT e KT hanno mostrato valori di $0,032$ – $0,035$ rispetto a $0,024$ – $0,026$ in UT, corrispondenti a aumenti del 32–36%.

Tabella 4. Effetti di tre trattamenti fogliari: UT (non trattato), KT (trattamento con caolino) e BPT (trattamento con Farina di Basalto®), sui parametri di scambio gassoso fogliare e sul microclima fogliare. An = tasso di fotosintesi netta; gs = conduttanza stomatica; Tr = tasso di traspirazione; WUE = efficienza istantanea nell'uso dell'acqua (An/Tr); An/Ci = efficienza di carbossilazione; SPAD = indice di contenuto di clorofilla; temperatura fogliare = stato termico della chioma; VPD = deficit di pressione di vapore. I valori sono espressi come media $\pm$ deviazione standard e si riferiscono ai dati raccolti in due stagioni di crescita.

Year (Y)	Treatment (T)	An ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	gs ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Tr ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$)	WUE ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	An/Ci ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	SPAD	Leaf Temperature (°C)	VPD (kPa)
2024	BPT	7.82 ± 0.03 a	0.20 ± 0.05 a	2.30 ± 0.11 ns	3.38 ± 0.12 a	0.032 ± 0.03 a	28.50 ± 0.50 a	32.1 ± 0.6 b	2.48 ± 0.08 b
	KT	8.14 ± 0.09 a	0.19 ± 0.03 a	2.16 ± 0.10 ns	3.74 ± 0.17 a	0.033 ± 0.02 a	29.30 ± 0.70 a	31.2 ± 0.5 a	2.30 ± 0.07 a
	UT	5.58 ± 0.30 b	0.08 ± 0.04 b	2.00 ± 0.17 ns	2.78 ± 0.03 b	0.024 ± 0.01 b	24.70 ± 0.66 b	33.4 ± 0.7 c	2.70 ± 0.10 c
2025	BPT	7.84 ± 0.03 a	0.22 ± 0.05 a	2.32 ± 0.12 ns	3.40 ± 0.12 a	0.034 ± 0.03 a	28.76 ± 0.52 a	32.4 ± 0.7 b	2.52 ± 0.09 b
	KT	8.18 ± 0.09 a	0.21 ± 0.03 a	2.18 ± 0.10 ns	3.78 ± 0.17 a	0.035 ± 0.02 a	29.56 ± 0.74 a	31.5 ± 0.6 a	2.34 ± 0.08 a
	UT	5.66 ± 0.32 b	0.10 ± 0.04 b	2.02 ± 0.17 ns	2.80 ± 0.03 b	0.026 ± 0.01 b	24.92 ± 0.68 b	33.7 ± 0.8 c	2.74 ± 0.11 c
T		*	*	ns	*	*	*	*	*
Y		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
T $\times$ Y		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

All'interno di ciascun anno, lettere diverse indicano differenze significative tra i trattamenti secondo il test di Tukey ($p < 0,05$). Le righe T, Y e Y $\times$ T si riferiscono agli effetti complessivi dell'anno, del trattamento e della loro interazione basati su ANOVA a due vie. * indica un effetto statisticamente significativo ($p < 0,05$), mentre "ns" indica un effetto non significativo.

Analogamente, i valori SPAD, che riflettono il contenuto di clorofilla, sono risultati costantemente più elevati nelle viti trattate. Le viti KT hanno mostrato i valori più alti ($29,30$ – $29,56$), seguiti da BPT ($28,50$ –

28,76), mentre le viti UT hanno mostrato il contenuto di clorofilla più basso (24,70-24,92). Questi incrementi del 15-19% rispetto al gruppo UT indicano che i trattamenti fogliari potrebbero aver contribuito a una maggiore stabilità del pigmento o a una ridurre lo stress foto-ossidativo, coerente con i loro noti ruoli protettivi.

I parametri del microclima fogliare supportano ulteriormente queste tendenze fisiologiche. Le viti trattate hanno mostrato temperature fogliari inferiori e un deficit di pressione di vapore (VPD) ridotto rispetto al controllo UT, con il trattamento KT che ha mostrato le condizioni microclimatiche più favorevoli. Ad esempio, nel 2024, la temperatura fogliare è scesa da 33,4 °C nelle viti UT a 31,2 °C in quelle trattate con KT, mentre la VPD è diminuita da 2,70 a 2,30 kPa. Queste modifiche probabilmente hanno contribuito al miglioramento delle prestazioni di scambio gassoso, riducendo lo stress termico ed evaporativo sulla superficie fogliare. Come mostrato nella Figura 1, le curve di irradianza spettrale dei tre trattamenti (UT, BPT e KT) hanno mostrato un andamento generale simile nell'intervallo 300-1100 nm, con un picco pronunciato nella regione visibile. Tuttavia, il trattamento KT ha mostrato valori di irradianza costantemente più bassi nella regione del vicino infrarosso (NIR) rispetto ai gruppi UT e BPT. I profili spettrali di UT e BPT si sovrappongono in gran parte, mentre le viti di KT mostrarono una chiara riduzione dell'intensità NIR, indicando una risposta ottica distinta associata al trattamento con caolino.

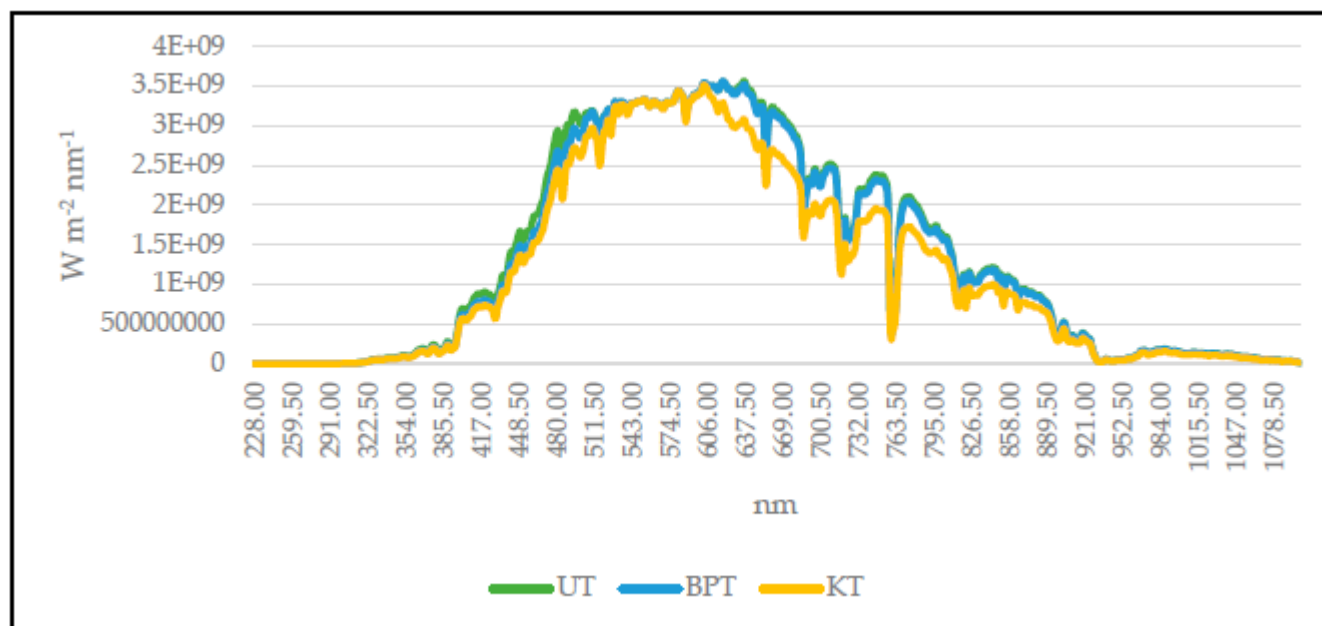


Figura 1. Profili spettrali registrati nell'intervallo di lunghezze d'onda da 300 a 1100 nm. Le curve rappresentano l'irradianza spettrale espressa come $W m^{-2} nm^{-1}$

2.5. Stabilità e variazione selettiva dei composti fenolici a seguito di diversi trattamenti fogliari

Durante le due stagioni di crescita, il profilo fenolico delle bacche di Nocera (Tabelle 5 e 6) ha mostrato che la maggior parte dei composti è rimasta statisticamente invariata tra i trattamenti, con solo un sottoinsieme limitato che ha mostrato differenze costanti. Tra gli acidi idrossibenzoici, l'acido gallico è stato l'unica molecola a rispondere alle applicazioni fogliari, mostrando concentrazioni più elevate sia nelle piante trattate con KT che con BPT rispetto a UT nel 2024 (Tabella 5) e nel 2025 (Tabella 6). Tutti gli altri acidi idrossibenzoici, inclusi protocatecuico, sirigico, vanillico e 2,5- diidrossibenzoico, sono rimasti statisticamente inalterati in entrambi gli anni (Tabelle 5 e 6). Tra gli acidi idrossicinnamici, l'acido p-cumarico ha costantemente mostrato i livelli più alti nelle piante di UT, mentre KT e BPT hanno ridotto notevolmente la sua concentrazione sia nel 2024 (Tabella 5) che nel 2025 (Tabella 6). L'acido o-cumarico differiva significativamente tra i trattamenti, raggiungendo i valori più alti con il trattamento KT in entrambe le stagioni (Tabelle 5 e 6), mentre le viti UT e BPT hanno mostrato rispettivamente livelli intermedi e inferiore. Al contrario, l'acido m-cumarico, l'acido trans-4-idrossicinnamico, l'acido sinapico, l'acido 3-idrossicinnamico, l'acido caffeico e l'acido ferulico non hanno mostrato variazioni significative in nessuno dei due anni (Tabelle 5 e 6). I Flavan-3-oli hanno mostrato le differenze più evidenti legate al trattamento. La catechina e l'epicatechina erano costantemente più alti negli impianti KT sia nel 2024 (Tabella 5) che nel 2025 (Tabella 6), mentre gli impianti UT ed BPT hanno mostrato concentrazioni sostanzialmente più basse. Tuttavia, altri composti della stessa classe, come la procianidina B2 e la procianidina 1, non differivano significativamente in nessuna delle due stagioni (Tabelle 5 e 6), indicando che la risposta era limitata a molecole specifiche piuttosto che rappresentativa dell'intero gruppo flavan-3-oli. Le antocianide, inclusi pelargonidina e delphinidina, non hanno mostrato variazioni significative tra i trattamenti né nel 2024 (Tabella 5) né nel 2025 (Tabella 6). Analogamente, la maggior parte dei flavonoidi, come quercetina, kaempferolo, miricetina, rutina e quercetina-3-β-D-glucoside, sono rimasti stabili durante i trattamenti in entrambi gli anni (Tabelle 5 e 6). Anche i fenoli minori, tra cui acido clorogenico, vicenina-2, eriocitrina, tocoferolo, acido ellagico, naringina e apigenina, non hanno mostrato differenze significative in nessuna delle due stagioni (Tabelle 5 e 6). Nel complesso, il nostro dataset biennale (Tabelle 5 e 6) indica che solo un piccolo numero di composti fenolici, nello specifico acido gallico, acido p-cumarico, acido o-cumarico, catechina ed epicatechina, hanno mostrato variazioni costanti legate al trattamento tra stagioni, mentre la maggior parte del profilo fenolico è rimasto stabile. Questi risultati suggeriscono che le applicazioni fogliari di KT e BPT abbiano influenzato un sottoinsieme ristretto di metaboliti fenolici piuttosto che indurre cambiamenti ampi o coordinati nel metabolismo secondario.

Tabella 5. Composizione fenolica degli acini di uva varietà Nocera sottoposti a tre trattamenti foliari: KT (trattamento con caolino), UT (non trattato) e BPT (trattamento con Farina di Basalto®). Le concentrazioni di singoli composti fenolici, inclusi acidi idrossibenzoici (ad esempio, acido gallico, acido protocatecuico, acido vanillico), acidi idrossicinnamici (ad esempio, p-cumarico, m-cumarico, o-cumarico, caffeico, ferulico e sinapico), flavan-3-oli (catechina, epicatechina, procianidine), antocianidine (pelargonidina, delphinidina), flavonoli (quercetina, kaempferolo, miricetina, rutina, quercetina-3-β-D-glucoside) e altri fenoli minori (acido clorogenico, vicenina-2, eriocitrina, tocoferolo, apigenina), sono presentati di seguito. I valori sono espressi come media ± deviazione standard per la stagione di crescita 2024.

Phenolic Compound	KT	UT	BPT
Gallic acid	0.88 ± 0.09 a	0.66 ± 0.07 b	0.91 ± 0.10 a
Protocatechuic acid	0.43 ± 0.05 ns	0.42 ± 0.05	0.44 ± 0.05
Procyanidin B2	0.21 ± 0.03 ns	0.20 ± 0.03	0.21 ± 0.03
Syringic acid	0.42 ± 0.05 ns	0.43 ± 0.05	0.44 ± 0.05
p-Coumaric acid	0.01 ± 0.003 b	0.46 ± 0.06 a	0.04 ± 0.01 b
Pelargonidin	0.38 ± 0.04 ns	0.37 ± 0.04	0.39 ± 0.04
m-Coumaric acid	0.01 ± 0.003 ns	0.32 ± 0.05	0.17 ± 0.03
o-Coumaric acid	0.64 ± 0.08 a	0.26 ± 0.05 b	0.10 ± 0.03 c
Catechin	0.36 ± 0.05 a	0.07 ± 0.02 b	0.01 ± 0.003 b
Vanillic acid	0.04 ± 0.01 ns	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01
Epicatechin	0.63 ± 0.09 a	0.01 ± 0.003 b	0.06 ± 0.02 b
Delphinidin	0.01 ± 0.003 ns	0.04 ± 0.01	0.02 ± 0.01
Trans-4-hydroxycinnamic acid	2.25 ± 0.20 ns	2.10 ± 0.18	2.20 ± 0.19
Sinapic acid	0.08 ± 0.01 ns	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01
3-hydroxycinnamic acid	0.02 ± 0.004 ns	0.01 ± 0.003	0.02 ± 0.004
Myricetin	0.03 ± 0.01 ns	0.02 ± 0.01	0.05 ± 0.01
Luteolin	0.04 ± 0.01 ns	0.04 ± 0.01	0.05 ± 0.01
2,5-dihydroxybenzoic acid	0.03 ± 0.01 ns	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01
Caffeic acid	0.02 ± 0.004 ns	0.01 ± 0.003	0.01 ± 0.003
Ellagic acid	0.07 ± 0.01 ns	0.06 ± 0.01	0.08 ± 0.01
Naringin	0.03 ± 0.01 ns	0.01 ± 0.003	0.01 ± 0.003
Quercetin	0.04 ± 0.01 ns	0.06 ± 0.01	0.07 ± 0.01
Kaempferol	0.03 ± 0.01 ns	0.02 ± 0.01	0.04 ± 0.01
Tocopherol	0.13 ± 0.02 ns	0.09 ± 0.02	0.05 ± 0.01
Procyanidin 1	0.04 ± 0.01 ns	0.05 ± 0.01	0.03 ± 0.01
Chlorogenic acid	0.03 ± 0.01 ns	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01
Vicenin 2	0.06 ± 0.01 ns	0.11 ± 0.02	0.11 ± 0.02
Eriocitrin	0.13 ± 0.02 ns	0.14 ± 0.02	0.14 ± 0.02
Rutin	0.07 ± 0.01 ns	0.07 ± 0.01	0.07 ± 0.01
Quercetin-3-β-D-glucoside	0.02 ± 0.01 ns	0.01 ± 0.004	0.02 ± 0.01
Ferulic acid	0.02 ± 0.004 ns	0.02 ± 0.004	0.02 ± 0.004
Apigenin	0.85 ± 0.10 ns	0.74 ± 0.09	0.64 ± 0.08

Lettere diverse all'interno della stessa colonna indicano differenze statisticamente significative tra i trattamenti secondo il test di Tukey (p < 0,05), "ns" indica che non ci sono differenze significative.

Tabella 6. Composizione fenolica degli acini di uva varietà Nocera sottoposti a tre trattamenti fogliari: KT (trattamento con caolino), UT (non trattato) e BPT (trattamento con Farina di Basalto®). Le concentrazioni dei singoli composti fenolici, inclusi gli acidi idrossibenzoici (ad es. acido gallico, acido protocatecuico, acido vanillico), gli acidi idrossicinnamici (ad es. acido p -cumarico, m - cumarico, o - cumarico, caffeico, ferulico e sinapico), i flavan-3-oli (catechina, epicatechina, procianidine), le antocianidine (pelargonidina, delphinidina), i flavonoli (quercetina, kaempferolo, miricetina, rutina, quercetina-3-β-D-glucoside) e altri fenoli minori (acido clorogenico, vicianina-2, eriocitrina, tocoferolo, apigenina), sono riportate di seguito. I valori sono espressi come media ± deviazione standard per la stagione di crescita 2025.

Phenolic Compound	KT	UT	BPT
Gallic acid	0.98 ± 0.08 a	0.78 ± 0.06 b	1.03 ± 0.09 a
Protocatechuic acid	0.49 ± 0.05 ns	0.50 ± 0.05	0.50 ± 0.05
Procyanidin B2	0.25 ± 0.03 ns	0.24 ± 0.03	0.25 ± 0.03
Syringic acid	0.48 ± 0.05 ns	0.47 ± 0.05	0.46 ± 0.05
p-Coumaric acid	0.01 ± 0.003 b	0.54 ± 0.06 a	0.06 ± 0.01 b
Pelargonidin	0.44 ± 0.04 ns	0.43 ± 0.04	0.45 ± 0.04
m-Coumaric acid	0.01 ± 0.003 ns	0.40 ± 0.05	0.23 ± 0.03
o-Coumaric acid	0.76 ± 0.07 a	0.34 ± 0.05 b	0.16 ± 0.03 c
Catechin	0.44 ± 0.05 a	0.11 ± 0.02 b	0.01 ± 0.003 b
Vanillic acid	0.06 ± 0.01 ns	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01
Epicatechin	0.77 ± 0.08 a	0.01 ± 0.003 b	0.10 ± 0.02 b
Delphinidin	0.01 ± 0.003 ns	0.06 ± 0.01	0.04 ± 0.01
Trans-4-hydroxycinnamic acid	2.45 ± 0.22 ns	2.36 ± 0.19	2.40 ± 0.20
Sinapic acid	0.10 ± 0.01 ns	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.01
3-hydroxycinnamic acid	0.02 ± 0.004 ns	0.01 ± 0.003	0.04 ± 0.004
Myricetin	0.05 ± 0.01 ns	0.04 ± 0.01	0.07 ± 0.01
Luteolin	0.06 ± 0.01 ns	0.06 ± 0.01	0.07 ± 0.01
2,5-dihydroxybenzoic acid	0.03 ± 0.01 ns	0.03 ± 0.01	0.05 ± 0.01
Caffeic acid	0.02 ± 0.004 ns	0.01 ± 0.003	0.01 ± 0.003
Ellagic acid	0.09 ± 0.01 ns	0.08 ± 0.01	0.10 ± 0.01
Naringin	0.05 ± 0.01 ns	0.01 ± 0.003	0.01 ± 0.003
Quercetin	0.06 ± 0.01 ns	0.08 ± 0.01	0.09 ± 0.01
Kaempferol	0.05 ± 0.01 ns	0.04 ± 0.01	0.06 ± 0.01
Tocopherol	0.17 ± 0.02 ns	0.11 ± 0.02	0.07 ± 0.01
Procyanidin1	0.06 ± 0.01 ns	0.07 ± 0.01	0.05 ± 0.01
Chlorogenic acid	0.03 ± 0.01 ns	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01
Vicenin2	0.08 ± 0.01 ns	0.13 ± 0.02	0.13 ± 0.02
Eriocitrin	0.13 ± 0.02 ns	0.14 ± 0.02	0.14 ± 0.02
Rutin	0.06 ± 0.01 ns	0.07 ± 0.01	0.07 ± 0.01
Quercetin-3-β-D-glucoside	0.01 ± 0.01 ns	0.01 ± 0.004	0.02 ± 0.01
Ferulic acid	0.01 ± 0.003 ns	0.02 ± 0.004	0.01 ± 0.004
Apigenin	0.81 ± 0.10 ns	0.71 ± 0.09	0.66 ± 0.08

Lettere diverse all'interno della stessa colonna indicano differenze statisticamente significative tra i trattamenti secondo il test di Tukey ($p < 0,05$), "ns" indica che non ci sono differenze significative.

3. Discussioni

3.1. Effetti del caolino e della Farina di Basalto® sulla produttività della vite

L'applicazione di caolino (KT) e della Farina di Basalto® (BPT) ha migliorato la produttività della vite in condizioni di siccità e alte temperature [20]. La resa per vite è aumentata rispettivamente di circa il 9% e il 21% nelle viti KT e BPT, rispetto a quelle non trattate (UT) [21]. Questo aumento è stato principalmente attribuibile al maggiore peso dei grappoli e degli acini, mentre il numero di grappoli per vite è rimasto invariato. L'assenza di differenze significative nel numero di grappoli indica che l'aumento della resa nelle viti trattate è stato principalmente determinato dalla maggiore crescita degli acini e, di conseguenza, dalla maggiore massa dei grappoli. Queste risposte di resa sono in linea con le evidenze precedenti che mostrano come i film di particelle riflettenti possono sostenere la forza di accumulo e l'allocazione dei carboidrati sotto stress, principalmente grazie al miglioramento dell'attività fotosintetica e alla temperatura moderata della chioma.

3.2. Crescita della bacca e mitigazione dello stress termico

Il peso medio più elevato degli acini osservato nel gruppo KT suggerisce che il trattamento possa aver contribuito ad alleviare lo stress legato al calore e all'acqua durante lo sviluppo degli acini. Poiché la temperatura degli acini non è stata misurata direttamente, il presente studio non può dimostrare che il trattamento abbia ridotto la temperatura delle bacche [10,13]. Al contrario, la risposta osservata è coerente con il miglioramento delle prestazioni fisiologiche delle foglie e la diminuzione della temperatura fogliare registrate nelle viti trattate, che potrebbero aver contribuito indirettamente al mantenimento dello stato idrico degli acini. Il mantenimento dello stato idrico degli acini può derivare da molteplici meccanismi fisiologici. Una temperatura più bassa della bacca può ridurre direttamente la traspirazione attraverso la buccia e moderare i gradienti di potenziale idrico tra grappoli e tessuti vegetativi. È noto che le alte temperature aumentano la traspirazione e promuovono flussi d'acqua dagli acini in maturazione verso gli organi vegetativi, contribuendo alla riduzione del loro peso fresco durante la maturazione [24]. Di conseguenza, il peso più elevato delle bacche può riflettere uno stato fisiologico migliore delle viti trattate sotto stress estivo. Risultati simili sono stati riportati in altri studi che hanno riguardato caolino e materiali riflettenti applicati a viti e colture frutticole mediterranee esposte a intenso stress termico e radiativo [25-30]. Il maggiore peso della bacca e del grappolo osservato nelle viti trattate è quindi coerente con miglioramento dello stato idrico delle piante e una riduzione dei danni da scottature solari in condizioni ambientali stressanti [21]. Queste risposte integrate suggeriscono che i trattamenti riflettenti

possano agire contemporaneamente sulla fisiologia a livello fogliare e sul bilancio idrico a livello di bacche, contribuendo a miglioramenti coordinati nella crescita dei frutti.

3.3. Impatti sulla composizione del mosto

Solo il contenuto di solidi solubili totali (TSS) e di zuccheri ha mostrato differenze statisticamente significative tra i trattamenti all'interno di ogni anno, indicando che l'applicazione della Farina di Basalto® e caolino ha influenzato principalmente l'accumulo di solidi solubili e la quantità di zuccheri per acino. Al contrario, pH, acidità titolabile (TA) e rapporto TSS/TA non hanno mostrato variazioni significative tra i trattamenti, suggerendo che questi parametri siano rimasti stabili indipendentemente dai film di particelle minerali applicati. Per garantire la piena coerenza tra i risultati statistici e l'interpretazione dei risultati, lettere che indicano differenze significative sono state assegnate esclusivamente al contenuto di TSS e di zuccheri, che sono state le uniche variabili per le quali il test post-hoc di Tukey ha identificato effetti correlati al trattamento. Questo approccio evita di attribuire significatività laddove non è stata rilevata e allinea la presentazione dei dati con gli esiti dell'ANOVA a due vie. Anche la discussione sulla maturità tecnologica e acidità è stata rivista di conseguenza. Sebbene valori di pH più bassi nelle viti trattate possano essere rilevanti in condizioni climatiche calde, dove aumenti eccessivi del pH del mosto sono comunemente associati a maturazione accelerata e perdita di acidità [31–35], queste osservazioni sono ora presentate come tendenze non significative, coerenti con l'assenza di differenze statistiche nell'acidità titolabile. Analogamente, i riferimenti alle implicazioni del pH per la stabilità microbiologica, la stabilità del colore e la freschezza sensoriale [36,37] sono stati mantenuti ma inquadrati in modo appropriato per evitare un'iper interpretazione.

3.4. Prestazioni fotosintetiche e fotoprotezione

Le misurazioni fisiologiche mostrarono che KT e BPT hanno efficacemente attenuato gli effetti di radiazioni elevate e temperature sull'apparato fotosintetico. Le viti trattate hanno mantenuto valori significativamente più alti di F_v'/F_m' , $\Phi PSII$, qP ed ETR rispetto a UT, indicando una migliore efficienza del fotosistema II e una riduzione della fotoinibizione. In particolare, l'aumento di ETR (+47% nella BPT e +67% nella KT rispetto all'UT) suggerisce un trasferimento più efficiente dell'energia lungo la catena di trasporto elettrone. Queste risposte possono essere interpretate come una conseguenza diretta della riduzione del carico radiativo e termico sulla superficie fogliare indotta dai trattamenti riflettenti. Caolino e Farina di Basalto® aumentano la riflettanza della radiazione incidente (UV, PAR, IR), abbassando così la

temperatura fogliare e riducendo l'energia in eccesso assorbita dai cloroplasti [38,39]. Questo effetto è particolarmente rilevante in condizioni di elevata radiazione e limitazione idrica, dove l'energia in eccesso può compromettere la stabilità del complesso in evoluzione dell'ossigeno e favorire l'inattivazione della PSII. In tali condizioni, ridurre il carico energetico consente una migliore regolazione dei meccanismi di dissipazione dell'energia, limitando la necessità di spegnimento non fotochimico [13,40].

Allo stesso tempo, mantenere un'alta efficienza fotochimica favorisce un uso più efficace degli elettroni nella fissazione del carbonio, contribuendo a un'assimilazione netta sostenuta della CO₂. La riduzione dell'intensità NIR osservata nel trattamento KT è coerente con l'elevata riflettanza dei film di particelle di caolino, che diminuiscono l'assorbimento della radiazione infrarossa da parte dei tessuti fogliari. Da un punto di vista ecofisiologico, limitare l'intercettazione del NIR, responsabile di una parte sostanziale del carico termico fogliare, può contribuire a moderare la temperatura fogliare in condizioni di elevata radiazione. Una riflettanza diffusa più elevata può anche alterare la distribuzione della luce della chioma, riducendo i punti caldi localizzati. Nel complesso, questi adattamenti fisiologici aiutano a spiegare i miglioramenti osservati nella crescita e nella resa delle bacche, evidenziando lo stretto legame tra fotoprotezione, assimilazione del carbonio e prestazioni riproduttive in condizioni di stress estivo mediterraneo. È importante sottolineare che i miglioramenti osservati nell'efficienza d'uso dell'acqua (WUE) e nella fotosintesi forniscono una spiegazione meccanicistica per l'aumento del peso e della resa delle bacche, rafforzando il legame funzionale tra le dinamiche degli scambi gassosi e le prestazioni riproduttive in condizioni di stress.

3.5. Efficienza nell'uso dell'acqua e dinamica dello scambio di gas

Il miglioramento dell'attività fotosintetica si è riflesso anche in una maggiore efficienza nell'uso dell'acqua (WUE), risultante da una combinazione di regolazione stomatica e funzionalità PSII preservata, permettendo alle viti di sostenere tassi fotosintetici più elevati senza aumentare la perdita d'acqua. Le viti trattate con KT hanno mostrato un aumento significativo dell'assimilazione netta di CO₂ (An) rispetto al controllo, accompagnato da una conduttanza stomatica (gs) più che raddoppiata. Tuttavia, questo aumento dell'apertura stomatica non ha portato a un corrispondente aumento della traspirazione (E), che rimase sostanzialmente invariata. Ciò può essere attribuito all'effetto riflettente dei materiali, che riduce la temperatura fogliare e al deficit di pressione di vapore tra foglia e aria (VPD) [41]. In queste condizioni, una maggiore apertura stomatica aumenta l'assorbimento di CO₂ senza aumentare proporzionalmente la

perdita d'acqua. Di conseguenza, le viti trattate hanno mostrato un miglioramento della WUE, in particolare quelle del gruppo KT (+35% rispetto all'UT). Inoltre, l'aumento del rapporto An/Ci osservato nelle viti trattate suggerisce una maggiore efficienza di carbossilazione e una riduzione delle limitazioni biochimiche alla fotosintesi. Ciò indica che il miglioramento delle prestazioni fotosintetiche non è dovuto solo a una maggiore disponibilità di CO₂ stomatica, ma anche a una maggiore capacità del mesofillo di fissare il carbonio, probabilmente favorita dalle condizioni microclimatiche più favorevoli indotte dai trattamenti [42,43]. Le differenze tra KT e BPT possono essere associate alle caratteristiche fisiche distinte dei materiali. Mentre il caolino forma una pellicola particellaria altamente riflettente, ampiamente documentata per la sua capacità di modificare l'equilibrio radiativo della chioma, la Farina di Basalto® agisce principalmente come polvere minerale depositata sulla superficie fogliare, i cui effetti sono stati associati alla mitigazione dello stress ambientale e al miglioramento delle prestazioni ecofisiologiche, sebbene i meccanismi radiativi coinvolti siano meno documentati rispetto a quelli del caolino [44]. Questo potrebbe spiegare i maggiori aumenti osservati in ETR, An, catechina, epicatechina e WUE nelle viti trattate con KT. Al contrario, la maggiore risposta produttiva osservata nelle viti trattate con BPT suggerisce che effetti fisici o minerali aggiuntivi possano aver contribuito alle prestazioni della pianta, anche se i dati attuali non consentono l'identificazione diretta di questi processi. Le differenze nella dimensione delle particelle, nell'adesione, nella persistenza sulla superficie fogliare e nelle proprietà ottiche possono aver influenzato il microclima della chioma e le risposte fisiologiche in modi diversi [45]. Risposte fisiologiche simili ai materiali riflettenti sono state riportate in altri studi condotti su viti e colture frutticole mediterranee [10,21,41,46,47].

3.6. Modulazione del metabolismo fenolico

Il profilo fenolico ha rivelato solo un numero limitato di differenze correlate al trattamento, senza evidenza di ampie o coordinate variazioni nelle vie metaboliche secondarie. Sia KT che BPT hanno portato a concentrazioni significativamente più elevate di acido gallico (circa +29-35% rispetto all'UT). All'interno del gruppo acidi idrossicinnamici, le viti non trattate hanno accumulato livelli significativamente più alti di acido p-cumarico, mentre KT e BPT ne hanno notevolmente ridotto la concentrazione. Un andamento simile, seppur meno marcato, è stato osservato per l'acido m-coumarico, mentre l'acido o-cumarico ha raggiunto i valori più alti sotto KT. Anche KT ha prodotto la risposta più chiara tra i flavan-3-oli, con concentrazioni di catechina ed epicatechina significativamente più alte rispetto a UT, anche se questa tendenza non si sia riflessa in altri composti della stessa classe. La BPT ha mostrato livelli leggermente

elevati di alcuni flavonoidi, come miricetina e kaempferolo, ma queste differenze sono rimaste modeste. Nel complesso, le risposte fenoliche sono risultate specifiche per ciascun composto e di entità limitata, indicando che i film di particelle minerali non hanno indotto modifiche estese del metabolismo secondario dell'uva nelle condizioni di questo studio.

3.7. Implicazioni complessive per la resilienza delle viti

Nel complesso, le risposte produttive, fisiologiche e biochimiche osservate indicano che sia il caolino che la Farina di Basalto® migliorano la resilienza delle viti allo stress estivo tipico degli ambienti mediterranei. I miglioramenti nelle prestazioni fotosintetiche, nell'efficienza nell'uso dell'acqua e nella crescita degli acini sono stati associati a specifiche modifiche nel metabolismo fenolico, suggerendo meccanismi complementari di mitigazione dello stress. Il trattamento con caolino (KT) ha esercitato effetti più marcati sugli scambi gassosi, sull'accumulo di flavanoli e sui metaboliti correlati agli antiossidanti, mentre il trattamento con Farina di Basalto® (BPT) ha mostrato un'influenza maggiore sulla resa e sull'accumulo di specifici flavonoli. Questi risultati evidenziano il potenziale dei trattamenti riflettenti minerali come strategie sostenibili per mitigare lo stress da siccità e termico in viticoltura, contribuendo alla conservazione della composizione e della qualità tecnologica dell'uva in scenari di cambiamento climatico.

4. Materiali e Metodi

4.1. Contesto pedoclimatico dell'area di studio

Il contesto pedoclimatico di questa sperimentazione è una stretta striscia costiera situata tra il Mar Tirreno e il Mar Ionio, all'interno della Denominazione di Origine Controllata (DOC) Faro. L'area produttiva si trova interamente all'interno del comune di Messina, estendendosi da Giampilieri Marina a Capo Peloro sul lato ionico e da Capo Peloro a Orto di Toluozzo sul lato tirreno. Lo studio è stato condotto nel periodo 2024-2025 in un vigneto di *Vitis vinifera* L. cv. Nocera che copre circa 1 ettaro, impiantato nel 2005 e allevato a cordone speronato. La distanza tra le viti era di 2,50 m × 1,00 m, corrispondente a una densità di impianto di 4000 viti ha⁻¹. Le viti poste su pali posizionati a 80 cm dal suolo, con supporti a 2 m da terra. La potatura invernale è stata effettuata su speroni a due gemme, mantenendo un carico di 12 gemme per vite per metro lineare di parete della chioma. Le prove sperimentali sono state condotte su viti innestate su portainnesti 140 Ruggeri (140R). Il vigneto è gestito in condizioni di aridocoltura, senza irrigazione.

supplementare in nessuna delle due stagioni. In entrambi gli anni, l'andamento delle temperature rivela un clima caratterizzato da una forte stagionalità e un forte caldo estivo (Figure 2 e 3). Il periodo luglio-agosto mostra costantemente temperature massime molto elevate (spesso superiori a 35 °C) e minime elevate, indicando un raffreddamento notturno limitato (Figure 2 e 3).

L'ampliamento del divario tra le temperature massime e minime in estate suggerisce una maggiore variabilità termica e possibili condizioni di ondate di caldo, mentre i valori invernali rimangono più bassi e stabili (Figure 2 e 3). I dati delle stazioni meteorologiche hanno mostrato un tipico andamento delle precipitazioni mediterranee, con estati secche e alta variabilità interannuale. Le precipitazioni totali sono state di 613,6 mm nel 2024 e di 802,0 mm nel 2025, con precipitazioni concentrate principalmente a fine inverno e autunno, mentre luglio è rimasto estremamente secco in entrambi gli anni (4-5 mm). Nel complesso, i dati mostrano un'area caratterizzata da un calore estivo intenso e persistente, tipico di un clima di tipo mediterraneo. Il suolo del sito sperimentale è classificato come franco-argilloso, un terreno con tessitura media che combina porosità moderata con una notevole capacità di ritenzione d'acqua. Le misurazioni in campo sono state utilizzate per determinare la Capacità di Campo (30%) e il Punto di Appassimento Permanente (15%), mentre l'umidità del suolo è stata monitorata utilizzando sensori dielettrici SM100 (Delta-T Devices Ltd., Cambridge, Regno Unito).

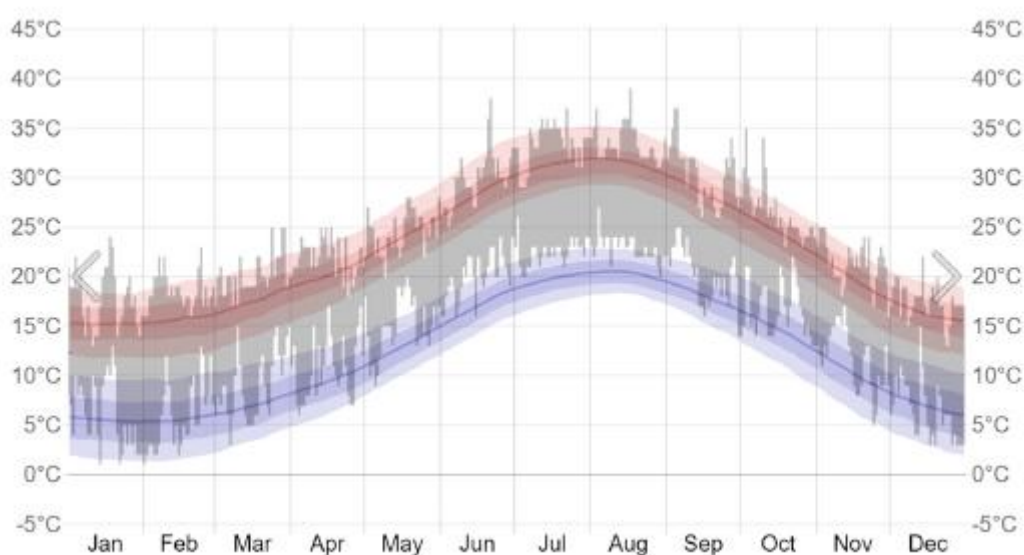


Figura 2. Regime termico dell'area di studio per l'anno 2024, che illustra l'evoluzione stagionale della temperatura dell'aria e il caratteristico riscaldamento estivo tipico del clima mediterraneo locale. Le fasce colorate rappresentano diversi intervalli termici: la fascia rossa indica temperature più elevate, la fascia grigia denota condizioni medie e la fascia blu corrisponde a temperature più basse. Fonte: WeatherSpark (2024).

4.2. Disegno sperimentale

L'area sperimentale è stata organizzata in tre blocchi randomizzati, ciascuno contenente tre trattamenti: UT (non trattato), KT (trattamento con caolino) e BPT (trattamento con Farina di Basalto®), con 12 viti per trattamento per blocco, per un totale di 36 viti per trattamento. I prodotti di protezione sono stati applicati in tre stadi fenologici corrispondenti: BBCH 75 (sviluppo della bacca), BBCH 77 (chiusura del grappolo) e BBCH 83 (invaiaitura). Durante la stagione vegetativa 2024, le applicazioni sono state effettuate il 27 giugno, 14 luglio e 4 agosto, mentre nel 2025 sono state effettuate il 29 giugno, 16 luglio e 6 agosto. La formulazione di caolino (Serbios Srl, Rovigo, Italia) è stata applicata a 5 kg hL^{-1} , mentre la Farina di Basalto® (Basalti Orvieto Srl, Terni, Italia) è stata applicata a 3 kg hL^{-1} . I trattamenti sono stati applicati utilizzando un irroratore a spalla con ugelli a cono cavo operanti a circa 5 bar, calibrati a una portata di circa $1,0 \text{ L min}^{-1}$ ($\approx 500 \text{ L ha}^{-1}$). Entrambi i lati della chioma sono stati irrorati per garantire una copertura completa di foglie e grappoli. Per ogni applicazione è stato eseguito un singolo passaggio per ogni lato della chioma. Misurazioni fisiologiche sono state effettuate sulle viti di ciascun gruppo di trattamento dopo le applicazioni. Le uve di ciascun trattamento sono state raccolte a maturazione tecnologica per garantire la comparazione tra i trattamenti, nonostante le lievi differenze nel tasso di maturazione.

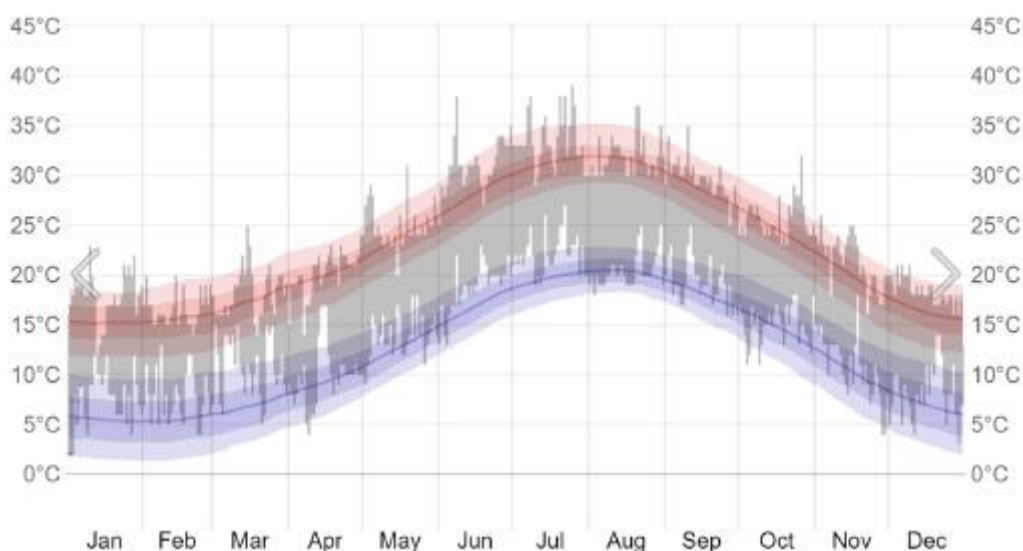


Figura 3. Regime termico dell'area di studio per l'anno 2025, illustrando l'evoluzione stagionale dell'aria la temperatura e il caratteristico riscaldamento estivo tipico del clima mediterraneo locale. Le fasce colorate rappresentano diversi intervalli termici: la fascia rossa indica temperature più elevate, la fascia grigia indica le condizioni medie, mentre la fascia blu corrisponde a temperature più basse. Fonte: WeatherSpark (2025).

4.3. Misurazioni Eco-fisiologiche

I parametri relativi allo scambio gassoso e fluorescenza della clorofilla sono stati misurati su viti di ciascun trattamento. Le misurazioni sono state effettuate su foglie mature e completamente espanse, situate nella parte centrale della chioma (3 foglie × 4 piante per trattamento per blocco). Le determinazioni dello scambio gassoso sono state effettuate nella seconda metà di agosto utilizzando un sistema portatile di fotosintesi (LI-6400XT; LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA). Le misurazioni sono state effettuate in una limpida giornata estiva a mezzogiorno solare (12:00) in condizioni atmosferiche ottimali. La temperatura delle foglie è stata registrata utilizzando la termocoppia fornita con il sistema (modello 6400-04).

Il contenuto di clorofilla è stato stimato indirettamente tramite letture SPAD utilizzando un misuratore di clorofilla SPAD-502 (Konica Minolta Inc., Tokyo, Giappone), dotato di due sensori ottici che operano a diverse lunghezze d'onda e un fotodiodo al silicio (SPD). Sono state misurate in totale 36 foglie per trattamento. L'irradianza spettrale è stata misurata a mezzogiorno (12:00 h) utilizzando uno spettro-radiometro (Mod. PS-300 Spectroradiometer, Apogee Instruments Inc., Logan, UT, USA). Le misurazioni sono state effettuate utilizzando lastre di plexiglass trattate con le stesse concentrazioni applicate sul campo per riprodurre le condizioni ottiche dei trattamenti sperimentali.

4.4. Misurazioni morfo-biometriche e qualitativo-quantitative

Al momento della vendemmia, per ogni vite all'interno di ogni trattamento e blocco, la resa per vite è stata determinata sia in termini di peso totale che di numero di grappoli. Tre campioni per trattamento e per blocco (un grappolo per vite; tre grappoli da tre viti) sono stati trasportati al Laboratorio delle Colture Arboree del Dipartimento di Agricoltura dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, dove sono state effettuate analisi morfo-biometriche e la determinazione degli indici di maturazione. Il peso fresco (FW) di bacche e grappoli è stato misurato utilizzando una bilancia analitica (BJ610C, Precisa Instruments AG, Dietikon, Svizzera). Per ciascuno campione, 100 bacche per trattamento e blocco sono state conservate a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ per le successive analisi nutraceutiche, mentre altre 100 bacche sono state utilizzate per le valutazioni di maturazione. I solidi solubili totali (TSS) sono stati misurati utilizzando un rifrattometro digitale (mod. PAL-1, Atago Co., Ltd., Tokyo, Giappone) ed espresse come solidi solubili in g per 100 g di mosto. L'acidità titolabile (TA) è stata misurata utilizzando un titolatore potenziometrico (serie Titralab AT1000, HACH, Loveland, CO, USA); un'aliquota di 5 mL di mosto è stata titolata con 0,5 N NaOH fino alla neutralizzazione, e la TA è stata espressa come percentuale di acido tartarico. Il rapporto TSS/TA è stato calcolato anche come indice di maturazione aggiuntivo. Per le variabili relative alle bacche, sono state

campionate 100 bacche per trattamento e trattate come sottocampioni; le singole misurazioni sono state mediate a livello di vite prima dell'analisi statistica. Il contenuto di zucchero per bacca è stato stimato indirettamente combinando il peso medio della bacca con il corrispondente valore TSS. In particolare, il contenuto di zucchero è stato calcolato come mg di solidi solubili per acino, ottenuto moltiplicando il peso fresco dell'acino per TSS espresso in g solidi solubili per 100 g di mosto.

4.5. Determinazione del contenuto fenolico totale e profilazione fenolica tramite HPLC

L'estrazione dei composti fenolici e l'analisi cromatografica sono state effettuate utilizzando solventi di grado HPLC, tra cui metanolo e acetonitrile (Sigma-Aldrich, $\geq 99,99\%$), acetone (Sigma-Aldrich, $\geq 99,5\%$), acqua deionizzata, acido formico (Carlo Erba, 95%) e acido cloridrico (Carlo Erba, 37%). Un set completo di standard analitici rappresentativi di acidi fenolici, flavonoidi, antocianiche e tannini è stato ottenuto da Sigma Aldrich (Italia). Gli standard includevano acido gallico, acido protocatecuico, procianidine B1 e B2, acido siringico, acidi p, m e o-cumarico, pelargonidina, acido transcinnamico, bergamottina, cianidina-3-O-glucoside, catechina, acido vanilico, epicatechina, delphinida, acido trans-4-idrossicinnamico, acido sinapinico, acido-3-idrossicinnamico, miricettina, luteolina, punicalagina, acido-2,5-diidrossibenzoico, acido caffeico, acido ellagico, naringina, apigenina-7-neoesperidoide, spiraeoside, quercetina, kaempferolo, tocoferolo, acido clorogenico, vicianina 2, eriocitrina, rutina, vitexina, quercetina-3- β -D-glucoside, acido ferulico e apigenina. Sono state preparate soluzioni standard a quattro concentrazioni ($0,01$ - $0,10$ mg mL⁻¹) per generare curve di calibrazione esterne. Per la profilazione fenolica, le bacche sono state raccolte al momento della vendemmia da grappoli situati nella zona centrale della chioma. Per garantire un campionamento rappresentativo, gli acini sono stati selezionati dalle porzioni apicale, mediana e basale di ciascun grappolo. Per ogni trattamento sono state ottenute tre repliche biologiche indipendenti, ciascuna composta da circa 150 bacche. Le repliche sono state elaborate e analizzate separatamente senza essere unite; per ciascuna, sono state eseguite due repliche tecniche HPLC per verificare la ripetibilità analitica. Per la preparazione del campione, 0,1 g di bucce d'uva liofilizzate sono state sottoposte a due protocolli di estrazione: (i) estrazione con 10 mL di metanolo acidificato con 1% HCl, e (ii) estrazione con 10 mL di acetone (1% HCl) (1:1, v/v). Gli estratti sono stati agitati con vortex, centrifugati, filtrati attraverso filtri a membrana da 0,22 μ m e preparati per l'iniezione cromatografica. La profilazione fenolica è stata eseguita utilizzando un sistema HPLC Thermo Scientific Dionex UltiMate 3000 dotato di un rivelatore a matrice di diodi (DAD) e una colonna Kinetex C18 (250 $\times$ 4,6 mm, 5 μ m). La temperatura della colonna veniva mantenuta a 30 °C. La fase mobile era composta dal solvente A (acqua

+ acido formico allo 0,1%) e dal solvente B (acetonitrile + acido formico allo 0,1%), erogati a una portata di 1,0 mL min⁻¹. Il programma di eluzione del gradiente era il seguente: 5% B nella condizione iniziale, 15% B a 10 minuti, 25% B a 20 minuti, 40% B a 35 minuti, 60% B a 45 minuti, seguito da riequilibrio alle condizioni iniziali. Il volume di iniezione era di 10 µL. La rilevazione è stata effettuata a 260, 280, 300 e 520 nm, corrispondenti ai massimi di assorbimento dei principali gruppi fenolici. L'identificazione dei composti è stata ottenuta confrontando i tempi di ritenzione e gli spettri UV-Vis con quelli degli standard di riferimento autentici. La quantificazione è stata effettuata utilizzando curve di calibrazione esterne, con coefficienti di determinazione (R^2) superiori a 0,998 per tutti gli analiti. La validazione del metodo ha incluso la determinazione dei limiti di rilevamento (LOD) e dei limiti di quantificazione (LOQ) secondo i criteri 3 σ e 10 σ , rispettivamente. La ripetibilità intra e inter-giornaliera è stata valutata e ha mostrato coefficienti di variazione (CV) inferiori al 5%. Il recupero dell'estrazione variava dall'88% al 104%, confermando un'accuratezza e una precisione analitica soddisfacenti. Tutti i composti fenolici quantificati sono stati sottoposti ad analisi statistica mediante ANOVA a una via seguita dal test post hoc di Tukey ($p < 0,05$). Nelle Tabelle 5 e 6, le lettere di significatività sono riportate solo per composti che mostrano differenze statisticamente significative tra i trattamenti, mentre "ns" indica l'assenza di differenze significative.

4.6. Analisi statistica

Le analisi statistiche sono state effettuate utilizzando SPSS v.22.0. È stata utilizzata un'analisi della varianza a due vie (ANOVA) per valutare gli effetti dell'anno, del trattamento e della loro interazione su tutti i parametri fisiologici, morfobiometrici e qualitativi. L'unità sperimentale era la singola vite all'interno di un disegno a blocchi randomizzati completi. Per ciascun parametro, le misurazioni multiple di sottocampioni (foglie, bacche, grappoli) sono state mediate a livello di vite prima dell'analisi per garantire la replicazione biologica ed evitare la pseudoreplicazione. Questo approccio ha permesso di valutare se le variabili fossero influenzate indipendentemente da ciascun fattore o se gli effetti combinati (anno $\times$ trattamento) contribuissero in modo significativo alla variabilità. Quando sono state rilevate differenze significative, è stato applicato il test post hoc di Tukey per la separazione delle medie ($p \leq 0,05$).

5. Conclusioni

Questo studio dimostra che i film di particelle minerali, in particolare il caolino calcinato (KT) e la Farina di Basalto® (BPT), possono mitigare efficacemente gli impatti della siccità e delle alte temperature nella

Vitis vinifera L. cv. Nocera coltivata in un ambiente mediterraneo. Durante le due stagioni sperimentali, entrambi i trattamenti hanno migliorato le prestazioni della vite rispetto alle piante non trattate, indicando una maggiore capacità di sostenere l'attività fisiologica e l'efficienza produttiva sotto stress estivo. L'aumento della resa è stato principalmente associato ad incrementi del peso della bacca e del grappolo, mentre il numero di grappoli per vite è rimasto invariato, suggerendo che i trattamenti abbiano influenzato la crescita dei frutti e lo sviluppo delle bacche piuttosto che il potenziale riproduttivo. Le viti trattate hanno inoltre mostrato un contenuto di solidi solubili totali più elevati rispetto alle viti non trattate, indicando un effetto benefico sulla maturazione tecnologica dell'uva al momento della vendemmia. Le misurazioni fisiologiche hanno rivelato costantemente un'efficienza fotosintetica superiore nelle viti trattate, come evidenziato dai miglioramenti nei parametri di fluorescenza della clorofilla, dalla velocità di trasporto degli elettroni, nella fotosintesi netta, della conduttanza stomatica e nell'efficienza d'uso dell'acqua. Queste risposte indicano che entrambi i film minerali hanno contribuito a mantenere la funzionalità fotosintetica in condizioni di elevato stress termico e radiativo. La profilazione polifenolica ha rivelato solo una variazione limitata dipendente dal trattamento, con differenze significative circoscritte a un piccolo numero di composti. Sebbene la polvere di caolino e la Farina di Basalto® abbiano mostrato tendenze distinte in alcuni acidi fenolici o flavonoli, la maggior parte dei costituenti fenolici è rimasta statisticamente invariata nel corso delle stagioni. Sebbene la composizione del mosto sotto KT e BPT suggerisca una potenziale idoneità tecnologica per la produzione di vino Faro DOC, queste indicazioni devono essere interpretate con cautela. Poiché lo studio non includeva vinificazione, analisi chimiche del vino o valutazione sensoriale, l'impatto effettivo dei film di particelle minerali sulla composizione del vino, sul profilo sensoriale e sulla tipicità del vino resta da determinare e merita ulteriori indagini. Nel complesso, i nostri risultati indicano che sia il KT che il BPT possono migliorare la resilienza della vite in condizioni estive mediterranee, mantenendo al contempo le prestazioni di resa e le principali caratteristiche qualitative dell'uva. Il basso impatto ambientale e l'applicabilità pratica di questi materiali li rendono strumenti promettenti per strategie di adattamento climatico in viticoltura. Ulteriori indagini, incluse valutazioni dirette dei vini risultanti, contribuiranno a chiarire in che misura questi trattamenti supportino o migliorino i requisiti sensoriali e di tipicità della DOC Faro.

Contributi degli autori: concettualizzazione, Concettualizzazione, RZ e GG; metodologia, RZ, AD e GG; software, AD e GG; validazione, AD e GG; analisi formale, AD, GG, GI e BP; indagine, AD, GG e GI; risorse, AD e GG; cura dei dati, AD e GG; stesura della bozza originale, AD, GG e GI; revisione e modifica del testo,

AD e GG; visualizzazione, AD e GG; supervisione, RZ; amministrazione del progetto, AD, GG e RZ; acquisizione dei finanziamenti, AD. Tutti gli autori hanno letto e approvato la versione pubblicata del manoscritto.

Finanziamento: Questa pubblicazione è stata finanziata da un contributo fornito dall'Università Mediterranea di Reggio Calabria, conferito dal R.D. n. 428 del 13.11.2025, CUP C35F21001400002.

Dichiarazione sulla disponibilità dei dati: I contributi originali presentati in questo studio sono inclusi nell'articolo. Ulteriori richieste possono essere indirizzate all'autore corrispondente.

Ringraziamenti: Gli autori desiderano ringraziare l'Istituto Agricolo Pietro Cuppari di San Placido Caloner. (ME), Italia, per ospitare l'attività di ricerca.

Conflitti di Interesse: Gli autori dichiarano di non esserne conflitti di interesse

6. Riferimenti

- [1]. FAO; UNEP. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW 2021): Systems at Breaking Point; FAO: Rome, Italy, 2020.
- [2]. IPCC. 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: Cambridge, UK, 2022. [CrossRef]
- [3]. van Leeuwen, C.; Darriet, P. The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *J. Wine Econ.* **2021**, *16*, 202–214. [CrossRef]
- [4]. Bernardo, S.; Dinis, L.T.; Machado, N.; Moutinho-Pereira, J. Grapevine abiotic stress assessment and search for sustainable adaptation strategies in Mediterranean-like climates: A review. *Agron. Sustain. Dev.* **2018**, *38*, 66. [CrossRef]
- [5]. Gullo, G.; Dattola, A.; Vonella, V.; Zappia, R. Effects of two reflective materials on gas exchange, yield, and fruit quality of sweet orange tree *Citrus sinensis* (L.) Osb. *Eur. J. Agron.* **2020**, *118*, 126071. [CrossRef]
- [6]. Gullo, G.; Dattola, A.; Vonella, V.; Zappia, R. The improvement of productive performances of clementine trees (*Citrus clementina* Hort. Ex Tan.) sprayed with reflective material. *Int. J. Fruit Sci.* **2020**, *20*, S1681–S1695. [CrossRef]
- [7]. Cantore, V.; Pace, B.; Albrizio, R. Kaolin-based particle film technology affects tomato physiology, yield and quality. *Environ. Exp. Bot.* **2009**, *66*, 279–288. [CrossRef]
- [8]. Glenn, D.M. Particle film mechanisms of action that reduce the effect of environmental stress in 'Empire' apple. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **2009**, *134*, 314–321. [CrossRef]
- [9]. Glenn, D.M.; Puterka, G.J. The use of plastic films and sprayable reflective particle films to increase light penetration in apple canopies and improve apple color and weight. *HortScience* **2007**, *42*, 91–96. [CrossRef]
- [10]. Rosati, A.; Metcalf, S.G.; Buchner, R.P.; Fulton, A.E.; Lampinen, B.D. Effects of kaolin application on light absorption and distribution, radiation use efficiency and photosynthesis of almond and walnut canopies. *Ann. Bot.* **2006**, *99*, 255–263. [CrossRef] [PubMed]

- [11]. Deis, L.; Martinez-Barbera, J.; Fort, F.; Balda, P.; Pou, A.; Quiroga, A.M.; Ferrer-Gallego, R. Potential use of kaolin in viticulture: Physiological basis and future perspectives. *Plants* **2026**, *15*, 1276. [CrossRef] [PubMed]
- [12]. Dinis, L.T.; Bernardo, S.; Luzio, A.; Pinto, G.; Meijon, M.; Pinto-Marijuan, M.; Cotado, A.; Correia, C.; Moutinho-Pereira, J. Kaolin modulates ABA and IAA dynamics and physiology of grapevine under Mediterranean summer stress. *J. Plant Physiol.* **2018**, *220*, 181–192. [CrossRef] [PubMed]
- [13]. Dinis, L.T.; Bernardo, S.; Conde, A.; Pimentel, D.; Ferreira, H.; Felix, L.; Geros, H.; Correia, C.; Moutinho-Pereira, J. Kaolin exogenous application boosts antioxidant capacity and phenolic content in berries and leaves of grapevine under summer stress. *J. Plant Physiol.* **2016**, *191*, 45–53. [CrossRef] [PubMed]
- [14]. Dinis, L.T.; Malheiro, A.; Luzio, A.; Fraga, H.; Ferreira, H.; Gonçalves, I.; Pinto, G.; Correia, C.; Moutinho-Pereira, J. Improvement of grapevine physiology and yield under summer stress by kaolin foliar application: Water relations, photosynthesis and oxidative damage. *Photosynthetica* **2017**, *56*, 641–651.
- [15]. Conde, A.; Pimentel, D.; Neves, A.; Dinis, L.T.; Bernardo, S.; Correia, C.M.; Gerós, H.; Moutinho-Pereira, J. Kaolin foliar application has a stimulatory effect on phenyl-propanoid and flavonoid pathways in grape berries. *Front. Plant Sci.* **2016**, *7*, 1150. [CrossRef] [PubMed]
- [16]. Shellie, K. Foliar reflective film and water deficit increase anthocyanin to soluble solids ratio during berry ripening in Merlot. *Am. J. Enol. Vitic.* **2015**, *66*, 348–356. [CrossRef]
- [17]. Shellie, K.C.; King, B.A. Kaolin particle film and water deficit influence red wine grape color under high solar radiation in an arid climate. *Am. J. Enol. Vitic.* **2013**, *64*, 214–222. [CrossRef]
- [18]. Laane, H.M.P. The effects of foliar sprays with different silicon compounds. *Plants* **2018**, *7*, 45. [CrossRef] [PubMed]
- [19]. Petracca, F.; Arena, C.; Cirillo, C.; De Micco, V. Basalt dust deposition on leaves does not influence the measurement of ecophysiological traits in grapevine. *Photosynthetica* **2023**, *61*, 244–249. [CrossRef] [PubMed]
- [20]. Dattola, A.; Gullo, G.; Zappia, R. 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. [CrossRef]
- [21]. Dattola, A.; Gullo, G.; Accardo, A.; Zappia, R. Foliar application of natural reflective minerals enhances physiological performance and yield of *Vitis vinifera* L. cv. Chardonnay under Mediterranean climate stress. *Vitis* **2026**, *65*, 3.
- [22]. Dattola, A.; Gullo, G. Effect of two reflective materials on the physiological and production behaviour of bergamot (*Citrus bergamia* Risso et Poiteau) plants. *Sci. Hortic.* **2024**, *338*, 113636. [CrossRef]
- [23]. Singh, R.K.; Afonso, J.; Nogueira, M.; Oliveira, A.A.; Cosme, F.; Falco, V. Silicates of potassium and aluminium (kaolin): Comparative foliar mitigation treatments and biochemical insight on grape berry quality in *Vitis vinifera* L. (cv. Touriga Nacional and Touriga Franca). *Biology* **2020**, *9*, 58. [CrossRef] [PubMed]
- [24]. Zhang, Y.; Keller, M. Grape berry transpiration is determined by vapor pressure deficit, cuticular conductance, and berry size. *Am. J. Enol. Vitic.* **2015**, *66*, 454–462. [CrossRef]

- [25]. Poni, S.; Bernizzoni, F.; Civardi, S.; Libelli, N. Effects of early leaf removal on shoot photosynthesis, yield components, and grape composition. *Am. J. Enol. Vitic.* 2007, 58, 397–405. [CrossRef]
- [26]. Palliotti, A.; Tombesi, S.; Silvestroni, O.; Lanari, V.; Gatti, M.; Poni, S. Changes in vineyard establishment and canopy management urged by earlier climate-related grape ripening: A review. *Sci. Hortic.* 2014, 178, 43–54. [CrossRef]
- [27]. Spiers, J.D. Effects of Kaolin Clay Particle Film on Blueberry Plants. Master's thesis, Mississippi State University, Mississippi State, MS, USA, 2002.
- [28]. Saour, G.; Makee, H. A kaolin-based particle film for suppression of the olive fruit fly *Bactrocera oleae* Gmelin (Dip., Tephritidae) in olive groves. *J. Appl. Entomol.* 2004, 128, 28–31. [CrossRef]
- [29]. Glenn, D.M.; Puterka, G.J.; Drake, S.; Unruh, T.R.; Knight, A.L.; Baherle, P.; Prado, E.; Baugher, T.A. Particle film application influences apple leaf physiology, fruit yield, and fruit quality. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 2001, 126, 175–181. [CrossRef]
- [30]. Puterka, G.J.; Glenn, D.M.; Sekutowski, D.G.; Unruh, T.R.; Jones, S.K. Progress toward liquid formulations of particle films for insect and disease control in pear. *Environ. Entomol.* 2000, 29, 329–339. [CrossRef]
- [31]. Ribéreau-Gayon, P.; Dubourdieu, D.; Donèche, B.; Lonvaud, A. *Handbook of Enology, Volume 2: The Chemistry of Wine Stabilization and Treatments*; Wiley: Chichester, UK, 2005.
- [32]. Kader, A.A. Fruit maturity, ripening, and quality relationships. *Acta Hortic.* 1999, 485, 203–208. [CrossRef]
- [33]. Crippen, D.D.; Morrison, J.C. The effects of sun exposure on the compositional development of Cabernet Sauvignon berries. *Am. J. Enol. Vitic.* 1986, 37, 235–242. [CrossRef]
- [34]. Dokoozlian, N.K.; Kliewer, W.M. Influence of light on grape berry growth and composition varies during fruit development. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 1996, 121, 869–874. [CrossRef]
- [35]. Bergqvist, J.; Dokoozlian, N.; Ebisuda, N. Sunlight exposure and temperature effects on berry growth and composition of Cabernet Sauvignon and Grenache in the Central San Joaquin Valley of California. *Am. J. Enol. Vitic.* 2001, 52, 1–7. [CrossRef]
- [36]. De Orduna, R.M. Climate change associated effects on grape and wine quality and production. *Food Res. Int.* 2010, 43, 1844–1855. [CrossRef]
- [37]. Rienth, M.; Torregrosa, L.; Sarah, G.; Ardisson, M.; Brillouet, J.M.; Romieu, C. Temperature desynchronizes sugar and organic acid metabolism in ripening grapevine fruits and remodels their transcriptome. *BMC Plant Biol.* 2016, 16, 164. [CrossRef] [PubMed]
- [38]. Glenn, D.M.; Erez, A.; Puterka, G.J.; Gundrum, P. Particle films affect carbon assimilation and yield in 'Empire' apple. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 2003, 128, 356–362. [CrossRef]
- [39]. Frioni, T.; Tombesi, S.; Luciani, E.; Sabbatini, P.; Berrios, J.G.; Palliotti, A. Kaolin treatments on Pinot noir grapevines for the control of heat stress damages. *BIO Web Conf.* 2019, 13, 04004. [CrossRef]
- [40]. Kress, E.; Jahns, P. The dynamics of energy dissipation and xanthophyll conversion in *Arabidopsis* indicate an indirect photoprotective role of zeaxanthin. *Front. Plant Sci.* 2017, 8, 2094. [CrossRef] [PubMed]
- [41]. Jifon, J.L.; Syvertsen, J.P. Kaolin particle film applications can increase photosynthesis and water use efficiency of 'Ruby Red' grapefruit leaves. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 2003, 128, 107–112. [CrossRef]

- [42]. Farquhar, G.D.; von Caemmerer, S.; Berry, J.A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta* 1980, 149, 78–90. [CrossRef] [PubMed]
- [43]. Bernacchi, C.J.; Bagley, J.E.; Serbin, S.P.; Ruiz Vera, U.M.; Rosenthal, D.M.; Van Loocke, A. Modelling C₃ photosynthesis from the chloroplast to the ecosystem. *Plant Cell Environ.* 2013, 36, 1641–1657. [CrossRef] [PubMed]
- [44]. Petracca, F.; Cirillo, C.; Bonfante, A.; Arena, C.; Giulioli, M.; Erbaggio, A.; Amitrano, C.; De Micco, V. Combined effect of basalt dust foliar distribution and water availability on leaf morpho-physiological traits and grape quality in Falanghina. In *Proceedings of the 25th EGU General Assembly, Vienna, Austria, 23–28 April 2023*; EGU 7792.
- [45]. Glenn, D.M.; Puterka, G.J. Particle films: A new technology for agriculture. *Hortic. Rev.* 2010, 31, 1–44.
- [46]. Björkman, O.; Demmig, B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. *Planta* 1987, 170, 489–504. [CrossRef] [PubMed]
- [47]. Lombardini, L.; Harris, M.K.; Glenn, D.M. Effects of particle film application on leaf gas exchange, water relations, nut yield, and insect populations in mature pecan trees. *HortScience* 2005, 40, 1376–1380. [CrossRef]

Disclaimer/Nota dell'editore: Le dichiarazioni, opinioni e dati contenuti in tutte le pubblicazioni sono esclusivamente dell'autore o dei contributori e non di MDPI e/o dell'editore. MDPI e/o il/i redattore/i declinano la responsabilità per qualsiasi danno a persone o proprietà derivante da idee, metodi, istruzioni o prodotti menzionati nel contenuto.