

















## Contenuto di clorofilla nelle piante di mais ottenute da semi trattati con plasma ad aria a bassa pressione

## Contenido de clorofila en plantas de maíz obtenidas de semillas tratadas con plasma de aire a baja presión

Sosa-Galindo, Daniel <sup>a</sup>, Castillo-Gutiérrez, Antonio <sup>b</sup>, Fuentes-Albarrán, María del Carmen <sup>c</sup> e Alarcón-Hernández, Fidel Benjamín <sup>d</sup>

- <sup>a</sup>  Universidad Autónoma del Estado de Morelos •  OLS-0312-2025 •  0009-0003-4317-6495 •  2180129  
<sup>b</sup>  Universidad Autónoma del Estado de Morelos •  OLR-5034-2025 •  0000-0002-2636-9637 •  202171  
<sup>c</sup>  Universidad Autónoma del Estado de Morelos •  LFS-3039-2024 •  0000-0003-1308-1332 •  171814  
<sup>d</sup>  Universidad Autónoma del Estado de Morelos •  AEO-9146-2022 •  0000-0002-2465-0898 •  131028

**Classificazione:**

**DOI:** <https://doi.org/10.35429/P.2025.1.8.19>

Area: Biotecnologia e agricoltura

Campo: Scienze agrarie

Disciplina: Agronomia

Sottodisciplina: Sementi

### Punti chiave del manuale

La ricerca fornisce conoscenze rilevanti su come diverse strategie di fertilizzazione e ottimizzazione dei processi (chimica, biologica, batterica e plasma fisico) influenzano il contenuto relativo di clorofilla (CC) nelle piante di mais. Tra i contributi spicca la convalida dell'uso del plasma fisico come tecnologia emergente in grado di ottimizzare l'uso di fertilizzanti chimici, dimostrando che il trattamento T850P (plasma + 50% di fertilizzazione) può raggiungere fino al 90% della resa del trattamento chimico completo. Ciò apre la strada allo sviluppo di nuove tecnologie agricole basate su input ridotti e pratiche più sostenibili. Allo stesso modo, lo studio contribuisce al progresso metodologico nella valutazione fisiologica del mais in condizioni reali di campo attraverso campionamenti periodici e analisi statistiche robuste che consentono di confrontare l'efficienza dei trattamenti innovativi rispetto alle pratiche convenzionali. Per trasferire i risultati alla generazione di conoscenza universale, è fondamentale comprendere l'interazione tra i diversi tipi di fertilizzazione e la fisiologia vegetale, in particolare per quanto riguarda il contenuto di clorofilla come indicatore dello stato fotosintetico e dell'efficienza nutrizionale della coltura. È inoltre essenziale comprendere i processi di senescenza naturale e come i trattamenti possono modificare la velocità di deterioramento fogliare. Inoltre, devono essere presi in considerazione i principi della progettazione sperimentale (blocchi completi randomizzati, trattamenti multipli, campionamenti temporali) che consentono di ottenere risultati generalizzabili e comparabili tra gli studi. Infine, è necessario comprendere i vantaggi dell'uso di tecnologie emergenti come il plasma fisico, che contribuisce a integrare pratiche innovative in contesti più ampi di agricoltura sostenibile e gestione razionale delle risorse. La ricerca conclude che esiste un effetto differenziale significativo dei trattamenti di fertilizzazione sul contenuto relativo di clorofilla nelle piante di mais durante il ciclo valutato. Sebbene tutti i trattamenti abbiano mostrato una tendenza decrescente associata alla senescenza naturale, il trattamento T4100 (fertilizzazione chimica completa) ha mantenuto costantemente i valori più alti, confermando la sua efficacia fisiologica. Tuttavia, il trattamento T850P (plasma + 50% di fertilizzazione) si è distinto come alternativa efficiente, raggiungendo il 90% della resa del trattamento ottimale, ma con un minore utilizzo di input chimici. Ciò posiziona il T850P come un'opzione praticabile per sistemi agricoli più sostenibili, senza sacrificare in modo sostanziale la produttività fotosintetica della coltura.

**Area:** Advocacy e attenzione ai problemi nazionali

**Citazione:** Sosa-Galindo, Daniel, Castillo-Gutiérrez, Antonio, Fuentes-Albarrán, María del Carmen e Alarcón-Hernández, Fidel Benjamín. 2025. Contenuto di clorofilla nelle piante di mais ottenute da semi trattati con plasma ad aria a bassa pressione. 8-19. PIREQA.

\* ✉ [\[honorato@uaem.mx\]](mailto:honorato@uaem.mx)

**URL dello scaffale del manuale:** <https://www.pireqa.org/proceedings.php>



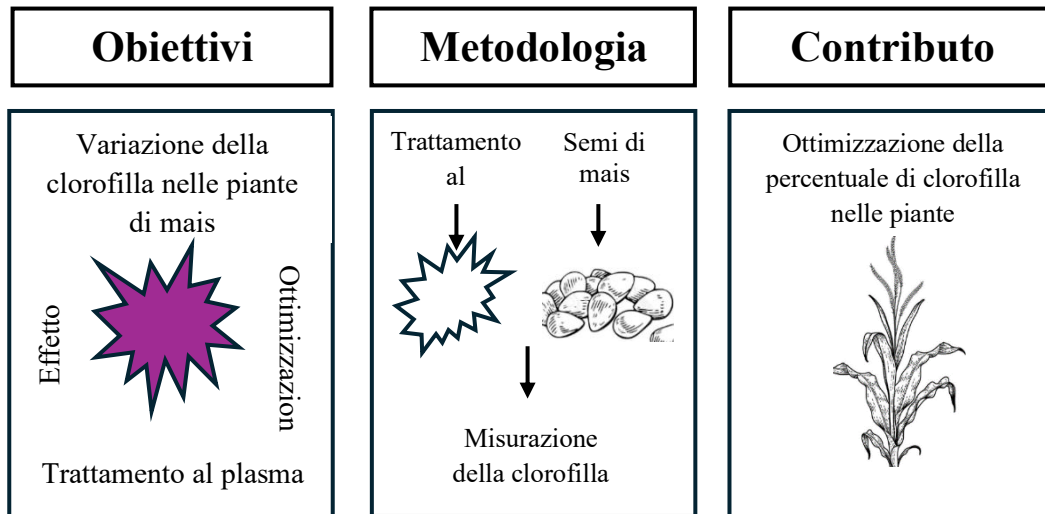
ISBN 978-607-8948-70-3 /©2009 Autore/i. Pubblicato da PIREQA-México, S.C. per la sua Holding Mexico per conto dell'Proceeding PIINI. Questo è un libro ad accesso libero con licenza CC BY-NC-ND [<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>]

Revisione tra pari sotto la responsabilità del Comitato Scientifico MARVID®- nel contributo al processo di revisione tra pari in ambito scientifico, tecnologico e dell'innovazione attraverso la formazione delle risorse umane per la continuità nell'analisi critica della ricerca internazionale.



## Sommario

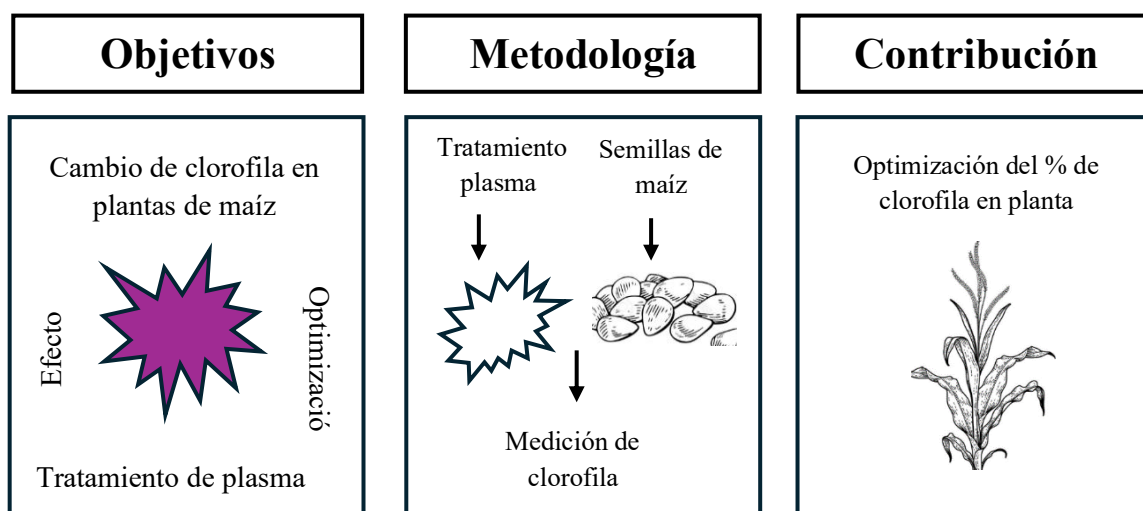
Il contenuto relativo di clorofilla [CC] è stato determinato in piante di mais ottenute da semi trattati con fertilizzazione chimica [diverse dosi], fertilizzazione biologica [vermicompost], ceppi batterici Mor4.1 e RM19 [stimolatori della crescita delle piante] e plasma fisico. L'esperimento è stato condotto in condizioni di campo, utilizzando semi di mais della varietà VUM [Variedad Universidad de Morelos]. L'unità sperimentale era costituita da quattro file lunghe cinque metri, con nove trattamenti in quattro blocchi in un disegno sperimentale a blocchi casuali completi. Sono stati effettuati quattro campionamenti ogni nove giorni. I valori ottenuti sono stati sottoposti ad analisi statistica, che ha mostrato che il trattamento T850P [plasma + 50% di fertilizzazione] ha presentato un rendimento medio-alto, significativamente migliore rispetto al controllo senza fertilizzazione [T1] e vicino al trattamento ottimale [T4100], con una resa equivalente al 90% del contenuto di clorofilla di T4100.



### Semi di mais, plasma, clorofilla

## Resumen

Se determinó el Contenido Relativo de Clorofila [CC] en plantas de maíz obtenidas de semillas tratadas mediante fertilización química [diferentes dosis], fertilización biológica [vermicomposta], cepas bacterianas Mor4.1 y RM19 [potenciadoras del crecimiento vegetal], así como de plasma físico de aire. El experimento se estableció en condiciones de campo considerando semillas de maíz de la variedad VUM [Variedad Universidad de Morelos]. La unidad experimental fue de cuatro surcos de cinco metros de largo, con nueve tratamientos en cuatro bloques en un diseño experimental de bloques completos al azar. Se realizaron cuatro muestreos los cuales se realizaron cada nueve días. Los valores obtenidos se sometieron a un análisis estadístico obteniéndose que el tratamiento T850P [plasma + 50 % de fertilización] presentó un comportamiento intermedio-alto, significativamente mejor que el testigo sin fertilización [T1], y cercano al tratamiento óptimo [T4100], con un rendimiento equivalente al 90 % del contenido de clorofila de T4100.



### Semillas de maíz, plasma, clorofila

## Introduzione

Il mais [*Zea mays L.*] è una delle colture più importanti al mondo, sia per il suo ruolo nella sicurezza alimentare che per il suo valore economico e il suo utilizzo nell'industria alimentare e agroindustriale. La sua resa e qualità dipendono da molteplici fattori, tra cui la genetica delle piante, le condizioni ambientali, la gestione agronomica e i fattori fisiologici che determinano l'efficienza fotosintetica [Lai et al., 2023; Brewer et al., 2022]. Tra i fattori fisiologici, il contenuto di clorofilla è riconosciuto come un indicatore cruciale dello stato nutrizionale, dell'efficienza fotosintetica e della capacità della pianta di adattarsi a condizioni di stress abiotico, come la siccità o l'eccesso di acqua [Sun et al., 2021; Yasin et al., 2024; Li et al., 2024]. Pertanto, la comprensione dei meccanismi che influenzano il contenuto di clorofilla e, di conseguenza, la produttività del mais costituisce una sfida centrale nella ricerca agronomica contemporanea.

Il contenuto di clorofilla non solo riflette l'attività fotosintetica della pianta, ma è anche associato all'assorbimento e all'utilizzo dell'azoto, alla sintesi della biomassa e all'efficienza dell'uso delle risorse idriche e luminose [Chen et al., 2025; Lai et al., 2023]. Diversi studi hanno dimostrato che la stima del contenuto di clorofilla mediante metodi spettrali, telerilevamento e sensori iperspettrali consente un monitoraggio altamente accurato dello stato fisiologico delle colture, facilitando l'adozione di strategie di gestione agricola basate sui dati [Li et al., 2023; Chen et al., 2025]. Nonostante i progressi tecnologici, la base genetica del contenuto di clorofilla nel mais rimane in parte sconosciuta. Recenti studi hanno identificato potenziali geni correlati alla biosintesi della clorofilla e alla sua regolazione in diversi tessuti fogliari, dimostrando il potenziale di miglioramento di questo tratto attraverso la selezione genetica [Liu et al., 2024].

Lo stress abiotico, in particolare la siccità e l'alternanza improvvisa di siccità e alluvioni, rappresenta un'ulteriore sfida per l'efficienza fotosintetica del mais. La siccità provoca una significativa riduzione della biomassa, della conduttanza stomatica, del tasso di assimilazione di CO<sub>2</sub> e del contenuto di clorofilla, influenzando direttamente la resa e la qualità dei chicchi [Abu et al., 2024; Yasin et al., 2024]. Strategie come l'applicazione di biostimolanti, tra cui acidi umici e fitormoni come gli strigolattoni, hanno dimostrato di mitigare gli effetti della siccità, aumentando le concentrazioni di pigmenti fotosintetici, l'efficienza nell'uso dell'acqua e l'attività antiossidante negli ibridi di mais, dimostrando l'importanza degli interventi fisiologici per mantenere la produttività in condizioni avverse [Luqman et al., 2023; Abu et al., 2024].

Inoltre, il trattamento di semi e piantine con plasma non termico si è affermato come una metodologia innovativa e sostenibile per migliorare la germinazione, la crescita iniziale e la fisiologia del mais. La generazione di plasma ad arco a bassa pressione e/o atmosferico consente la modifica della superficie dei semi, che altera l'assorbimento di acqua e sostanze nutritive e modula la concentrazione di ormoni vegetali come auxine, citochinine e acido abscissico, con effetti diretti sulla lunghezza delle radici e dei germogli e sulla biomassa iniziale [Šerá et al., 2021].

Inoltre, l'acqua attivata al plasma [PAW], ottenuta introducendo plasma non termico in acqua deionizzata, contiene specie reattive di ossigeno e azoto che facilitano le reazioni chimiche intracellulari e promuovono la germinazione e la crescita delle piantine, aumentando il contenuto di clorofilla e l'attività antiossidante, riducendo al contempo lo stress ossidativo, come dimostrato dalla diminuzione del malondialdeide [Wang et al., 2023; Škarpa et al., 2020]. Questi risultati sottolineano il potenziale del plasma come strategia fisica per migliorare la qualità fisiologica del mais e la sua resistenza ai fattori di stress.

È importante notare che l'influenza dei trattamenti al plasma sulla clorofilla e sulla fisiologia delle piante dipende da parametri quali la durata del trattamento, la tensione applicata e la frequenza di applicazione del PAW [Šerá et al., 2021; Wang et al., 2023]. Ad esempio, trattamenti brevi possono ridurre gli ormoni dello stress e promuovere la crescita iniziale, mentre trattamenti più lunghi tendono ad aumentare alcuni composti di difesa, modulando la fisiologia delle piante in modi complessi. Questi effetti dimostrano che l'ottimizzazione dei parametri di trattamento è essenziale per ottenere benefici costanti e riproducibili nella produzione vegetale, in particolare nel mais, dove la clorofilla è un marcatore fisiologico chiave. Il contenuto di clorofilla è influenzato anche dalla densità di impianto e dalla distanza tra le file, nonché dalla disponibilità di azoto, che influisce direttamente sul tasso di fotosintesi, sulla senescenza fogliare e sull'efficienza luminosa della chioma [Zhao et al., 2025; Lai et al., 2023].

La combinazione appropriata di densità e spaziatura può massimizzare la fotosintesi netta delle foglie, ritardare la senescenza, aumentare l'attività degli enzimi antiossidanti e ridurre lo stress ossidativo, contribuendo così a una maggiore resa dei cereali. Questi risultati rafforzano la necessità di integrare strategie agronomiche e fisiche, come l'uso del plasma, con adeguamenti nella progettazione delle colture per ottimizzare la produttività e la salute fisiologica del mais.

In sintesi, la ricerca sull'uso del plasma ad aria a bassa pressione sui semi di mais si inserisce in un contesto più ampio di ottimizzazione della produttività agricola attraverso interventi sostenibili e tecnologie di precisione. Prove sempre più numerose dimostrano che questo approccio può migliorare la germinazione, lo sviluppo iniziale delle piantine e il contenuto di clorofilla, oltre a modulare la fisiologia ormonale e antiossidante delle piante [Škarpa et al., 2020; Šerá et al., 2021; Wang et al., 2023]. La rilevanza di questi interventi è accentuata dalle sfide ambientali contemporanee, come lo stress idrico e la variabilità climatica, che influenzano direttamente la crescita del mais e l'efficienza fotosintetica [Yasin et al., 2024; Li et al., 2024]. Da questo punto di vista, il presente studio, incentrato sulla valutazione del contenuto di clorofilla nelle piante di mais ottenute da semi trattati con plasma ad aria a bassa pressione, contribuisce in modo significativo alla comprensione degli effetti fisiologici e biochimici delle tecnologie emergenti. Fornisce informazioni preziose per lo sviluppo di pratiche agricole sostenibili e altamente efficienti.

## Metodologia

### Descrizione dell'esperimento

L'esperimento è stato condotto in condizioni di campo [semina sotto pioggia, anno 2025, nel campo sperimentale della Scuola di Studi Superiori Xalostoc dell'Università Autonoma dello Stato di Morelos]. Sono stati utilizzati semi di mais della varietà VUM [Varietà dell'Università di Morelos]. Questa varietà a impollinazione libera è stata generata mediante selezione ricorrente da una popolazione di mais autoctono dello Stato di Morelos, in Messico.

L'unità sperimentale era composta da quattro file, lunghe cinque metri, con nove trattamenti in quattro blocchi in un disegno a blocchi completi randomizzati.

I trattamenti consistevano in fertilizzazione chimica [dosaggi diversi], fertilizzazione biologica [vermicompost], ceppi batterici Mor4.1 e RM19 [entrambi stimolatori della crescita delle piante] e plasma fisico ad aria. La composizione dei trattamenti è descritta nella tabella 1.

### Scatola 1

#### Tabella 1

Descrizione dei trattamenti utilizzati in questa ricerca.

Trattamento	Descrizione
T1	Fertilizzazione chimica [0%], fertilizzazione biologica [0%]
T225	Fertilizzazione chimica [25%]
T350	Fertilizzazione chimica [50%]
T4100	Fertilizzazione chimica [100%]
T5VMor	Mor4.1 + vermicompost
T6V25Mor	Mor4.1 + Concimazione chimica [25%] + vermicompost
T7V50Mor	Mor4.1 + Concimazione chimica [50%] + vermicompost
T850P	Plasma + Concimazione chimica [50%]
T9V50RM	RM19 + Concimazione chimica [50%] + vermicompost

Fonte: Elaborazione propria

### Plasma d'aria

Seicentostantadue semi di mais sono stati trattati con plasma ad aria a bassa pressione [2,00 Torr, vacuometro digitale: CPS, pompa a vuoto: LABCONCO]. Il trattamento al plasma è stato generato utilizzando una fonte ad alta tensione [SPELLMAN SL600] con impostazioni di tensione e corrente [2000 V, 15 mA]. Il tempo di esposizione è stato di 6,0 secondi. I semi sono stati collocati in una camera a vuoto dove è stato generato il plasma e trattati come mostrato nella Figura 1.

## Scatola 2



- ← Luce caratteristica di un plasma d'aria a bassa pressione.
- ← Elettrodi generatori di plasma
- ← Semi di mais sottoposti a trattamento al plasma

**Figura 1**

Semi di mais sottoposti a trattamento con plasma d'aria a bassa pressione. Si osserva l'emissione di fotoni a lunghezze d'onda caratteristiche del plasma d'aria [colore rosa-viola].

*Fonte: elaborazione propria*

### Misurazione della variabile di interesse

Il contenuto relativo di clorofilla [CC] è stato misurato utilizzando il dispositivo elettronico SPAD Chlorophyll Meter SPAD-502. In ciascuna unità sperimentale sono state selezionate e contrassegnate in modo casuale 10 piante. È stata selezionata ed etichettata una foglia dalla sezione centrale di ciascuna pianta. Lo scopo della marcatura delle piante e delle foglie era quello di misurare il contenuto relativo di clorofilla nelle stesse piante e nella stessa sezione fogliare durante le quattro sessioni di campionamento. Il campionamento è stato effettuato ogni nove giorni, a partire dal 57° giorno di crescita delle piante dopo la semina.

Le medie sono state ottenute dai dieci valori CC per unità sperimentale e sottoposte ad analisi statistica.

### Risultati e discussione

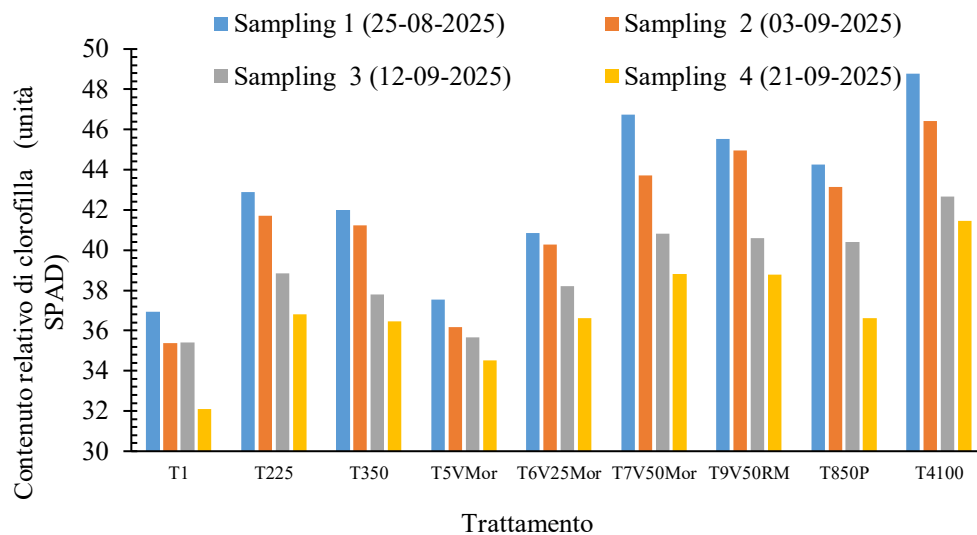
I risultati della variazione del contenuto relativo di clorofilla delle piante di mais sono presentati in funzione di ciascuno dei trattamenti definiti, nonché nel tempo.

La figura 2 mostra i risultati delle quattro misurazioni della clorofilla per ciascuno dei trattamenti. Tutti i trattamenti mostrano una tendenza al ribasso del valore relativo del contenuto di clorofilla, indicando una riduzione della concentrazione dei pigmenti fogliari durante tutto il periodo di campionamento.

La rilevanza di questi dati e di questo comportamento risiede nel fatto che la quantità di clorofilla indica direttamente la capacità fotosintetica della pianta e, quindi, la sua salute e il suo potenziale produttivo [Qian et al., 2021; Zhou et al., 2023; Qi et al., 2025].

Una maggiore concentrazione di clorofilla è correlata positivamente con una maggiore efficienza nella cattura dell'energia luminosa e nell'assimilazione dell'anidride carbonica [Yu et al., 2024; Luo et al., 2019].

### Scatola 3



**Figura 2**

Variazione nel tempo del contenuto relativo di clorofilla nelle piante di mais in ciascuno dei trattamenti definiti.

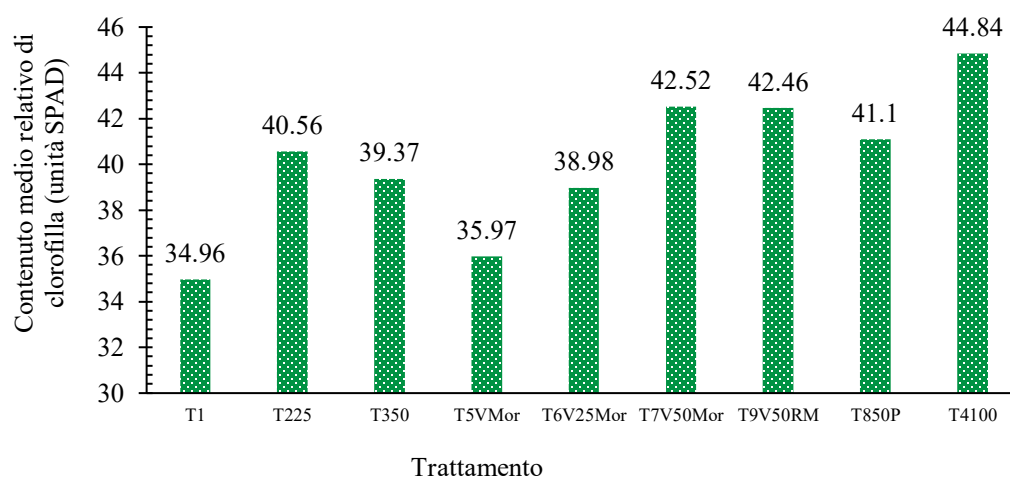
Fonte: elaborazione propria

In generale, è stato osservato un calo progressivo e costante del contenuto di clorofilla per tutti i trattamenti dal primo campionamento [25 agosto] all'ultimo [21 settembre]. Questa tendenza al ribasso è indicativa del naturale processo di senescenza fogliare, che rappresenta una diminuzione dell'efficienza fisiologica e un potenziale impatto sulla resa finale del raccolto [Yang et al., 2025; Lei et al., 2023; Antonietta et al., 2024].

La figura 3 presenta i valori medi relativi del contenuto di clorofilla per ciascuno dei trattamenti [quattro misurazioni effettuate] durante tutto il periodo di studio. Questi dati forniscono una chiara misura dell'efficacia sostenuta di ciascun trattamento sull'attività fotosintetica della coltura di mais.

I risultati mostrano una chiara differenziazione nella risposta fisiologica delle piante. Il trattamento T4100 ha ottenuto il valore più alto, registrando il contenuto medio complessivo di clorofilla più elevato [44,84]. Questo valore indica la capacità superiore di questo trattamento di promuovere e mantenere l'integrità del contenuto relativo di clorofilla nel tempo.

### Scatola 4



**Figura 3**

Valori medi del contenuto relativo di clorofilla delle piante di mais in base a ciascuno dei trattamenti considerati.

Fonte: elaborazione propria

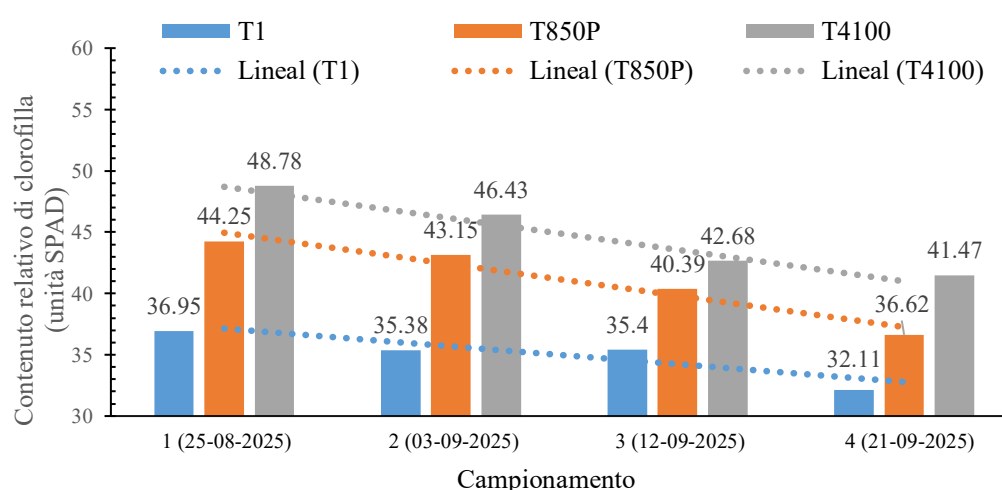
Immediatamente al di sotto di questo valore si trovano i trattamenti T7V50Mor [42,52] e T9V50RM [42,46], che hanno anch'essi mostrato una resa notevolmente elevata, collocandosi in un gruppo di trattamenti con maggiore efficacia. La maggior parte dei trattamenti rimanenti si è concentrata in un intervallo intermedio, intorno a 40,00, suggerendo un effetto moderato ma positivo. Al contrario, il trattamento T1 si è chiaramente posizionato all'ultimo posto, con una media di 34,96.

Questa disparità sottolinea che le formulazioni o le dosi applicate hanno un effetto eterogeneo sulla ritenzione della clorofilla e sulla mitigazione della senescenza, con T4100 che offre il beneficio agronomico più significativo e duraturo nell'ottimizzazione della salute e dell'efficienza fotosintetica delle piante di mais.

### Analisi del trattamento al plasma [T850P]

Considerando i risultati ottenuti per i trattamenti T1 [Fertilizzazione chimica [0%], Fertilizzazione biologica [0%]], T850P [Plasma + Fertilizzazione chimica [50%]] e T4100 [Fertilizzazione chimica [100%]], di cui [T1 e T4100] sono i valori estremi dei risultati misurati del contenuto relativo di clorofilla, e confrontandoli con T850P, si può osservare quanto segue nella Figura 4.

#### Scatola 5



**Figura 4**

Valori misurati del contenuto relativo di clorofilla delle piante di mais nel tempo per i trattamenti: T1, T850P e T4100.

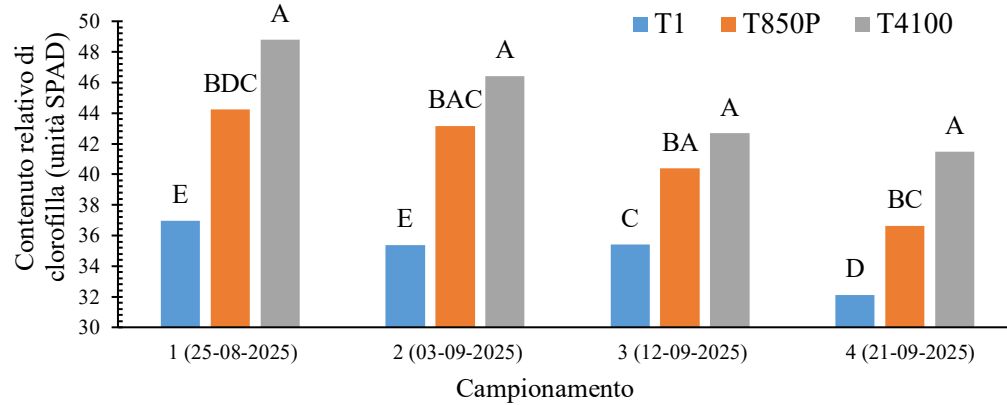
*Fonte: elaborazione propria*

Analizzando il trend discendente della produzione di clorofilla per i trattamenti applicati ai semi di mais [T1, T850P e T4100], si osserva che tutti mostrano un calo progressivo nel tempo. Tuttavia, analizzando la pendenza di questo calo, si nota una leggera differenza tra i trattamenti. Il trattamento T1 mostra una curva discendente più dolce, con una riduzione di 4,84 unità [da 36,95 a 32,11], indicando un calo relativamente lento della clorofilla. D'altra parte, i trattamenti T850P e T4100, pur mostrando un declino più pronunciato [rispettivamente 7,63 e 7,31 unità], mantengono costantemente valori di clorofilla più elevati in tutte le date valutate. Questo comportamento suggerisce che, sebbene il tasso di declino sia leggermente più elevato in questi due trattamenti, la loro capacità di mantenere livelli elevati di clorofilla nel tempo rappresenta un vantaggio agronomico significativo. Un comportamento simile [diminuzione del valore di clorofilla nelle piante e modifica della germinazione] è stato riportato e discusso in altre ricerche che trattano il plasma [Kamseu et al., 2025; Judée, 2020].

In particolare, T4100 si distingue per aver raggiunto il valore iniziale più alto [48,78] e aver mantenuto la concentrazione finale più alta [41,47], seguito da T850P, riflettendo la sua maggiore efficacia nel promuovere e mantenere la produzione di clorofilla nelle colture di mais.

Nello specifico, i risultati sopra riportati sono statisticamente significativi, come mostrato nella Figura 5. Durante i quattro campionamenti del contenuto di clorofilla nelle piante di mais, sono state osservate differenze significative tra i trattamenti T1, T850P e T4100, secondo i gruppi di differenza minima significativa [LSD].

## Scatola 6



**Figura 5**

Viene mostrato il confronto dei trattamenti in base ai gruppi LSD per il contenuto di clorofilla nelle piante di mais nelle quattro date di campionamento.

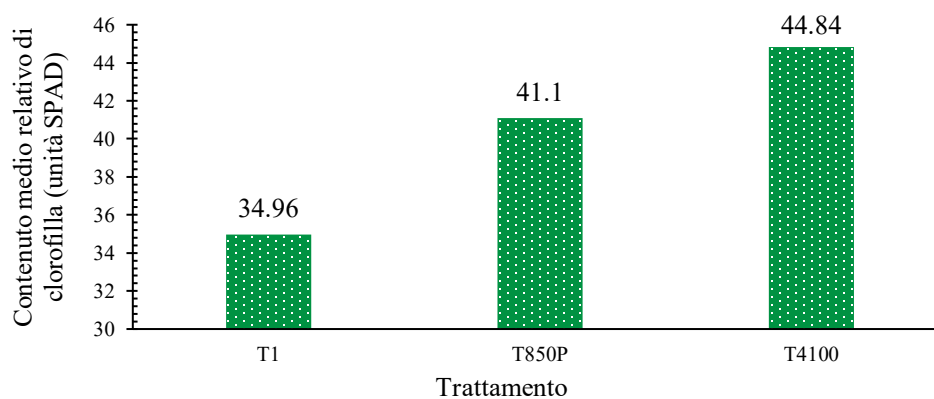
*Fonte: elaborazione propria*

In tutti i campionamenti, T4100 è rimasto costantemente nel gruppo più alto [A], indicando una superiorità statistica sostenuta. T850P si è posizionato nei gruppi intermedi, mostrando risultati migliori rispetto a T1 in tutte le date di campionamento, anche se non sempre con differenze significative rispetto a T4100. D'altra parte, il T1 ha occupato costantemente i gruppi più bassi, risultando significativamente inferiore agli altri due trattamenti in tutti i campionamenti. Questi risultati confermano che il T4100 è stato il trattamento più efficace, seguito dal T850P, mentre il T1 ha mostrato le prestazioni più basse in termini di contenuto di clorofilla. Altri studi hanno dimostrato un'influenza sulla fisiologia del mais a seconda della durata del trattamento al plasma sui semi. Šerá et al. [2021], hanno utilizzato tempi di trattamento diversi con plasma ad arco scorrevole, riscontrando che, a 180 s, si verificava una diminuzione degli ormoni dello stress e delle citochinine attive; tuttavia, con tempi di trattamento più lunghi [300 s e 600 s], si verificava l'effetto opposto, con un aumento dei livelli di ormoni dello stress e citochinoni, favorendo la germinazione e la crescita delle piantine.

D'altra parte, Hossein et al. [2024] hanno studiato gli effetti dell'esposizione al plasma a scarica dielettrica a pressione atmosferica sull'amido di mais, utilizzando tempi di trattamento di 60, 120, 180 e 240 s. Hanno osservato che l'aumento del tempo di esposizione dei campioni trattati ha portato a miglioramenti significativi in varie caratteristiche fisico-chimiche, come l'assorbimento d'acqua, la stabilità al congelamento-scongelo e le proprietà reologiche e strutturali.

Analizzando i valori medi del contenuto relativo di clorofilla delle piante di mais [figura 6] corrispondenti a questi stessi trattamenti [T1 [controllo senza fertilizzazione], T850P [uso di plasma e fertilizzazione al 50%] e T4100 [fertilizzazione chimica completa]], si osserva una chiara tendenza al rialzo nella risposta fisiologica della coltura a seconda del tipo e dell'intensità del trattamento applicato.

## Scatola 7



**Figura 6**

Valori medi del contenuto relativo di clorofilla delle piante di mais in base a ciascuno dei trattamenti oggetto dello studio.

*Fonte: elaborazione propria*

Il trattamento T1 ha registrato il valore medio più basso [34,96], riflettendo una minore efficienza nella sintesi o conservazione della clorofilla in assenza di fertilizzazione. Al contrario, il trattamento T850P ha mostrato un notevole aumento del contenuto medio di clorofilla [41,10] rispetto al trattamento T1, suggerendo che l'applicazione combinata di plasma e fertilizzazione parziale migliora significativamente lo stato nutrizionale e fotosintetico della pianta. Infine, T4100 ha raggiunto il valore più alto [44,84], confermando che la fertilizzazione chimica completa genera una risposta fisiologica superiore. Questi risultati dimostrano l'effetto positivo dei trattamenti tecnologici sul contenuto di clorofilla, con T4100 che risulta il più efficace, seguito da T850P, rispetto al trattamento senza intervento [T1].

Dal punto di vista dell'efficienza e dei costi, il trattamento T850P, che combina l'applicazione di plasma con il 50% di fertilizzazione chimica, dimostra un'efficienza medio-alta in termini di contenuto di clorofilla. È significativamente superiore al controllo senza fertilizzazione [T1] e inferiore al trattamento con fertilizzazione chimica completa [T4100].

Secondo i dati analizzati, il T850P ha raggiunto un contenuto medio di clorofilla di 41,1, classificandosi nei gruppi LSD B, D, C e A. Al contrario, il T4100 ha ottenuto il valore più alto [44,84, gruppo A] e il T1 il più basso [34,96, gruppi E, C e D]. Le differenze tra T850P ed entrambi gli estremi sono statisticamente significative, in quanto superano il valore minimo significativo [LSD]. In termini di efficienza relativa, T850P raggiunge circa il 90,7% del contenuto di clorofilla ottenuto da T4100 e supera il controllo T1 del 19,7%.

Questi risultati suggeriscono che, sebbene T850P non corrisponda al trattamento ottimale, la sua resa di clorofilla è elevata considerando che utilizza solo la metà della fertilizzazione chimica, il che implica una potenziale riduzione dei costi e dell'impatto ambientale.

Poiché il contenuto di clorofilla è direttamente associato alla capacità fotosintetica della pianta, e quindi alla produzione di biomassa e alla formazione di strutture riproduttive, si prevede che il T850P consenta una produzione di semi vicina a quella del trattamento T4100. Inoltre, la combinazione di plasma con una fertilizzazione inferiore potrebbe indurre risposte fisiologiche benefiche, come una maggiore efficienza nell'assorbimento dei nutrienti o l'attivazione di percorsi metabolici chiave. Pertanto, il T850P rappresenta un'alternativa praticabile e più sostenibile, con un rapporto costi-benefici favorevole, soprattutto in contesti agricoli che cercano di ridurre l'uso di input chimici senza compromettere in modo significativo la resa finale.

## **Conclusione**

In termini di contenuto relativo di clorofilla nelle piante di mais in quattro periodi di campionamento, è evidente un effetto differenziale dei trattamenti applicati sull'efficienza fisiologica della coltura. In tutti i trattamenti è stata osservata una tendenza alla diminuzione della concentrazione di clorofilla, indicativa del naturale processo di senescenza fogliare. Il trattamento T4100 [fertilizzazione chimica completa] ha mantenuto i valori più elevati in tutti i periodi di campionamento. Si è posizionato costantemente nel gruppo statisticamente superiore, confermando la sua elevata efficacia nel promuovere e sostenere l'attività fotosintetica. D'altra parte, il trattamento T850P [plasma + 50% di fertilizzazione] ha dimostrato prestazioni medio-alte, significativamente migliori rispetto al controllo senza fertilizzazione [T1] e quasi pari al trattamento ottimale [T4100], con una resa equivalente al 90% del contenuto di clorofilla del T4100. Tale efficienza relativa, combinata con un minore utilizzo di input chimici, posiziona il trattamento T850P come un'alternativa promettente per i sistemi agricoli sostenibili.

## **Dichiarazioni**

### **Conflitto di interessi**

Gli autori dichiarano di non avere alcun conflitto di interessi. Non hanno interessi finanziari concorrenti noti né relazioni personali che potrebbero aver influenzato l'articolo riportato in questa ricerca.

### **Contributo degli autori**

Contributo di ciascun ricercatore nei punti sviluppati per questo lavoro:

*Sosa-Galindo, Daniel*: Ha supportato l'applicazione dei metodi e delle tecniche di ricerca e la revisione dell'articolo.

*Castillo-Gutiérrez, Antonio*: Ha ideato il progetto, i metodi e le tecniche di ricerca applicate. Ha supportato lo sviluppo della sperimentazione e ha eseguito l'analisi dei dati.

*Fuentes-Albarrán, María del Carmen*: Ha contribuito alla stesura del documento e all'analisi dei risultati e dei dati raccolti.

*Alarcón-Hernández, Fidel Benjamín*: Ha diretto il progetto di ricerca riportato nell'articolo e ha eseguito l'analisi e l'interpretazione dei risultati. Ha anche scritto l'articolo finale.

### **Disponibilità di dati e materiali**

Tutti i dati utilizzati a sostegno dei risultati di questo studio sono inclusi nell'articolo.

### **Finanziamento**

Questo lavoro è stato finanziato dal PRODEP [DSA/103.5/14/10703].

### **Ringraziamenti**

Gli autori sono grati alla Escuela de Estudios Superiores de Xalostoc dell'Universidad Autónoma del Estado de Morelos per le strutture messe a disposizione.  
o carry out this research.

### **Abbreviations**

CC	Contenuto relativo di clorofilla
LSD	Differenza minima significativa
VUM	Varietà Universidad de Morelos

### **Riferimenti**

#### **Antecedenti**

Abu-Ria, M. E., Elghareeb, E. M., Shukry, W. M., Abo-Hamed, S. A., & Ibraheem, F. [2024]. [Mitigation of drought stress in maize and sorghum by humic acid: differential growth and physiological responses.](#) *BMC Plant Biology*, 24[1], 514.

Brewer, K., Clulow, A., Sibanda, M., Gokool, S., Naiken, V., & Mabhaudhi, T. [2022]. [Predicting the chlorophyll content of maize over phenotyping as a proxy for crop health in smallholder farming systems.](#) *Remote Sensing*, 14[3], 518.

Chen, R., Ren, L., Yang, G., Cheng, Z., Zhao, D., Zhang, C., Feng, H., Hu, H., & Yang, H. [2025]. [Estimation of leaf chlorophyll content of maize from hyperspectral data using E2D COS feature selection, deep neural network, and transfer learning.](#) *Agriculture*, 15[10], 1072.

Lai, Z., Kou, H., Fan, J., Yang, R., Xu, X., Zhang, F., & Li, S. [2023]. [Optimized planting density and nitrogen rate increased grain yield and water nitrogen use efficiency of two maize cultivars under mulched drip fertigation by improving population photosynthesis and grain filling characteristics.](#) *Water*, 15[1], 163.

Li, G., Long, H., Zhang, R., Xu, A., & Niu, L. [2024]. [Photosynthetic traits, water use and the yield of maize are influenced by soil water stability.](#) *Agronomy*, 14[1], 16.

Li, W., Pan, K., Liu, W., Xiao, W., Ni, S., & Shi, P. [2023]. [Monitoring Maize Canopy Chlorophyll Content throughout the Growth Stages Based on UAV MS and RGB Feature Fusion.](#) *Remote Sensing*, 15[1], 169.

- Liu, P., Xiang, C., Liu, K., Yu, H., Liao, Z., Shen, Y., Liu, L., & Ma, L. [2024]. Genome-wide association study reveals genetic basis and candidate genes for chlorophyll content of leaves in maize [*Zea mays* L.]. *PeerJ*, 12, e18278.
- Luqman, M., Shahbaz, M., Maqsood, M. F., Farhat, F., Zulfiqar, U., Siddiqui, M. H., Masood, A., Aqeel, M., & Haider, F. U. [2023]. Effect of strigolactone on growth, photosynthetic efficiency, antioxidant activity, and osmolytes accumulation in different maize [*Zea mays* L.] hybrids grown under drought stress. *Plant Signaling & Behavior*, 18[1], 2262795.
- Šerá, B., Vanková, R., Roháček, K., & Šerý, M. [2021]. Gliding Arc Plasma Treatment of Maize [*Zea mays* L.] Grains Promotes Seed Germination and Early Growth, Affecting Hormone Pools, but Not Significantly Photosynthetic Parameters. *Agronomy*, 11[10], 2066.
- Škarpa, P., Klofáč, D., Krčma, F., Šimečková, J., & Kozáková, Z. [2020]. Effect of plasma activated water foliar application on selected growth parameters of maize [*Zea mays* L.]. *Water*, 12[12], 3545.
- Sun, J., Yang, L., Yang, X., Wei, J., Li, L., Guo, E., & Kong, Y. [2021]. Using spectral reflectance to estimate the leaf chlorophyll content of maize inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi under water stress. *Frontiers in Plant Science*, 12, 646173.
- Wang, Z., Ren, T., Zhou, M., Chen, S., Fu, D., & Qin, S. [2023]. Experimental Study on the Effect of Low-Temperature Air Plasma Activated Water on Seed Germination and Seedling Growth of Maize. *International Journal of Applied Agricultural Sciences*, 9[6], 333–340.
- Yasin, S., Zavala-García, F., Niño-Medina, G., Rodríguez-Salinas, P. A., Gutiérrez-Diez, A., Sinagawa-García, S. R., & Lugo-Cruz, E. [2024]. Morphological and physiological response of maize [*Zea mays* L.] to drought stress during reproductive stage. *Agronomy*, 14[8], 1718.
- Zhao, L., Duan, X., Zhang, X., Zhang, X., Song, L., Chen, P., Liang, M., Zhang, C., & Wang, C. [2025]. Planting Strategy Optimization Can Increase Maize Yield by Delaying Leaf Senescence and Improving Photosynthetic Capacity. *Agronomy*, 15[5], 1099.
- Discussione**
- Antonietta, M., Martinez, D., & Guiamet, J. J. [2024]. Delayed senescence and crop performance under stress: always a functional couple? *Journal of Experimental Botany*, 75[14], 4244–4257.
- Judée, F., & Dufour, T. [2020]. Seed-packed dielectric barrier device for plasma agriculture: Understanding its electrical properties through an equivalent electrical model. *Journal of Applied Physics*, 128[4].
- Kamseu-Mogo, J.-P., Soulier, M., Kamgang-Youbi, G., Mafouasson, H. N. A., & Dufour, T. [2024]. Advancements in maize cultivation: Synergistic effects of dry atmospheric plasma combined with plasma-activated water. *Journal of Physics D: Applied Physics*.
- Lei, P., Yu, F., & Liu, X. [2023]. Recent advances in cellular degradation and nuclear control of leaf senescence. *Journal of Experimental Botany*, 74[18], 5472–5486.
- Luo, X., Croft, H., Chen, J. M., He, L., & Keenan, T. F. [2019]. Improved estimates of global terrestrial photosynthesis using information on leaf chlorophyll content. *Global Change Biology*, 25[7], 2499–2514.
- Qi, Z., Xu, C., Tang, R., Zhang, Q., Sun, W., Guan, C., Wang, Y., Zhang, M., Ding, J., Zhang, Y., Yang, H., Yang, Y., Liu, X., Zhang, Z., & Ling, F. [2025]. Response of photosynthesis and chlorophyll fluorescence to nitrogen changes in rice with different nitrogen use efficiencies. *Plants*, 14[10], 1465.
- Qian, X., Liu, L., Croft, H., & Chen, J. [2021]. Relationship between leaf maximum carboxylation rate and chlorophyll content preserved across 13 species. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126[2], e2020JG006076.

Yang, C., Du, S., Shi, Y., Zhang, D., Yue, J., Li, X., Jin, H., Fang, B., Wei, F., Zhang, Z., & Yan, G. [2025]. [Differential sensitivity of photosynthetic electron transport to dark-induced senescence in wheat flag leaves.](#) *BMC Plant Biology*, 25, Article 650.

Yu, L., Luo, X., Croft, H., Rogers, C. A., & Chen, J. M. [2024]. [Seasonal variation in the relationship between leaf chlorophyll content and photosynthetic capacity.](#) *Plant, Cell & Environment*, 47[10], 3953-3965.

Zhou, Z., Struik, P. C., Gu, J., van der Putten, P. E. L., Wang, Z., Yin, X., & Yang, J. [2023]. [Enhancing leaf photosynthesis from altered chlorophyll content requires optimal partitioning of nitrogen.](#) *Crop and Environment*, 2[1], 24-36.

### **Assistenza**

Hosseinpour, A., Fazaeli, M., Hedayati, S., Hosseini, S. M. H., & Niakousari, M. [2024]. [Effect of cold plasma on the physicochemical characteristics of granular cold water swelling maize starch.](#) *Food Science and Technology*, 213, 117044.

Judée, F., & Dufour, T. [2020]. [Seed-packed dielectric barrier device for plasma agriculture: Understanding its electrical properties through an equivalent electrical model.](#) *Journal of Applied Physics*, 128[4].

Kamseu-Mogo, J.-P., Soulier, M., Kamgang-Youbi, G., Mafouasson, H. N. A., & Dufour, T. [2024]. [Advancements in maize cultivation: Synergistic effects of dry atmospheric plasma combined with plasma-activated water.](#) *Journal of Physics D: Applied Physics*.

Šerá, B., Vanková, R., Roháček, K., & Šerý, M. [2021]. [Gliding Arc Plasma Treatment of Maize \[Zea mays L.\] Grains Promotes Seed Germination and Early Growth, Affecting Hormone Pools, but Not Significantly Photosynthetic Parameters.](#) *Agronomy*, 11[10], 2066.