

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Agronomia Animali Alimenti
Risorse naturali e Ambiente

Corso di laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie Agrarie

**Impiego del compost tea nella coltivazione idroponica NFT:
valutazione della produttività e qualità della lattuga**

Relatore: Prof. Carlo Nicoletto

Correlatori: Dott.ssa Silvia Locatelli
Dott. Giordano Uberti

Laureanda: Elisa Lucchini
Matricola n. 2092282

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

Indice

RIASSUNTO	5
ABSTRACT	7
1.INTRODUZIONE	9
1.1 LA COLTIVAZIONE FUORI-SUOLO	9
1.1.1 LA COLTIVAZIONE FUORI-SUOLO IDROPONICA.....	9
1.1.2 I SISTEMI FUORI-SUOLO MAGGIORMENTE UTILIZZATI	11
1.2 FERTIRRIGAZIONE	14
1.3 IL PROCESSO DI COMPOSTAGGIO.....	15
1.4 IL COMPOST TEA (CT).....	16
1.3 COMPOSIZIONE DEL COMPOST TEA	17
1.4 VANTAGGI E APPLICAZIONI	20
2. SCOPO DEL LAVORO.....	27
3. MATERIALI E METODI	29
3.1 ESTRAZIONE DEL COMPOST TEA	29
3.2 AMBIENTE DI COLTIVAZIONE E DISEGNO SPERIMENTALE	31
3.3 CONDIZIONE MICROCLIMATICA	33
3. MISURAZIONE DEI PARAMETRI DELLE SOLUZIONI NUTRITIVE.....	33
3.5 MISURAZIONE DEI PARAMETRI FISILOGICI	34
3.6 RILIEVI FOTOGRAFICI.....	36
3.7 RILIEVO DISTRUTTIVO: BIOMASSA AEREA E RADICALE.....	36
3.8 ANALISI QUALITATIVE IN LABORATORIO	36
3.9 ANALISI STATISTICA	39
4. RISULTATI	41
4.1 ESTRAZIONE DEL COMPOST TEA	41
4.2 ANDAMENTO METEOROLOGICO.....	42
4.3 SOLUZIONE NUTRITIVA	43
4.4 INDICI VEGETATIVI	49
4.4.1 INDICE SPAD	49
4.4.2 DUALEX	50

4.5 CANOPY COVER	54
4.6 RILIEVI MORFO-PONDERALI.....	55
4.6.1 ACCRESCIMENTO	55
4.6.2 BIOMASSA AEREA	56
4.6.3 BIOMASSA RADICALE.....	57
4.6.4 SOSTANZA SECCA RADICI (S.S % RADICI)	59
4.6.5 DIAMETRI.....	60
4.7 CARATTERISTICHE QUALITATIVE	61
4.7.1 SOSTANZA SECCA	61
4.7.3 PH.....	62
4.7.4 CONDUCEBILITÀ ELETTRICA.....	63
4.7.5 SOLIDI SOLUBILI TOTALI	64
4.7.6 ACIDITÀ TITOLABILE	65
4.7.7 POLIFENOLI TOTALI	66
4.7.8 ANTIOSSIDANTI TOTALI	67
4.7.9 CLOROFILLE	68
5. DISCUSSIONE	73
6. CONCLUSIONI.....	79
BIBLIOGRAFIA.....	81
RINGRAZIAMENTI	86

Riassunto

L'agricoltura moderna si trova di fronte a sfide complesse legate alla sostenibilità e all'efficienza produttiva, richiedendo soluzioni innovative per migliorare la gestione delle risorse e la qualità delle colture. In questo contesto, l'uso di soluzioni nutritive alternative, come il compost tea, si presenta come una strategia promettente per ridurre l'impiego di concimi chimici e promuovere pratiche agricole più ecologiche.

Il presente studio si propone di valutare e confrontare l'efficacia di quattro sistemi di gestione della soluzione nutritiva applicate alla coltivazione di lattuga (*Lactuca sativa* var. gentile). Le soluzioni nutritive considerate sono state comparate a parità di conducibilità elettrica ed hanno previsto: i) un trattamento di controllo con macro- e microelementi somministrati tramite fertilizzanti minerali (CTR), ii) il compost tea derivante da materiale verde-umido e scarti vegetali della raccolta differenziata tal quale diluito con acqua (CTE), iii) il compost tea corretto con aggiunta di concimi minerali per compensare le carenze nutrizionali (CTC), e iv) il compost tea corretto e trattato con plasma freddo (CTCJ). L'esperimento è stato condotto in una serra tunnel tramite l'impiego di 12 sistemi fuorisuolo (NFT) indipendenti suddivisi in 3 blocchi. Ogni sistema comprendeva: 3 canalette contenenti 10 piante ciascuna e una vasca contenente la soluzione nutritiva, dotata di una pietra porosa collegata ad un arieggiatore. I rilievi effettuati durante il ciclo colturale hanno riguardato i parametri della soluzione nutritiva, i parametri fisiologici della pianta (indice SPAD, Dualex, Li-COR), l'accrescimento della coltura con rilievi fotografici e monitoraggio del peso. Infine, è stata individuata la biomassa aerea e radicale, la sostanza secca e determinati i principali aspetti qualitativi della coltura.

L'approccio con il compost tea ha mostrato effetti positivi sulla crescita e sulle prestazioni della lattuga, riducendo l'uso di concimi chimici tradizionali e promuovendo pratiche agricole più ecologiche. In particolare, il compost tea corretto (CTC), arricchito con nutrienti per compensare le carenze, si è dimostrato particolarmente interessante, fornendo una gestione ottimale della matrice di compost tea come soluzione nutritiva.

I risultati ottenuti evidenziano come il compost tea tal quale (CTE) mostri un chiaro stato di sofferenza nutrizionale, misurato tramite l'indice SPAD, con valori significativamente differenti rispetto agli altri trattamenti. In termini di biomassa commercializzabile, quindi di accrescimento e canopy cover, il CTE risulta significativamente inferiore, mentre i trattamenti CTC e CTCJ sono molto vicini al controllo. La biomassa aerea raggiunta dai trattamenti evidenzia valori molto simili per il controllo (CTR) con 364 grammi, il CTC con 338 grammi e il CTCJ con 308 grammi, mentre il CTE è notevolmente inferiore con 69 grammi.

In termini di stato nutrizionale delle piante, è noto che quando una pianta è in stress accumula antiossidanti e contiene meno acqua, con conseguente maggiore concentrazione di nutrienti. Questo è confermato dai dati: il CTE presenta un 8.02% di sostanza secca, mentre gli altri tre trattamenti mostrano valori intorno al 5%. Anche per quanto riguarda i solidi solubili, lo stato di sofferenza nutrizionale del CTE è evidente, con un quantitativo di solidi solubili di circa 3.84 °Brix, rispetto agli altri trattamenti che si attestano intorno a 1.70 °Brix.

Nonostante la sua eterogeneità, il compost tea che richiede un'attenta integrazione di nutrienti essenziali per soddisfare le esigenze specifiche delle piante, questa matrice si è rivelata estremamente promettente per l'uso agricolo. L'integrazione di questi nutrienti è fondamentale per garantire che la matrice eterogenea possa fornire un supporto nutrizionale completo e uniforme alle colture.

Questo metodo di riutilizzo dei rifiuti organici non solo offre una soluzione pratica per la gestione dei rifiuti urbani, ma rappresenta anche un significativo passo avanti verso la sostenibilità agricola. Utilizzando risorse rinnovabili e riducendo la dipendenza dai concimi chimici tradizionali, questo approccio promuove pratiche agricole più ecologiche e sostenibili, contribuendo a migliorare la gestione delle risorse e l'efficienza produttiva complessiva.

Abstract

Modern agriculture faces complex challenges related to sustainability and production efficiency, requiring innovative solutions to improve resource management and crop quality. In this context, the use of alternative nutrient solutions, such as compost tea, presents a promising strategy for reducing the use of chemical fertilizers and promoting more ecological farming practices.

This study aims to evaluate and compare the effectiveness of four nutrient solution management systems applied to the cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* var. *gentile*). The nutrient solutions considered were compared at equal electrical conductivity and included: i) a control treatment with macro- and microelements supplied through mineral fertilizers (CTR), ii) compost tea derived from green-wet material and vegetable waste from separate collection diluted with water (CTE), iii) compost tea corrected with the addition of mineral fertilizers to compensate for nutritional deficiencies (CTC), and iv) compost tea corrected and treated with cold plasma (CTCJ). The experiment was conducted in a tunnel greenhouse using 12 independent hydroponic systems (NFT) divided into 3 blocks. Each system included: 3 tubes containing 10 plants each and a tank containing the nutrient solution, equipped with a porous stone connected to an aerator. The surveys conducted during the cultivation cycle covered the parameters of the nutrient solution, physiological parameters of the plant (SPAD index, Dualex, Li-CORE), crop growth with photographic surveys, and weight monitoring. Finally, aerial and root biomass, dry matter, and the main qualitative aspects of the crop were determined.

The compost tea approach showed positive effects on the growth and performance of lettuce, reducing the use of traditional chemical fertilizers and promoting more ecological farming practices. In particular, the corrected compost tea (CTC), enriched with nutrients to compensate for deficiencies, proved particularly interesting, providing optimal management of the compost tea matrix as a nutrient solution.

The results show that the untreated compost tea (CTE) exhibited clear nutritional stress, measured by the SPAD index, with significantly different values compared to the other treatments. In terms of marketable biomass, growth, and canopy cover, the CTE was significantly lower, while the CTC and CTCJ treatments were very close to the control. The aerial biomass achieved by the treatments was very similar for the control (CTR) with 364.51 grams, CTC with 338.74 grams, and CTCJ with 308.06 grams, while the CTE was significantly lower with 69.94 grams.

In terms of plant nutritional status, it is known that when a plant is stressed, it accumulates antioxidants and contains less water, resulting in a higher concentration of nutrients. This is confirmed by the data: CTE has an 8.02% dry matter content, while the other three treatments show values

around 5%. Regarding soluble solids, the nutritional stress of CTE is evident, with a soluble solids content of about 3.84 °Brix, compared to the other treatments which are around 1.70 °Brix.

Despite its heterogeneity, compost tea, which requires careful integration of essential nutrients to meet the specific needs of plants, has proven extremely promising for agricultural use. Integrating these nutrients is crucial to ensure that the heterogeneous matrix can provide comprehensive and uniform nutritional support to crops. This method of reusing organic waste not only offers a practical solution for urban waste management but also represents a significant step forward in agricultural sustainability. By utilizing renewable resources and reducing dependence on traditional chemical fertilizers, this approach promotes more ecological and sustainable farming practices, contributing to improved resource management and overall production efficiency.

1.Introduzione

Durante gli ultimi decenni, la costante crescita della popolazione mondiale ha determinato un aumento della produzione alimentare. Dagli anni '60 al 2015, la produzione mondiale di cereali è cresciuta quattro volte, con un aumento minimo della superficie terrestre destinata a queste colture, mentre l'uso di agrofarmaci è aumentato di nove volte. I sistemi di coltivazione intensiva utilizzano costantemente sostanze chimiche di sintesi, ma ciò porta a effetti dannosi a breve e lungo termine sia per gli esseri umani che per l'ambiente (Pilla et al., 2023). Questo ha spinto l'agricoltura moderna a cercare alternative valide, sostenibili ed ecologiche, in grado di migliorare e mantenere nel tempo la qualità e la fertilità del suolo. A tale proposito, le quantità di bio-rifiuti prodotte ogni anno potrebbero, quindi, essere gestite in modo efficiente e funzionale (Pilla et al., 2023).

1.1 La coltivazione fuori-suolo

1.1.1 La coltivazione fuori-suolo idroponica

Il metodo di coltivazione fuori suolo rappresenta un approccio innovativo nell'ambito dell'agricoltura, in cui le piante vengono coltivate senza l'uso di terreno naturale. Questa tecnica offre numerosi vantaggi, tra cui un maggiore controllo delle condizioni ambientali, una migliore gestione delle risorse idriche e una riduzione del rischio di malattie del suolo.

Secondo Tognoni et al. (2005), le tecniche idroponiche per colture in serra consentono una maggiore efficienza nell'assorbimento dei nutrienti da parte delle piante, garantendo una crescita più rapida e uniforme. Inoltre, Pagniello (2009) ha evidenziato che la coltivazione fuori-suolo in serre mediterranee può contribuire a ridurre l'impatto ambientale dell'orticoltura, grazie alla minore necessità di utilizzare terreni agricoli e alla gestione più razionale delle risorse.

Enzo et al. (2001) hanno discusso dei principi tecnico-agronomici della fertirrigazione nel contesto della coltivazione fuori suolo, sottolineando l'importanza di una corretta gestione della nutrizione delle piante per massimizzare la produttività e la qualità del raccolto. Inoltre, Postma et al. (2003), hanno esaminato la microflora nei sistemi di coltivazione fuori suolo, evidenziando il ruolo chiave dei microorganismi nel mantenere l'equilibrio biologico del sistema radicale delle piante.

Durante il secolo scorso, sono stati sviluppati i primi metodi di coltura idroponica o senza suolo, i quali oggi stanno trovando sempre più diffusione nelle colture “fuori suolo”. Queste pratiche si basano sull'impiego di specifiche tecnologie che consentono una programmazione e un'automatizzazione elevate degli impianti colturali. Il continuo perfezionamento degli impianti di irrigazione, l'utilizzo diffuso di substrati inerti adatti a diverse colture e l'introduzione di sistemi

innovativi di miscelazione e controllo delle soluzioni nutritive hanno contribuito a migliorare progressivamente l'efficienza nutrizionale e le performance produttive delle specie coltivate.

Il metodo del fuori suolo trova la sua principale applicazione nella produzione di ortaggi freschi, con particolare attenzione a pomodori, cetrioli, peperoni e alcune varietà di lattuga, oltre alle piante ornamentali. Sebbene sia diffuso principalmente nei paesi del Centro-Europa come Olanda, Belgio e Danimarca, dove ha sostituito sistemi agricoli più intensivi, il suo utilizzo nelle regioni mediterranee è ancora limitato. Nonostante ciò, il fuori suolo rappresenta una pratica agricola preziosa per affrontare le sfide legate alla fertilità del suolo, alla limitata disponibilità di terreno e alla necessità di colture intensive. I dati riguardanti la superficie investita in serre nei vari paesi europei, riportati nella Figura 1, evidenziano l'importanza del settore convenzionale (Tittarelli et al., 2012).

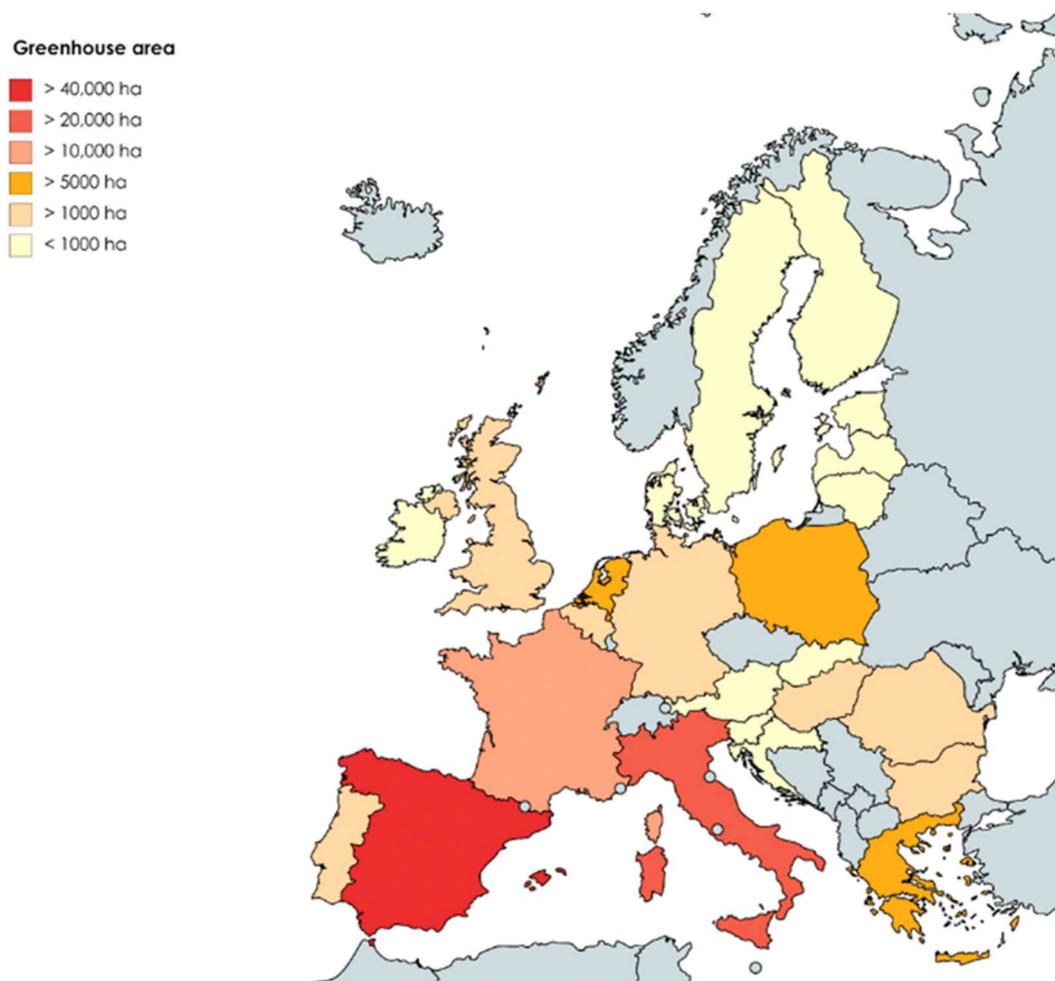


Figura 1. Superfici (in ettari) di serre/tunnel in Europa (2019). (Fonte: Eurostat European Statistics)

In sintesi, l'approccio del fuori suolo, che rappresenta solo una parte delle colture protette, offre numerose opportunità per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dell'agricoltura, considerando la

significativa superficie investita in serre. Numerosi autori hanno contribuito a comprendere e sviluppare questa tecnica innovativa.

1.1.2 I sistemi fuori-suolo maggiormente utilizzati

I sistemi idroponici rappresentano un ambito altamente innovativo nell'agricoltura contemporanea e necessitano considerevoli investimenti finanziari per la loro implementazione. Questi investimenti coinvolgono sia l'acquisizione di fattori produttivi soggetti a usura parziale, come strumenti e impianti, sia l'approvvigionamento di fertilizzanti necessari per garantire un aumento delle rese e una maggiore stabilità produttiva. Tali investimenti sono cruciali per mitigare il livello di incertezza caratteristico dell'attività agricola, offrendo una prospettiva più sicura e affidabile per gli agricoltori. Le colture fuori suolo possono essere suddivise in due ampie categorie: quelle con substrato e quelle senza substrato. Le coltivazioni fuori suolo senza substrato sono caratterizzate da impianti a ciclo chiuso che consentono il riciclo delle sostanze nutritive all'interno del sistema. Al contrario, le colture fuori suolo su substrato possono essere condotte su substrati inerti o substrati vivi, utilizzando due tipologie di impianti: quelli a ciclo chiuso con pompe drenanti e quelli a ciclo aperto con dispersione della soluzione. In entrambe le tipologie di produzione fuori suolo, sono stati sviluppati numerosi tipi di impianto con obiettivi specifici, che rappresentano la base dell'agricoltura high-tech moderna, diffusa soprattutto negli Stati Uniti e nel Nord Europa (Tittarelli et al., 2012).

Negli ultimi 20 anni, da quando la coltivazione idroponica si è diffusa per la produzione di ortaggi e fiori, numerosi impianti sono stati progettati.

Si riportano di seguito gli impianti più diffusi, raggruppati secondo Tittarelli et al. (2012):

1. SENZA SUBSTRATO
 - a. NFT
 - b. DFT o Floating
 - c. Aeroponica
2. CON SUBSTRATO
 - a. In cassoni
 - b. In sacchi
 - c. In vasi

SENZA SUBSTRATO

Tecnica del film di soluzione nutritiva (NFT)

In questi impianti, la soluzione nutritiva circola direttamente sulle radici senza l'uso di alcun substrato. La soluzione scorre in canalette leggermente inclinate e convergenti verso un deposito in cui viene raccolta e poi re-distribuita, con una pompa. Le piantine, che sono preliminarmente allevate in substrati inerti come perlite o lana di roccia, vengono poste nelle canalette ricoperte da film plastico impermeabile alla luce. In questo modo, le radici si adagiano sul fondo della canaletta e sono bagnate da un velo di soluzione nutritiva. Nel caso di un ciclo chiuso, la soluzione deve essere periodicamente controllata per mantenere l'equilibrio necessario alla crescita delle piante. Questo controllo può avvenire tramite analisi periodiche e reintegrazione della soluzione oppure mediante un ricambio completo periodico della soluzione accompagnato da un controllo giornaliero del livello di pH.

Tecnica del flusso circolante (Floating, DFT)

La tecnica del flusso circolante, conosciuta anche come Deep Water Culture (DWC) o Floating, è un metodo idroponico in cui le piante vengono coltivate con le radici immerse in una soluzione nutritiva aerata. Questo sistema prevede l'uso di contenitori galleggianti o piattaforme su cui sono posizionate le piante, consentendo loro di crescere con le radici sospese direttamente nella soluzione nutritiva. Questa tecnica offre numerosi vantaggi, tra cui una maggiore ossigenazione delle radici e un efficiente assorbimento dei nutrienti (Savvas, 2016). Utilizzata in Giappone per la coltivazione di specie acquatiche, questa tecnica è associata all'idea di idroponica e viene usata in Italia per le colture a foglia, come basilico, rucola, valerianella, spinaci e cicorie da taglio, anche se non è ancora molto diffusa nella produzione orticola complessiva.

Aeroponica

L'aeroponica rappresenta una tecnica avanzata di coltivazione idroponica, distinguendosi per l'esposizione delle radici delle piante all'aria, nebulizzate con una soluzione nutritiva. Questo metodo offre un ambiente altamente aerato per le radici, consentendo un efficace assorbimento dei nutrienti e una crescita ottimale delle piante. È una pratica agricola che ha suscitato l'interesse di numerosi ricercatori e studiosi nel campo dell'agricoltura sostenibile e della produzione alimentare.

CON SUBSTRATO

Le coltivazioni fuori suolo che si basano sull'utilizzo di substrati possono essere categorizzate in base al tipo di substrato impiegato o al tipo di contenitore utilizzato. I substrati possono essere classificati come inerti, come la perlite, lana di roccia e fibra di cocco, oppure attivi, con la torba come esempio

più comune ed efficace. I substrati inerti non forniscono nutrienti alle piante e quindi le colture sono principalmente nutrite da soluzioni nutritive regolate artificialmente. Le strutture degli impianti e la distribuzione della soluzione nutritiva sono simili a quelle delle coltivazioni senza substrato. D'altro canto, la torba, essendo una risorsa non rinnovabile, è oggetto di un acceso dibattito dal punto di vista ambientale. La scelta del substrato dipende dalle esigenze specifiche delle colture e dalle considerazioni ambientali ed economiche.

Coltivazione in cassone o bancale

I cassoni o bancali, costruiti in cemento, vengono sollevati dal suolo a un'altezza variabile da 20 a 80 cm e presentano una larghezza compresa tra 90 e 120 cm. Queste strutture sono riempite con substrati inerti, talvolta miscelati con torba per migliorarne la capacità di ritenzione idrica, sebbene ciò richieda quantità significative di substrato. La distribuzione della soluzione nutritiva, contenente sia macro che microelementi, avviene tramite linee di irrigazione localizzate poste sopra i bancali. Possono essere utilizzati sistemi di dispersione o di irrigazione a goccia. Questi sistemi operano a ciclo aperto, senza riciclare la soluzione nutritiva, il che comporta minori costi di gestione e controllo, ma aumenta l'impatto ambientale complessivo.

Coltivazione in sacchi

I sistemi di coltivazione in sacchi, sviluppati negli anni '60 in Olanda, Germania, Belgio, Danimarca e Regno Unito, si basano sull'uso di sacchi a base di torba alimentati tramite irrigazione a goccia localizzata sulle singole piante. Questi sistemi utilizzano substrati inerti come lana di roccia, perlite o pomice, che risultano più facili da gestire rispetto alla torba e consentono una maggiore maneggevolezza dei sacchi. La soluzione nutritiva viene distribuita attraverso il sistema di irrigazione a goccia con 4-12 interventi giornalieri. Questa tecnica è particolarmente adatta per colture orticole come pomodori, peperoni, meloni e cetrioli, ed è spesso utilizzata anche per colture verticali, ad esempio di fragole. I sistemi a ciclo aperto limitano la diffusione di malattie, ma richiedono attenzione alla sanità ambientale e possono essere complicati da gestire in ambienti ad alta densità di produzione. In alcuni contesti, come nei Paesi Bassi, dove è richiesto il recupero e il riciclo della soluzione drenata, i costi di produzione possono essere più elevati, rendendo questo tipo di impianto meno conveniente rispetto ad altri.

Coltivazione in contenitori singoli

La coltivazione in contenitori singoli, nota anche come "plant in pot", sta guadagnando popolarità sia per le piante ornamentali che per la produzione di ortaggi. Questo metodo prevede l'utilizzo di

contenitori dedicati a singole piante anziché moduli multi-pianta come nella coltura in sacchi. La distribuzione dell'acqua può avvenire tramite diversi tipi di impianti di irrigazione, tra cui quelli ad irrigazione capillare, a goccia o a canalette a scorrimento.

Gli impianti ad irrigazione capillare sono realizzati su bancali o a terra, con la base dei bancali impermeabilizzata per consentire il recupero della soluzione nutritiva. Questi sistemi offrono un regime idrico caratterizzato da elevata e costante umidità, adatto soprattutto a colture a ciclo breve. Il substrato utilizzato, spesso una miscela di torba e perlite, favorisce la risalita capillare dell'acqua. Nel caso dell'irrigazione a goccia, la distribuzione della soluzione nutritiva segue lo stesso principio della coltivazione in sacchi. Anche l'irrigazione a canalette a scorrimento è utilizzata, con vasi posti su sostegni inclinati per favorire il flusso dell'acqua. Tuttavia, queste pratiche comportano la diffusione di malattie, specialmente legate ad ambienti umidi, e richiedono la filtrazione e la disinfezione della soluzione nutritiva recuperata, aumentando i costi di gestione.

Alcuni vasi possono essere collocati su bancali di flusso e riflusso, collegati a una vasca sottostante in cui viene raccolta la soluzione nutritiva. Questo sistema prevede la pompa della soluzione nei bancali ad intervalli regolari, seguita da un assorbimento uniforme attraverso i fori di drenaggio dei vasi. Anche in questo caso, è necessario filtrare e disinfettare la soluzione riciclata.

1.2 Fertirrigazione

La tecnica della fertirrigazione consiste nella miscelazione e distribuzione di fertilizzanti insieme all'acqua di irrigazione. Questo approccio mira a ottimizzare l'assorbimento dei nutrienti da parte delle piante, consentendo un'accurata valutazione delle loro necessità in diverse fasi di crescita. Rispetto alla concimazione tradizionale, la fertirrigazione offre vantaggi quali una maggiore efficienza nell'assimilazione dei nutrienti, una riduzione delle perdite e una gestione più flessibile della nutrizione delle piante.

L'implementazione della fertirrigazione richiede una conoscenza approfondita dei principi nutritivi, dei fattori climatici, delle caratteristiche dell'acqua di irrigazione, del terreno o del substrato di coltivazione, nonché delle esigenze specifiche della coltura. Elementi cruciali per una gestione ottimale includono la conduzione di analisi dell'acqua e del terreno, il monitoraggio dell'elettroconduttività e della reazione della soluzione circolante, e l'adattamento dei volumi e degli intervalli di applicazione dei nutrienti.

I benefici della fertirrigazione includono un miglioramento dell'efficienza dei fertilizzanti, una riduzione delle perdite e una maggiore resistenza delle piante alle malattie e agli stress ambientali. Inoltre, permette una gestione più razionale dell'irrigazione, un allungamento del ciclo colturale per alcune specie, e una maggiore adattabilità alle esigenze del mercato e alle nuove tecnologie. Dal punto

di vista operativo, la fertirrigazione consente un risparmio di manodopera grazie alla possibilità di meccanizzare sia l'irrigazione che la fertilizzazione. Questo rende il processo più efficiente e facilmente gestibile.

In sintesi, la fertirrigazione rappresenta un approccio innovativo e efficace per la nutrizione delle piante, che offre numerosi vantaggi sia dal punto di vista tecnico-agronomico che operativo. La sua corretta implementazione richiede una comprensione approfondita dei principi e delle pratiche coinvolte, oltre a un monitoraggio costante delle condizioni di crescita delle piante (Enzo e Pimpini, 2001).

1.3 Il processo di compostaggio

La produzione di compost a livello europeo ha subito, negli ultimi anni, un costante incremento, grazie all'estendersi della separazione dello scarto organico come priorità operativa nei sistemi integrati di gestione dei rifiuti. Il caso più eclatante è costituito dalla Germania che, estendendo la separazione alla fonte del "rifiuto biologico" a partire dalla metà degli anni '80, è il paese che conta il maggior numero di impianti, una situazione di mercato consolidata e una certificazione di prodotto che sta spingendo gli operatori ad adeguarsi ai criteri di qualità imposti al processo e al prodotto (Centemero et al., 2001).

Secondo Centemero e Zanardi (2007), il compostaggio riveste un ruolo cruciale nel ridurre il volume dei rifiuti destinati alle discariche e nel produrre un ammendante organico di alta qualità per l'agricoltura. Nasini et al. (2011) hanno enfatizzato i vantaggi ambientali e agronomici del compostaggio, dimostrando la sua capacità di riciclare i rifiuti agricoli e migliorare la fertilità del suolo.

A tale riguardo, la produzione di biomassa vegetale derivante dalle coltivazioni è significativamente elevata, la quantità di questi prodotti sotto serra è stata stimata tra le 40 e le 60 t/ha per anno (Zaccardelli et al., 2010).

Ricerche di Caudelli et al. (2016) hanno contribuito a comprendere meglio i meccanismi e le prestazioni degli impianti di compostaggio elettromeccanico, offrendo spunti per ottimizzare l'efficienza dei processi di decomposizione dei rifiuti organici. Questi autori hanno contribuito a evidenziare l'importanza del compostaggio come strategia chiave per affrontare le sfide ambientali contemporanee e promuovere pratiche agricole più sostenibili e responsabili.

1.4 Il compost tea (CT)

C'è quindi un grande interesse tra i coltivatori sostenibili riguardo l'uso di tè di compost per aumentare la salute e la fertilità delle colture (Ingham, 2003) in quanto ricchi di nutrienti vegetali, fitormoni e altri composti biotattivi che possono influenzare singolarmente o in combinazione l'architettura delle radici (Eudoxie et al., 2019).

Il processo di compostaggio dei rifiuti porta a una riduzione della biomassa residua e garantisce l'apporto di materia organica umificata al suolo, contenente minerali e consorzi microbici benefici associati al suolo e alle piante, di cui le colture hanno bisogno per aumentare il loro stato nutrizionale, vigore vegetativo, salute e produttività (Pilla et al., 2023).

Il compostaggio è un processo biologico in cui composti organici biodegradabili vengono trasformati in compost. È un processo aerobico di stabilizzazione biologica controllata dei rifiuti organici fermentescibili, che avviene in condizioni favorevoli al passaggio attraverso uno stadio termofilo. L'obiettivo primario è la produzione di un materiale finale umificato e non fitotossico, idoneo all'utilizzo come ammendante organico in agricoltura. Durante questo processo, la biomassa substrato agisce come matrice per le reazioni bioossidative, promosse dai microrganismi aerobi naturalmente presenti nel substrato (Biliardi, 1999).

Negli ultimi anni, in agricoltura, l'uso di nuovi prodotti derivati dal compostaggio, come il compost tea (CT), sta aumentando a causa dei loro effetti positivi sulle colture e la coltivazione fuori suolo si sta rivelando sempre più positiva nei casi in cui gravi problemi relativi al suolo e all'acqua, come parassiti terricoli, suolo e acqua salini, terreno sterile o carenza di acqua, limitano la produzione delle colture terrestri, si suggerisce la coltivazione fuori suolo come soluzione sostitutiva adeguata. Questo metodo consente di ridurre le problematiche legate al suolo e all'approvvigionamento idrico, consentendo la coltivazione delle piante in ambienti controllati e ottimizzati per la crescita (Allahyari et al., 2014).

Nella Figura 2 è schematizzato il processo di compostaggio utilizzato per la produzione del compost tea (CT) senza l'ausilio di tecnologie avanzate. La procedura richiede essenzialmente l'utilizzo di compost come substrato principale e un sistema di aerazione della soluzione. L'aerazione favorisce la proliferazione di microrganismi benefici nel compost tea, che contribuiscono all'aumento della fertilità del suolo e alla resistenza delle piante a patogeni e stress ambientali.

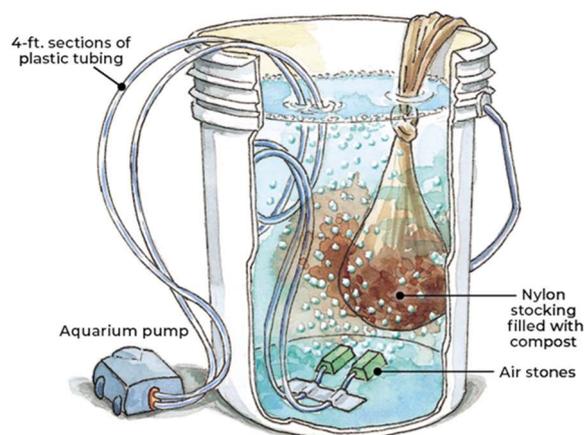


Figura 2. Procedura per la produzione del compost tea, senza l'impiego di tecnologie avanzate. Il processo richiede principalmente il compost, tubazione per favorire l'aerazione della soluzione.

1.3 Composizione del Compost tea

I compost teas (CTs) sono formulati organici liquidi ottenuti utilizzando l'estrazione acquosa di materiali compostati per un periodo definito di incubazione con acqua de-clorata in condizioni controllate (Biliardi, 1999).

In Figura 3 si riportano in dettaglio, le tipologie di Rifiuti Urbani trattate nel corso dell'anno 2021.

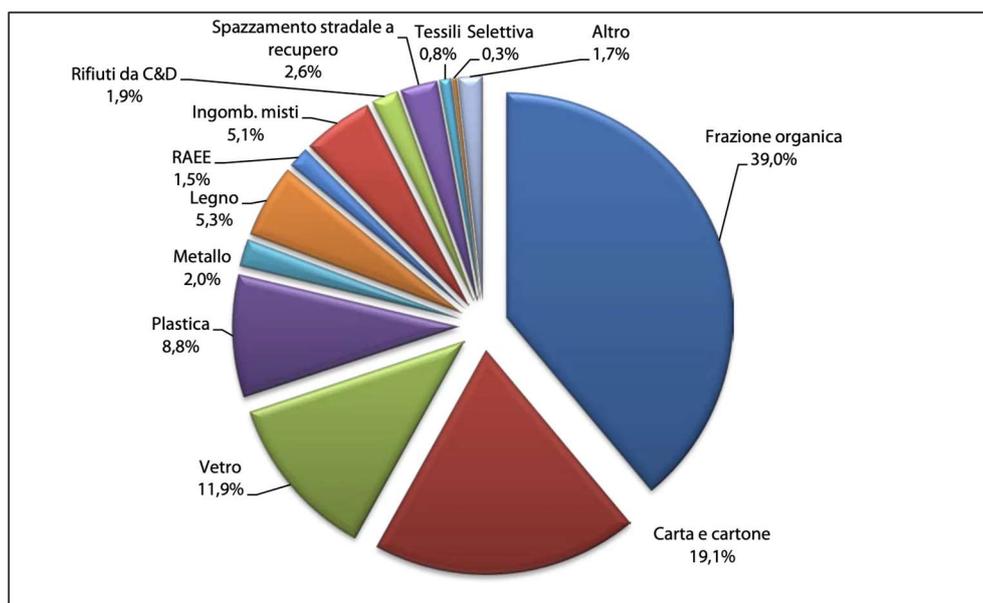


Figura 3. Tipologia di matrici trattate negli Impianti di Compostaggio nel corso del 2021 (Fonte:ISPRA).

Il quantitativo di ammendante compostato prodotto a livello nazionale, è pari a circa 1.4 milioni di tonnellate. L'ammendante compostato di qualità risulta essere costituito per il 64.4% da Ammendante Compostato Misto (ACM, 920.000 t), per 16.6% da Ammendante Compostato Verde (ACV, 239.000 t) e per il 2% da altri prodotti; gli scarti costituiscono, infine, il 17.2% del quantitativo prodotto dagli impianti a livello nazionale. Nella Figura 4 sono riportati gli input e gli output degli impianti di compostaggio aerobico della FORSU nella regione Lazio, nel corso del 2020, mentre nella tabella 1 si schematizzano i bilanci di massa in ingresso e in uscita degli impianti di compostaggio (input-output) (Centemeto et al., 2007).

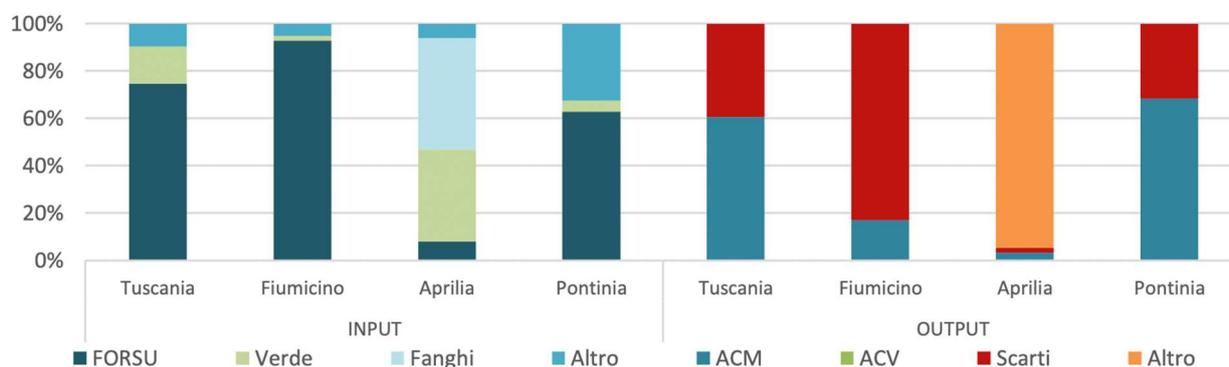


Figura 4. Input e output degli impianti di compostaggio aerobico della FORSU nel Lazio (2020). (Fonte: ELABORAZIONI ACOS SU DATI DEL CATASTO NAZIONALE DEI RIFIUTI).

Tabella 1. I numeri indice del sistema compostaggio in Italia nel 2006 (elaborati da Rapporto Rifiuti APAT-ONR 2007)

N° impianti di compostaggio in Italia	237 operativi (+ 22 rispetto al 2005)
N° impianti capacità > 10.000 t/a	100
Scarto organico trattato	3.185.000 t
1. Scarto organico alimentare (umido) differenziato conferito agli impianti di compostaggio	1.200.000 t
2. Scarto vegetale (verde) differenziato conferito agli impianti di compostaggio	1.080.000 t
3. Fanghi	536.000 t
4. Altro	388.000 t
Stima del compost prodotto	1.439.000 t (+ 20% rispetto al 2005)

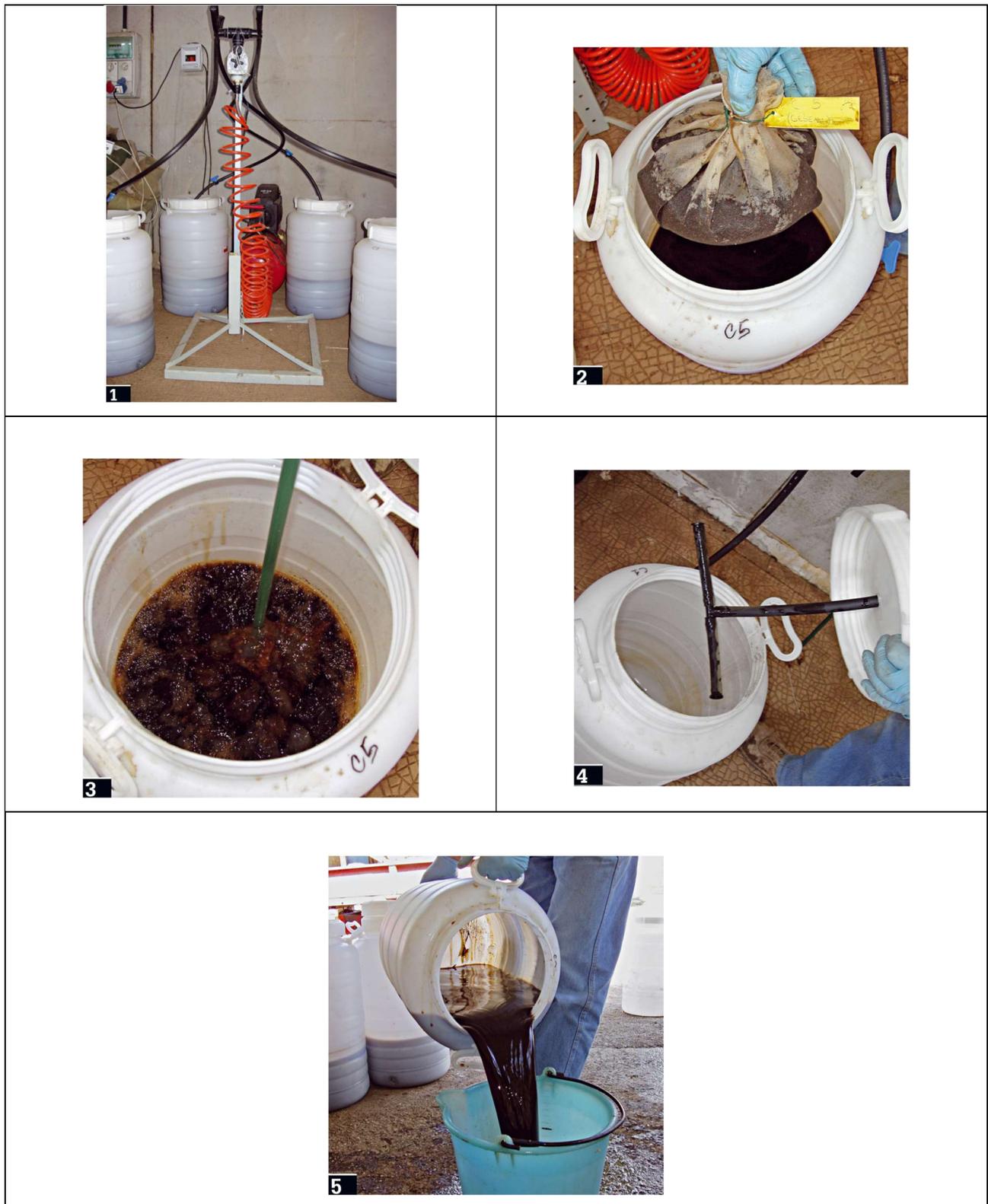


Figura 5. Processo di estrazione del compost-tea: (1) impianto di estrazione simultanea con quattro fermentatori; (2) sacca di tessuto – non- tessuto contenente compost; (3) fase di aerazione; (4) apertura del fermentatore a processo concluso; (5) recupero del compost-tea. (Fonte: l'Informatore Agrario 7/2012)

1.4 Vantaggi e applicazioni

I principali vantaggi della coltivazione in ambienti controllati, fuori-suolo includono:

1. controllo preciso dell'approvvigionamento idrico: attraverso sistemi di irrigazione controllati, è possibile fornire alle piante esattamente la quantità d'acqua necessaria;
2. controllo preciso dei nutrienti: l'apporto di nutrienti alle piante può essere regolato con precisione attraverso l'uso di soluzioni nutritive specificamente formulate.
3. controllo del pH: il pH del substrato può essere mantenuto costante e ottimale per la crescita delle piante senza la variabilità che si verifica nel suolo;
4. controllo della temperatura radicale: la temperatura dell'ambiente radicale può essere gestita in modo accurato per garantire condizioni ottimali di crescita;
5. miglioramento delle prestazioni: il controllo più semplice e preciso dei fattori ambientali consente una migliore gestione delle colture, contribuendo a migliorare la produttività;
6. riduzione della manodopera: la coltivazione senza suolo può richiedere meno manodopera rispetto alla coltivazione tradizionale in suolo;
7. assenza della necessità di sterilizzazione del terreno: poiché non viene utilizzato il terreno, non è necessario sterilizzarlo, riducendo la necessità di interventi invasivi e il rischio di contaminazione da patogeni del suolo;
8. prestazioni più elevate nel corso dell'anno: grazie al controllo completo dell'ambiente di crescita, è possibile ottenere produzioni più elevate e costanti durante tutto l'anno, indipendentemente dalle condizioni climatiche esterne (Allahyari et al., 2014).

I compost teas contengono significative quantità di macronutrienti vegetali (come azoto, fosforo e potassio nei rapporti di 1,3-5-8), fitormoni come IAA, citochinine e acido salicilico e micronutrienti (rame, zinco, ferro, manganese); acidi umici, metalli pesanti (piombo, cadmio, cromo), con un effetto immediato in quanto si dissolvono in soluzione acquosa e microrganismi, che possono promuovere la crescita delle piante, aiutare nel biocontrollo dei patogeni fungini e avere effetti positivi sulla qualità del suolo e sulla salute delle piante. I compost teas hanno tipicamente consorzi microbici in sospensione che includono protisti, funghi, oomiceti, lieviti, attinomiceti e batteri, utili alle piante grazie alle loro proprietà soppressive e/o promozionali della crescita. La qualità ed efficacia dei compost teas sono legate a diversi fattori, come il rapporto compost-acqua, il tipo di compost e l'aerazione, che determinano lo sviluppo di gruppi specifici di microrganismi. In particolare, questi microrganismi sono in grado di conferire proprietà specifiche al CT, come il controllo biologico delle principali malattie criptogamiche e/o la biostimolazione dello sviluppo vegetativo e produttivo delle piante. I ceppi batterici isolati dai compost teas possono essere classificati come PGPR (batteri

promotori della crescita delle piante). Questi batteri promuovono la crescita delle piante tramite meccanismi diversi che rendono le piante più resistenti agli stress abiotici e biotici. Diversi studi hanno ottenuto risultati soddisfacenti di biostimolazione per diverse colture. Questo articolo prospettico mira a illustrare i metodi di produzione dei vari compost teas e le loro proprietà chimico-fisiche. Inoltre, evidenzia i possibili effetti che possono avere sia sul controllo dei fitopatogeni nell'orticoltura che sull'influenza che possono avere sul contenuto di molecole bioattive e nutrienti (Pilla et al., 2023).

Gli obiettivi dell'UE nelle attività di ricerca e sviluppo sul compost sono basati sul programma di riciclaggio dei rifiuti urbani e industriali. A tale proposito sono si basano sullo studio e la promozione della qualità del compost, della convenienza economica e della sicurezza ambientale.

Esistono peraltro norme nazionali che, in un'ottica di tutela ambientale, stabiliscono i criteri e limiti analitici sui rifiuti, sui compost, sui terreni, sulle dosi di applicazione eccetera.

I principali criteri sono i seguenti:

- definizione del compost e descrizione dei materiali grezzi accettati in ingresso;
- specificazione dei metodi di produzione: dettagli sui metodi di compostaggio da utilizzare;
- limiti di accettabilità del compost e restrizioni del suo impiego: vengono definite le caratteristiche del compost e le linee guida del suo impiego in funzione della qualità dei suoli, del tipo di vegetale e delle condizioni climatiche. Vengono stabiliti valori limiti da rispettare;
- metodi analitici e di campionamento: descrizione dei metodi analitici e delle procedure di campionamento che devono essere utilizzate per determinare se i limiti stabiliti sono rispettati;
- procedure di controllo della qualità: altre esigenze possono essere definite in modo di assicurare e controllare e controllare la qualità del prodotto (ad esempio chi deve controllare e chi deve effettuare le analisi ed a quali frequenze, ecc.) (Biliardi, 1999).

In Italia, le Normative di riferimento sono:

- D.lgs 152/2006 s.m.i. Norme in materia ambientale (G.U. n.88 del 14 aprile 2006)
- D.lgs 75/2010 Riordino e revisione della disciplina in materia di fertilizzanti, a norma dell'articolo 13 della legge 7 luglio 2009, n. 88. (GU S.O. n. 121 del 26 maggio 2010)
- Norme tecniche (Quadro normativo compost, 2023).

Come riportato nella Tabella 2, si evidenziano alcuni vincoli riguardanti gli standard di qualità microbiologica per il compost finito, suggeriti o riportati in leggi e regolamenti nazionali ed internazionali.

Tabella 2. Standard di qualità microbiologica per il compost finito suggerito o riportato in leggi/regolamenti nazionali ed internazionali (Fonte: Laboratorio di Igiene Ambientale, Istituto Superiore di Sanità, Roma)

Microorganismo	USEPA [16]	CEE [17]	D. Strauch [6]	UNI [18]
<i>Salmonella</i> spp.	3 <i>Salmonelle</i> /4g	assenti in 25 g	assenti in 100 g	assenti MPN/g
Coliformi fecali	≤ 1000 MPN/g	-	≤ 500 cellule/g	-
<i>Escherichia coli</i>	-	< 1000 MPN/g	-	-
Streptococchi fecali	-	-	≤ 5000 cellule/g	-
Uova di parassiti	-	-	assenti	-

Allo stato attuale la qualità del compost a cui si fa riferimento nella legislazione riguarda principalmente la sua qualità ambientale riferita cioè i contenuti di sostanze potenzialmente inquinanti o comunque indesiderabili.

La qualità agronomica del compost, riferita ai contenuti di macro e micronutrienti alle caratteristiche fisiche ed alle caratteristiche di stabilità del materiale, importante quanto la qualità ambientale, si ritrova generalmente trascurata, sono noti alcuni esempi, come riportato nella tabella 3 e 4.

Tabella 3. Confronti analitici, relativi ai principali parametri di valutazione agronomica per le applicazioni in funzione ammendante e come substrato florovivaistico, tra diversi prodotti compostati ed i materiali organici di tradizionale impiego (valori medi) (Fonte: L'impiego del compost in agricoltura).

Parametro	Letami	Pollina	Compost da Scarti Alimentari	Compost da Fanghi Biologici	Compost da Scarti Verdi	Terricci Torbosi	Torbe
Umidità (% s.t.q.)	65-80	20-70	40-55	40-55	40-55	40-60	40-50
N (% s.s.)	2.2	4.3	1.79	1.78	1.07	/	0.86
P ₂ O ₅ (% s.s.)	1.9	4.5	1.38	2.13	0.47	/	0.09
K ₂ O (% s.s.)	1.7	3.1	1.26	0.67	0.42	/	0.08
TOC (% s.s.)	35	/	25	24	22	50	39.7
pH (-logH ⁺)	8.3	8.9	8.15	7.21	7.81	5.9	5.6
C.E.S. (μS cm ⁻¹)	2560	6590	3730	2470	980	1860	440
S.V. (% s.s.)	55	50	49.48	48.67	43.63	64.96	83.81
Magnesio (% MgO)	/	/	1.53	1.23	1.08	/	0.16
Manganese (ppm s.s.)	/	/	294.32	273.23	303.32	/	63.17
Ferro (ppm s.s.)	/	/	13600	9490	2690	/	1480

Tabella 4. Alcune caratteristiche medie di torbe e compost a confronto con dati medi rilevati sui substrati (valori medi) (Fonte: L'impiego del compost in agricoltura).

Parametro	Torbe di sfagno*	Substrato ideale	Compost verde	Compost misto
Densità apparente (g cm ⁻³)	0,6-0,1	0,15-0,50	0,35	0,40
Porosità totale (% vol:vol)	>96	>85	82,34	81,32
Capacità per l'aria (% vol:vol)	45-50	20-30	28,9	29,9
Acqua disponibile (% vol:vol)	24-40	24-40	13,8	15,7
pH	2,5-3,5	4,5-6	7,8	8,1
Conducibilità (μS m ⁻¹)	200-1600	< 2100	980	3730
CSC (meq l ⁻¹)	148,1 ²	100-1000 ⁷	236,7 ²	173,5 ²

(*) La torba di sfagno, chiamata anche torba bionda, è una torba giovane; lo sfagno, parzialmente decomposto, può trattenere un volume d'acqua pari a 10-12 volte il suo peso. Ha un colore chiaro ed è composta quasi interamente da diverse tipologie di sfagno.

L'evoluzione normativa prevede la distinzione tra diverse classi qualitative del compost dove si parla sempre di più di un compost di data qualità.

Per promuovere l'utilizzo agricolo per i compost con le migliori caratteristiche, in diversi casi hanno svolto un ruolo significativo le associazioni dei produttori che hanno dato vita ai marchi di qualità.

Per quanto concerne specificatamente il compostaggio di RSU (Rifiuti Solidi Urbani), nel tempo di sono sviluppate due tecnologie connesse a due diversi substrati di partenza:

- RSU tal quale;
- residui selezionati "a monte".

Il compostaggio di residui selezionati impone la raccolta differenziata delle frazioni dei rifiuti più atti a fornire prodotti di qualità (Tabella 5). In particolare, i più utilizzabili sono:

- da giardinaggio, potature e sfaldi del verde urbano
- scarti dei mercati ortofrutticoli
- residui di mense, domestici, industria agroalimentare
- residui ligneo-cellulosi
- residui agricoli fermentescibili
- fanghi di depurazione di liquami urbani e zootecnici (Biliardi, 1999).

Tabella 5. Incidenza delle diverse procedure di separazione dei RSU sul livello di contaminazione dei metalli pesanti delle frazioni organiche e/o del compost finito, in studi condotti nei Paesi Bassi (Fonte: Laboratorio di Igiene Ambientale, Istituto Superiore di Sanità, Roma).

Strategia di separazione	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	(mg/kg, peso secco)						
<i>Raccolta dell'organico alla fonte</i>	0,80	43	35	-	-	130	195
<i>Raccolta dell'organico alla fonte</i> (scarti orto-frutticoli e di giardinaggio)	0,97	36	28	0,08	7	42	170
<i>Raccolta dell'organico alla fonte</i> (scarti ortofruitticoli, di mensa e di giardinaggio)	0,55	32	23	0,06	10	38	135
<i>Raccolta dell'organico alla fonte</i>	1,00	30	50	-	10	160	230
<i>Separazione secco/umido</i> (carta, lattine, vetro)	2,50	95	270	-	-	580	880
<i>Separazione secco/umido</i> (plastica, lattine, vetro)	1,80	60	250	-	-	400	720
<i>Separazione secco/umido</i> (carta, plastica, lattine, vetro)	1,60	70	130	-	-	680	460
<i>Selezione meccanica in impianto centralizzato</i>	3,33	113	268	1,37	219	591	666
<i>Selezione meccanica in impianto centralizzato</i> (vaglio a tamburo/ separatore magnetico/ciclone)	1,70	20	70	-	-	670	540
<i>Selezione meccanica in impianto centralizzato</i> (vaglio a tamburo/separatore magnetico)	1,90	59	220	-	-	600	670
<i>Selezione meccanica in impianto centralizzato</i> (setaccio/separatore magnetico)	1,80	60	240	-	-	530	710
<i>Selezione meccanica in impianto centralizzato</i> (setaccio/separatore magnetico/compostaggio dei fini)	2,50	70	270	-	35	700	800
<i>Selezione meccanica in impianto centralizzato</i> (frantumazione/ separazione degli inerti)	1,80	40	100	-	25	420	520
<i>Vagliatura del compost finito</i> (da stabilizzazione RSU tal quali)	6,40	171	693	2,90	235	875	1400
<i>Vagliatura del compost finito</i> (da stabilizzazione RSU tal quali)	8,50	140	530	-	-	830	1600
<i>Vagliatura del compost finito</i> (da stabilizzazione RSU tal quali)	7,00	180	600	-	110	800	1700

RSU = rifiuti solidi urbani.

Il compostaggio, come tecnica di trasformazione biologica di residui organici degradabili, ha raggiunto uno stadio di sviluppo consolidato. Negli ultimi due decenni, il progresso scientifico ha contribuito a chiarire gli aspetti fondamentali di questo processo, permettendo una gestione più efficace della biostabilizzazione aerobica dei rifiuti organici. Questo processo naturale, quando avviene in condizioni ottimali, è in grado di produrre un substrato di coltura di alta qualità, caratterizzato da una buona struttura, un equilibrato apporto di nutrienti e una ricca presenza di

sostanze organiche. Tuttavia, il compostaggio non è privo di sfide: consiste nella decomposizione di una vasta gamma di materiali organici da parte di una varietà di microrganismi, tra cui batteri, funghi e actinomiceti, che operano sia a temperature moderate che elevate. I problemi principali nell'applicazione del compostaggio non sono tanto di natura teorica quanto operativa, e possono derivare da fattori come l'incompatibilità dei materiali trattati o l'insorgenza di impatti ambientali negativi. Il successo futuro del compostaggio dipenderà quindi dalla capacità di valutare attentamente gli aspetti positivi e negativi di questo metodo di trattamento dei rifiuti, tenendo conto delle specifiche condizioni operative in ciascun contesto applicativo. Un vantaggio significativo offerto dal compostaggio è la possibilità di recuperare la sostanza organica dai rifiuti solidi urbani (RSU), trasformando un materiale potenzialmente impattante in una risorsa preziosa adatta a molteplici utilizzi. Tuttavia, l'uso del compost può essere limitato dalla presenza di contaminanti, potenziali patogeni e problematiche legate a odori sgradevoli e dispersione di polveri. I microinquinanti metallici ed in generale i contaminanti inorganici non si degradano e tendono invece a concentrarsi durante il processo di compostaggio man mano che la sostanza organica nella quale sono diluiti si mineralizza. I metalli che destano maggior preoccupazione sono quelli persistenti e che tendono a bioaccumularsi, causando effetti tossici a breve o lungo termine negli organismi e sull'ambiente. I più comunemente considerati sono cadmio (Cd), cromo (Cr), rame (Cu), mercurio (Hg), piombo (Pb), nickel (Ni) e zinco (Zn).

La gestione efficace dei contaminanti nei compost richiede strategie mirate, come la raccolta differenziata dei rifiuti organici e la separazione delle componenti responsabili della contaminazione. Tra le procedure possibili per la limitazione dei contaminanti nei compost ottenuti dai RSU, vi sono:

- 1) riduzione o eliminazione dei contaminanti nei prodotti di consumo e negli imballaggi destinati a diventare RSU;
- 2) raccolta differenziata dei rifiuti organici putrescibili destinati al compostaggio;
- 3) separazione alla fonte delle componenti responsabili di contaminazione;
- 4) selezione spinta delle diverse frazioni dei RSU presso un impianto centralizzato prima del compostaggio;
- 5) raffinazione del compost dopo la biostabilizzazione dei RSU tal quali o sommariamente selezionati.

Queste strategie possono essere implementate a livello locale mediante scelte tecniche e politiche appropriate, consentendo un miglioramento del processo di compostaggio e una riduzione dell'impatto ambientale complessivo (Musmeci et al., 1999).

I test biologici utilizzati per valutare i parametri biologici dei compost risultano utili ed efficaci in quanto permettono di seguire l'evoluzione dei materiali nel corso del compostaggio fornendo un giudizio complessivo sulla loro stabilità e maturità indipendentemente dalle singole sostanze che compongono il materiale in esame.

Tali saggi inoltre risultano di semplice esecuzione e forniscono risposte valide in brevi tempi. In ogni caso la molteplicità dei test disponibili indica che non esiste ancora un metodo che possa fornire da solo una valutazione della maturità dei compost ma diventa indispensabile comparare i risultati ottenuti dai diversi saggi ed integrarli con quelli delle più importanti determinazioni chimiche come pH, rapporto C/N e qualità della sostanza organica (Nappi et al., 1990).

2. Scopo del lavoro

L'agricoltura moderna deve affrontare numerose sfide, tra cui la carenza idrica, la necessità di risparmiare risorse, il riciclo dei materiali, la riduzione degli sprechi, e il miglioramento delle condizioni lavorative per ovviare alla carenza di manodopera. In risposta a queste problematiche, la presente ricerca si concentra sull'applicazione della bioponica, un particolare sistema di idroponica che utilizza nutrienti derivati da processi estrattivi di matrici organiche, in questo caso da compost tea proveniente da un compost derivato da rifiuti urbani umidi e scarti vegetali della raccolta differenziata.

L'obiettivo principale di questo studio è valutare e confrontare l'efficacia di quattro diverse soluzioni nutritive a parità di conducibilità elettrica: controllo (con macroelementi e microelementi somministrati attraverso concimi minerali di sintesi), compost tea tal quale (diluito con acqua per il raggiungimento dell'EC target), compost tea corretto (aggiunta di concime finalizzata ad implementare le carenze nutrizionali) e compost tea corretto arricchito con aria ionizzata.

Ogni trattamento è stato replicato tre volte per garantire la robustezza dei risultati. Le analisi si sono focalizzate su parametri quantitativi e qualitativi del prodotto, con dei rilievi effettuati durante il ciclo di coltivazione e durante la fase di post-raccolta, al fine di ottenere una valutazione completa dell'impatto del compost tea sulla produttività, sulla qualità della lattuga coltivata e sulla potenziale capacità di integrare i nutrienti di sintesi nella coltivazione idroponica.

Questo approccio non solo mira a rispondere alle attuali esigenze dell'agricoltura moderna, ma anche a promuovere pratiche sostenibili che possano migliorare la gestione delle risorse e l'efficienza produttiva.

3. Materiali e metodi

3.1 Estrazione del compost tea

Il compost tal quale è stato analizzato in laboratorio per una caratterizzazione qualitativa della componente minerale, e per la valutazione del contenuto di metalli pesanti.

Durante la prova preliminare di preparazione del compost tea sono stati valutati diversi rapporti e tempistiche di estrazione dinamica (con arieggiamento continuo) del compost in acqua demineralizzata, attingendo informazioni da alcuni studi presenti in letteratura scientifica (Zaccardelli et al., 2010; Shrestha et al., 2010). Prima di avviare la prova su scala ampia, sono state effettuate delle valutazioni preliminari sulle modalità di estrazione del compost tea eseguite in backer da 3 litri e valutando nove combinazioni diverse (Tabella 6).

Tabella 6. Prova preliminare di estrazione del compost tea con diversi rapporti di diluizione e tempistiche di infusione

Rapporto compost : acqua	Tempo di estrazione
1:2.5	24 ore
1:2.5	48 ore
1:2.5	72 ore
1:5	24 ore
1:5	48 ore
1:5	72 ore
1:10	24 ore
1:10	48 ore
1:10	72 ore



Figura 6. Prova preliminare di preparazione del compost tea su piccola scala con diversi rapporti di estrazione e tempistiche.

I campioni ottenuti sono stati poi analizzati in laboratorio attraverso analisi di cromatografia ionica per la determinazione di anioni e cationi e ICP per valutare il contenuto di metalli pesanti all'interno degli estratti. Sulla base dei risultati ottenuti è stato individuato il rapporto di estrazione e tempo ritenuti ottimali e si è proceduto regolarmente con la preparazione dell'estratto nei quantitativi necessari al completamento del ciclo sperimentale di coltivazione, conservando l'eccesso in contenitori chiusi e posti in cella frigorifera a 4°C. La preparazione del compost tea è stata eseguita mettendo il compost in sacchi di tessuto geotessile appositamente foderati, con lo scopo di evitare la fuoriuscita del compost, ma sufficientemente porosi per l'interazione con l'acqua e la solubilizzazione degli ioni. Con l'ausilio di un arieggiatore dal 40 litri/minuto e una pietra porosa si è provveduto ad insufflare aria favorendo il gorgogliamento della soluzione. Successivamente l'estratto è stato filtrato con della carta assorbente con lo scopo di trattenere il particolato fine fuoriuscito dal sacco.

Utilizzando il software SOL-NUTRI, uno strumento freeware per sistemi operativi Microsoft Windows, è stata presa come riferimento la soluzione nutritiva per ortaggi da foglia (stadio unico). SOL-NUTRI permette di calcolare i quantitativi di concimi semplici e di acidi da sciogliere in un determinato volume di acqua irrigua per creare una soluzione nutritiva per la fertirrigazione delle principali specie ortofloricole. Questo software è rivolto ad agricoltori, ricercatori, tecnici e professionisti in agricoltura che necessitano di calcolare soluzioni nutritive in modo preciso ed efficiente.

Il software si distingue per la sua facilità d'uso, anche per utenti meno esperti. Attraverso un percorso guidato e richiedendo pochi input, come l'analisi chimica dell'acqua irrigua, la scelta di una ricetta nutritiva, l'indicazione del fattore di diluizione e del volume dei contenitori della soluzione stock concentrata (nel caso di utilizzo di un fertirrigatore), SOL-NUTRI permette di calcolare rapidamente e automaticamente il quantitativo di concimi e acidi necessari. Inoltre, il software consente il controllo di eventuali precipitazioni nelle soluzioni stock e il calcolo del loro costo.

Nel nostro studio, SOL-NUTRI ha suggerito di mantenere una conducibilità elettrica (EC) di 2.38 dS/m per la soluzione nutritiva destinata alla lattuga. Questo valore è stato scelto per garantire un apporto ottimale di nutrienti, evitando stress osmotici e carenze nutrizionali.

Altre due tipologie di soluzioni nutritive sono state preparate ed è stato mantenuto il medesimo valore di conducibilità elettrica target. È stata utilizzata acqua demineralizzata al fine di apportare nutrienti in maniera controllata, solo attraverso l'aggiunta di concime e/o compost tea. Si è proceduto quindi al calcolo di tre soluzioni; oltre a quella di controllo (CTR) la sperimentazione ha avuto come obiettivo quello di valutare l'utilizzo di compost tea diluito con acqua demineralizzata (CTE) fino al raggiungimento dell'EC target 2.38 ds/m, dove il compost tea è stato diluito 5,5 volte in acqua. La terza soluzione nutritiva (CTC) è stata calcolata con lo scopo di integrare la carenza di nutrienti

all'interno del compost tea, apportando attraverso concimi semplici i nutrienti necessari e mantenendo sempre come EC target 2.38 dS/m, fattore comune all'interno della prova. Il compost tea è stato diluito 16 volte in questo caso, al fine di apportare potassio e zolfo nei valori target dell'elemento, senza eccedere con l'apporto di sodio e cloro. Un quarto trattamento è stato valutato (CTCJ) e consisteva nell'impiego di gas ottenuto tramite ionizzazione al plasma freddo, che veniva insufflato nella vasca contenente la soluzione nutritiva per mezzo della pietra porosa, con lo scopo di valutare effetti di tipo sanitizzante e l'eventuale booster nutrizionale.

Formula nutritiva: Ortaggi da foglia (stadio unico)															
CTR															
Presenti (mmol/L)															
EC dS/m	N-NO3	N-NH4	P-PO4	K	Ca	Mg	Na	S-SO4	Cl	Fe	B	Cu	Zn	Mn	Mo
2.38	16.00	2.00	1.00	10.00	4.50	1.00	0.00	2.50	0.00	40.00	30.00	1.00	5.00	5.00	1.00
ppm	224	28	62	391	180	24	0	80	0	2	0.32	0.06	0.33	0.27	0.06
CTC															
Attesi (mmol/L)															
EC dS/m	N-NO3	N-NH4	P-PO4	K	Ca	Mg	Na	S-SO4	Cl	Fe	B	Cu	Zn	Mn	Mo
2.37	14.06	1.76	1.76	8.79	3.95	0.88	2.79	2.49	1.97	40.00	30.00	1.00	5.00	5.00	1.00
ppm	197	25	55	344	158	11	64	80	70	2.23	0.32	0.06	0.33	0.27	0.10

Formula nutritiva: Ortaggi da foglia (stadio unico)															
CTE															
Presenti (mmol/L)															
EC dS/m	N-NO3	N-NO2	N-NH4	K	Ca	Mg	Na	S-SO4	Cl	Fe	B	Cu	Zn	Mn	Mo
2.38	0.18	0.05	1.58	7.99	1.74	0.64	8.12	7.23	5.73	7.72	9.43	0.46	0.00	0.00	0.00
Attesi (mmol/L)															
EC dS/m	N-NO3	N-NH4	P-PO4	K	Ca	Mg	Na	S-SO4	Cl	Fe	B	Cu	Zn	Mn	Mo
2.37	16.00	2.00	2.00	10.00	4.50	1.00	2.79	2.50	0.00	40.00	30.00	1.00	5.00	5.00	1.00

Tabella 7. Descrizione dei macronutrienti e micronutrienti presenti nelle diverse soluzioni nutritive.

3.2 Ambiente di coltivazione e disegno sperimentale

La prova è stata condotta in una serra tunnel di dimensioni 50 m * 12 m e altezza al colmo di 6 m, con orientamento Nord- Sud, presso l'Azienda agraria sperimentale "Lucio Toniolo" dell'Università degli Studi di Padova, situata a Legnaro (PD) (45°21'06.9"N 11°57'01.5"E).

Il trapianto di *Lactuca sativa* var. gentile è stato effettuato il giorno 29/03/2024, con una distanza di 0.2 m sulla fila 0.3 m tra le file e una densità d'impianto di 16.6 piante/m². Il sistema di coltivazione era caratterizzato da 12 sistemi indipendenti. Ogni sistema misurava 2 m * 0.70 m ed era composto

da 3 tubi di coltivazione in PVC (\varnothing 140 mm) contenenti 10 piante (Fig. 7). Ciascuna pianta è stata posta in un contenitore da 200 mL riempito con argilla espansa per offrire sufficiente ancoraggio per l'apparato radicale e capillarità per la disponibilità idrica.

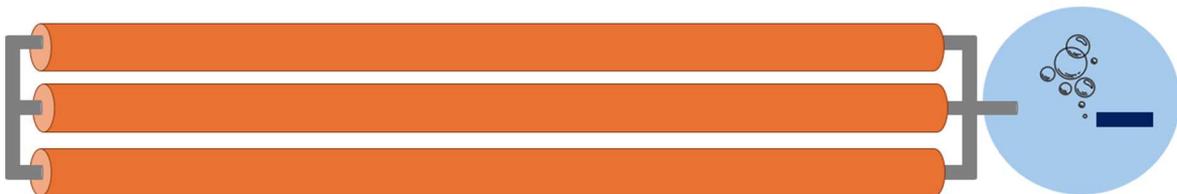


Figura 7. Rappresentazione del sistema di coltivazione.

Ciascun sistema prevedeva una vasca indipendente contenente la soluzione nutritiva, all'interno della quale vi era una pietra porosa collegata all'arieggiatore che permetteva l'ossigenazione. Nel trattamento con applicazione di Plasma Non Termico (CTCJ), il plasma veniva insufflato tramite arieggiatore. Inoltre, una pompa permetteva il ricircolo della soluzione nutritiva, dalla vasca di accumulo fino al punto di ingresso del sistema, consentendo un flusso continuo della soluzione. Le piante prese come riferimento sono state quelle centrali, meno influenzate dal gradiente nutrizionale del sistema, le quali sono state caratterizzate con rilievi quanti- qualitativi.

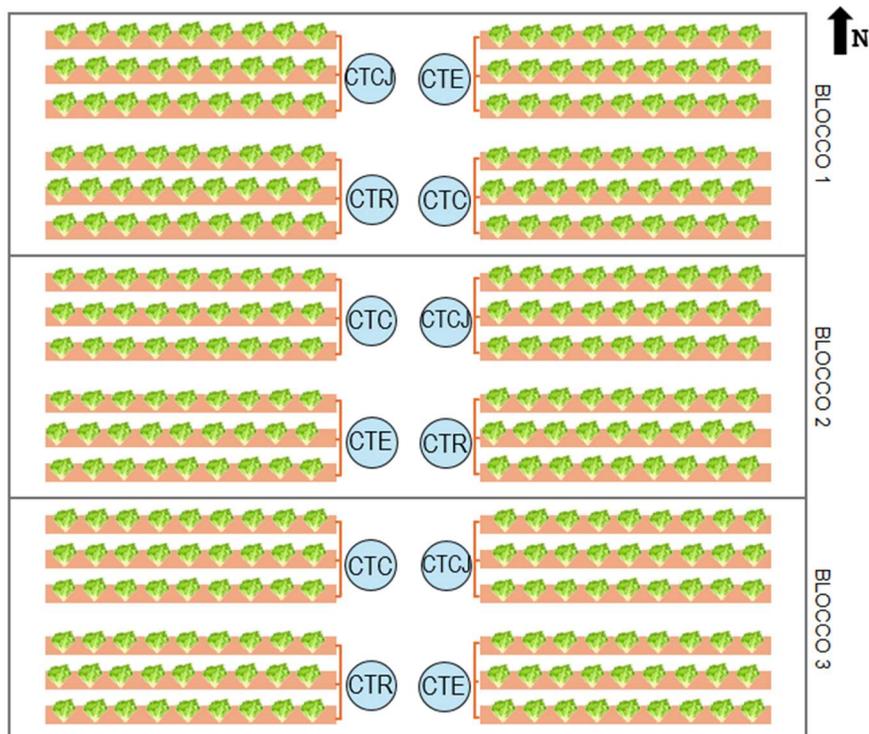


Figura 8. Disegno sperimentale a blocchi randomizzati con 3 ripetizioni, Controllo (CTR), Compost Tea tal quale (CTE), Compost Tea corretto (CTC) e compost tea corretto arricchito con aria ionizzata (CTCJ).

3.3 Condizione microclimatica

I parametri climatici della serra sono stati monitorati con i sensori data logger Hobo (HOBO®, Onset Computer Corporation, Bourne, Massachusetts, USA). In particolare, sono stati misurati temperatura e umidità dell'aria all'altezza del piano di coltivazione.

3. Misurazione dei parametri delle soluzioni nutritive

Ogni giorno, sono stati misurati i principali parametri chimici e fisici delle soluzioni nutritive per ciascuna delle dodici vasche. In particolare, sono stati valutati i seguenti parametri:

- pH
- conducibilità elettrica (EC)
- temperatura (°C)
- quantità di ossigeno disciolto nella soluzione (D.O).

Questa metodologia sistematica ha permesso di comprendere l'andamento di tali parametri per i quattro diversi trattamenti nel corso del tempo, fornendo informazioni sull'evoluzione e sulle dinamiche delle soluzioni nutritive utilizzate.

Le analisi quotidiane si sono rivelate fondamentali non solo per monitorare e garantire la corretta gestione delle condizioni ambientali, ma anche per mantenere l'EC a 2,38 durante le operazioni di reintegro della soluzione nutritiva.

3.5 Misurazione dei parametri fisiologici

I dati riferiti ai parametri fisiologici sono stati acquisiti con cadenza settimanale con l'ausilio di diversi strumenti. Lo stato nutrizionale della coltura è stato valutato tramite indice SPAD 502 (Chlorophyll Meter SPAD-502Plus). Uno strumento che misura il contenuto di clorofilla in modo rapido e non invasivo. La misura avviene su una porzione di foglia mediante l'apposita clip integrata sullo strumento e sul display compare il contenuto di clorofilla espresso in unità di SPAD (Fig. 9);



Figura 9. SPAD 502 Plus

Lo strumento Dualex, un sensore ottico sviluppato da Force-A, ha permesso la valutazione del contenuto di flavonoli, antociani e clorofilla nelle foglie. Il sensore consente di eseguire misurazioni in tempo reale e non distruttive (Fig. 10). Questo indice è utilizzato per valutare lo stato di salute delle piante e la qualità nutrizionale, nonché per monitorare lo stress delle colture. La procedura è effettuata in campo e permette una valutazione rapida e non distruttiva del contenuto biochimico delle foglie.



Figura 10. Misurazione dell'indice Dualex su una foglia di lattuga.

LI-COR (LI-600), uno strumento non invasivo che permette di ottenere le informazioni necessarie in pochi secondi, pinzando una foglia rappresentativa della vegetazione. Il dispositivo permette di registrare i dati che sono stati acquisiti e successivamente scaricarli sul computer per effettuare le elaborazioni necessarie. Con il LI-COR sono stati monitorati tre parametri fisiologici:

- 1) conduttanza stomatica ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);
- 2) traspirazione ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);
- 3) fluorescenza (PhiPS2).

La conduttanza stomatica indica la resistenza opposta dagli stomi al passaggio del vapore acqueo verso l'esterno e della CO_2 verso l'interno, seguendo i gradienti di concentrazione. Il flusso di CO_2 entrante e di vapore acqueo uscente dipende dalla densità e dall'apertura degli stomi, quest'ultima regolata da fattori ambientali e biochimici (ad esempio, l'acido abscissico prodotto dalle radici come segnale di stress, che riduce il contenuto idrico nel suolo e porta alla diminuzione della pressione di turgore delle cellule di guardia). Quando la pianta effettua scambi gassosi, si verifica una perdita di acqua. La traspirazione è controllata dalla conduttanza stomatica, che rappresenta la perdita di vapore acqueo attraverso gli stomi per facilitare gli scambi gassosi, ridurre la temperatura della superficie fogliare e consentire l'assorbimento dell'acqua da parte delle radici. La fluorescenza, insieme al calore, è una strategia che la pianta utilizza durante la fotosintesi per dissipare l'eccesso di energia non processata dai fotosistemi I e II, una volta raggiunta la capacità fotosintetica massima. In condizioni normali, la fluorescenza si attesta intorno al 3-5%, ma aumenta in presenza di inefficienze. Il LI-COR è stato impiegato per osservare queste tre caratteristiche fisiologiche della coltura in corso, valutando le differenze rilevabili in base alla diversa quantità di acqua somministrata e ai differenti tipi di concimazione utilizzati nelle due principali sperimentazioni.

Inoltre, al fine di valutare l'accrescimento settimanale della coltura, sono state pesate le singole piante. Per valutare il solo accrescimento della parte ipo- epigea, senza prendere in considerazione il peso del substrato e del contenitore, è stato posto come punto zero il primo rilievo. I dati sono dunque riportati come accrescimento in grammi dal punto zero.

3.6 Rilievi fotografici

Sono stati eseguiti rilievi fotografici delle piante campione selezionate da ciascuna parcella e replica per documentare l'accrescimento della copertura fogliare delle piante sotto i diversi trattamenti di soluzione nutritiva. Le fotografie sono state elaborate poi con il software *Foliage* per valutare l'evoluzione della canopy nel corso del ciclo di crescita. Questo approccio ha fornito un registro visivo dettagliato, integrando l'analisi qualitativa con i dati quantitativi raccolti in laboratorio per una valutazione completa degli effetti dei trattamenti sulla crescita delle piante di lattuga.

#	Original	Classified	Vegetation	Filename	Cover	Lat	Lon	Altitude
1			other	CTR 2 BL1.jpg	33.2	45.344359	11.953185	

Figura 11. Evoluzione della canopy cover analizzata tramite software: Foliage. Nella prima colonna sono illustrate le immagini catturate di ogni campione, nella seconda colonna è rappresentata l'area analizzata e, successivamente, la percentuale di canopy che ricopre ciascuna figura.

3.7 Rilievo distruttivo: biomassa aerea e radicale

Al raggiungimento della biomassa commerciale è stato effettuato il rilievo distruttivo volto a quantificare la biomassa aerea e radicale delle piante di lattuga soggette ai diversi trattamenti di soluzione nutritiva.

La biomassa aerea è stata pesata per valutare la massa totale delle parti vegetative. Successivamente, le radici sono state pulite per rimuovere eventuali residui e pesate per determinare la biomassa radicale.

3.8 Analisi qualitative in laboratorio

Sono state effettuate diverse analisi qualitative in laboratorio sulla lattuga per valutare le differenze tra i quattro trattamenti di soluzione nutritiva.

Le analisi qualitative hanno riguardato la determinazione della sostanza secca delle foglie, le quali sono state pesate e successivamente messe in stufa a 65°C per 48 ore. Al termine del processo di essiccazione il campione è stato nuovamente pesato ottenendo così la quantità di acqua che è evaporata e quindi per differenza si è ottenuta la quantità di sostanza secca.

Uno dei due campioni precedentemente congelati è stato scongelato al fine di ottenere il succo cellulare contenuto all'interno di foglie, tale succo è stato utilizzato per le analisi di seguito descritte. Una aliquota è servita per la determinazione del contenuto di solidi solubili (° Brix), che è stata effettuata tramite rifrattometro portatile digitale HI 96801 Hanna Instruments; uno strumento che utilizza la misura dell'indice di rifrazione per determinare il contenuto zuccherino.

Parte del succo è stata inoltre prelevata per eseguire le analisi di pH e conducibilità elettrica (EC) tramite pHmetro-conduttivimetro portatile, modello H19811.

L'acidità titolabile è stata determinata secondo la metodologia standard ISO 750:1998 (E) tramite il titolatore automatico Titrex Act (Steroglass). Il volume di soda necessario al raggiungimento del punto di flesso (pH 8.2) è stato utilizzato nella seguente formula:

$$Z = [(V * N * mEqwt) / Y] * 100$$

dove:

Z= g di acido per 100 g di campione

V= volume in mL di NaOH usata per la titolazione N= normalità di NaOH

mEqwt= milliequivalenti di acido (0.064 Ac.citrico) Y= volume in mL di campione

La determinazione dell'attività antiossidante e dei fenoli totali ha previsto l'impiego delle metodiche indicate da Kang et al. (2002) che riprendono quelle di Ke e Saltveit (1989), Singleton e Rossi (1965) e Benzie e Strain (1996) con opportuni aggiustamenti per adattare le metodiche alla matrice da analizzare. Prima di procedere con le analisi, il campione precedentemente congelato è stato posto in liofilizzatore. Il campione ottenuto è stato finemente macinato così da ottenere una polvere. La determinazione dell'attività antiossidante e dei fenoli totali ha previsto la pesata di 0.5 g di campione liofilizzato macinato ai quali sono stati aggiunti 20 mL di metanolo (per HPLC); il campione è stato filtrato con carta da filtro (589 Schleicher diametro 125 mm). L'attività antiossidante è stata determinata con il metodo FRAP (FerricReducingAbility of Plasma). Il reagente FRAP (soluzione 1 mM di 2,4,6- tripiridil-2 triazina [TPTZ], 2 mM cloruro ferrico e 250 mM di acetato di sodio a pH 3.6) è stato preparato giornalmente a partire da soluzioni madri di 300 41 mM di buffer acetato, 12 mM di TPTZ (in acido cloridrico 48 mM) e 24 mM di cloruro ferrico in rapporto 10:1:1. A 100 µL di estratto sono stati aggiunti 1900 µL di reagente FRAP e si è omogeneizzato con l'ausilio di un vortex; dopo 4' a 20 °C è stata letta l'assorbanza a 593 nm (Shimadzu UV-1800). La lettura è stata confrontata con una curva di calibrazione costituita da soluzione di solfato di ammonio ferroso con

concentrazione da 0 a 1200 $\mu\text{g mL}^{-1}$ di ione ferroso. L'attività antiossidante è stata quindi successivamente espressa come mg di Fe^{2+} equivalenti (Fe^{2+}E) per kg di campione secco o fresco. Per la determinazione dei fenoli, invece, si sono prelevati 200 μL dell'estratto, si sono aggiunti 1000 μL di reattivo di Folin-Ciocalteu e 800 μL di carbonato di sodio anidro al 7.5 %. Si è quindi proceduto con 15" di agitazione e successivo riposo per 30' a temperatura ambiente prima di leggere allo spettrofotometro ad una lunghezza d'onda di 765 nm (Shimadzu UV-1800). L'assorbanza è stata confrontata con quella letta per soluzioni a concentrazione nota di acido gallico (da 0 a 300 $\mu\text{g mL}^{-1}$) che hanno subito lo stesso procedimento dei campioni. Il contenuto totale di fenoli è stato espresso come mg di ac. gallico equivalenti (GAE) per kg di campione fresco o secco.

Infine, sono state misurate le clorofille per quantificare i pigmenti fotosintetici, fondamentali per la fotosintesi, valutando così la salute e il vigore delle piante.

La misura analitica del contenuto di clorofilla è stata eseguita seguendo la metodica proposta da Wellburn e Lichtenthaler (1984). La metodologia prevede l'estrazione della clorofilla dai tessuti vegetali con etanolo (96 %) con un rapporto 0.1:10 (g) tra tessuto vegetale ed etanolo.

Nella prova sono stati utilizzati 0.10 g di campione di foglia liofilizzata e macinata, e 20 mL di etanolo. Le provette contenenti il campione ed etanolo sono state poi avvolte in carta stagnola, e poste in cella frigo (4 °C). Passate 24 ore si è eseguita la lettura dell'assorbanza della clorofilla ad una lunghezza d'onda di 665 e 649 nm, con l'utilizzo dello spettrofotometro modello Ultrospec 2000 (Pharmacia Biotech, Cambridge, England).

I contenuti di clorofilla *a* e *b*, espressi in $\mu\text{g/mL}$, carotenoidi e xantofille, sono stati calcolati utilizzando le seguenti formule:

$$\text{ChlA} = 13.95 \times A_{665} - 6.88 \times A_{649} \quad (\text{clorofilla A})$$

$$\text{ChlB} = 24.96 \times A_{649} - 7.32 \times A_{665} \quad (\text{clorofilla B})$$

$$C_{X+C} = \frac{(1000 \times A_{470} - 2.05 \times \text{ChlA} - 114.8 \times \text{ChlB})}{245}$$

Per ottenere le concentrazioni in $\mu\text{g/g}$ è stato poi moltiplicato per i mL e diviso per i grammi di campione.

3.9 Analisi statistica

I trattamenti sono stati disposti in serra utilizzando un disegno sperimentale a blocchi randomizzati con 3 repliche. Per investigare l'effetto dei fattori allo studio (Controllo - CTR, Compost Tea tal quale - CTE, Compost Tea corretto - CTC e compost tea corretto arricchito con aria ionizzata - CTCJ) sulla fisiologia, i tratti morfologici e la biomassa della specie coltivata, è stata effettuata un'analisi della varianza ANOVA a una via. I dati sono stati presentati come medie dei minimi quadrati e errore standard, e un confronto multiplo delle medie dei minimi quadrati è stato eseguito utilizzando il test post hoc di Tukey HSD. Per l'elaborazione statistica è stato utilizzato il software Statgraphics 19 centurion (Statgraphics Technologies, Inc).

4. Risultati

In questa prima sezione dei risultati, successivamente ai dati meteorologici, vengono presentati i dati relativi ad aspetti qualitativi, quantitativi e morto-ponderali al fine di descrivere chiaramente la panoramica di produzione delle piante.

Di seguito saranno riportati i risultati per ognuno dei quattro trattamenti della soluzione nutritiva:

- CTR: controllo (con macroelementi e microelementi somministrati attraverso concimi)
- CTE: compost tea tal quale (diluito con acqua per il raggiungimento dell'EC target)
- CTC: compost tea corretto (aggiunta di concime finalizzata ad implementare le carenze nutrizionali)
- CTCJ: compost tea corretto trattato con aria ionizzata.

4.1 Estrazione del compost tea

La figura 12 descrive, per ogni rapporto di diluizione, il contenuto (in mg) dei diversi minerali. Il rapporto di diluizione scelto per il compost è di 1:5, quindi i valori di riferimento sono i seguenti:

- **Cloruri:** 1175,3 mg
- **Nitriti:** 12,9 mg
- **Nitrati:** 70,0 mg
- **Fosfati:** 9,3 mg
- **Solfati:** 4338,7 mg
- **Sodio:** 1127,3 mg
- **Ammonio:** 164,5 mg
- **Potassio:** 1897,0 mg
- **Magnesio:** 97,1 mg
- **Calcio:** 484,5 mg

La tabella 8 evidenzia una tendenza generale: a rapporti di estrazione minori, i minerali sono più concentrati, mentre a rapporti più elevati la loro concentrazione diminuisce significativamente. Questo suggerisce che il rapporto di diluizione influisce direttamente sulla disponibilità e sulla concentrazione dei minerali nell'ambiente di test, fornendo importanti informazioni sulle dinamiche di diluizione e concentrazione dei nutrienti.

Tabella 8. Contenuto dei minerali (cloruri, nitrati, fosfati, solfati, sodio, ammonio) espressi in milligrammi per litro (mg/L) ai diversi rapporti di estrazione: 1:2,5 - 1:5 - 1:10, per diverse ore.

	Nitrati	Ammonio	Fosfati	Potassio	Solfati	Calcio	Magnesio	Sodio	Cloruri
	mg/L								
1:2,5 24h	147,8	399,7	15,2	4257,6	8984,3	735,4	186,7	2569,6	2738,0
1:2,5 48h	132,6	358,6	12,4	4120,1	8705,3	710,1	186,7	2499,2	2656,4
1:2,5 72h	135,3	353,3	12,2	4416,7	9242,5	779,1	201,0	2680,7	2841,2
1:5 24h	62,6	156,3	9,1	1718,0	3821,9	384,6	86,0	1027,1	1085,5
1:5 48h	63,4	180,8	10,2	1966,5	4546,9	508,8	100,5	1160,8	1208,3
1:5 72h	83,9	156,5	8,6	2006,5	4647,4	560,0	104,7	1193,9	1232,0
1:10 24h	42,6	98,2	6,6	1057,6	2264,0	214,5	45,0	629,0	628,7
1:10 48h	44,3	99,3	6,5	1150,5	2521,4	262,6	51,0	675,3	679,3
1:10 72h	37,6	101,9	6,4	1070,4	2355,6	259,4	49,7	635,2	637,4

4.2 Andamento meteorologico

La figura 12 mostra l'andamento della temperatura (T, in °C) e dell'umidità relativa (RH, in %) nel tempo, indicato in giorni (GDS).

La temperatura durante il periodo di osservazione segue un andamento caratterizzato da variazioni significative. Inizialmente, si parte da una media di circa 18°C e gradualmente si registra un aumento fino a raggiungere un picco di circa 25°C intorno al 13° giorno. Questo rappresenta il punto più alto nel periodo considerato. Tuttavia, dopo il picco, c'è un repentino calo verso i 18°C intorno al 19° giorno, seguito da un nuovo incremento fino a un massimo di circa 24°C intorno al 26° giorno. Successivamente, si osservano alcune fluttuazioni nei giorni successivi, ma l'andamento generale mostra una tendenza al rialzo con variazioni significative lungo tutto il periodo analizzato.

Per quanto riguarda l'umidità relativa, inizia intorno al 60% e presenta una leggera diminuzione con fluttuazioni nel corso del tempo. Varia generalmente tra il 50% e il 70%, con oscillazioni più marcate intorno al 21° e al 33° giorno. Nonostante queste variazioni, l'umidità relativa rimane relativamente stabile intorno al 60-70% per la maggior parte del periodo considerato, indicando una certa consistenza nella sua distribuzione nel corso delle settimane osservate.

Generalmente, si osserva che quando la temperatura aumenta, l'umidità relativa tende a diminuire leggermente, e viceversa. Questo comportamento è coerente con il fatto che l'aria calda può contenere più vapore acqueo; quindi, l'umidità relativa diminuisce con l'aumento della temperatura se l'apporto di umidità non aumenta proporzionalmente.

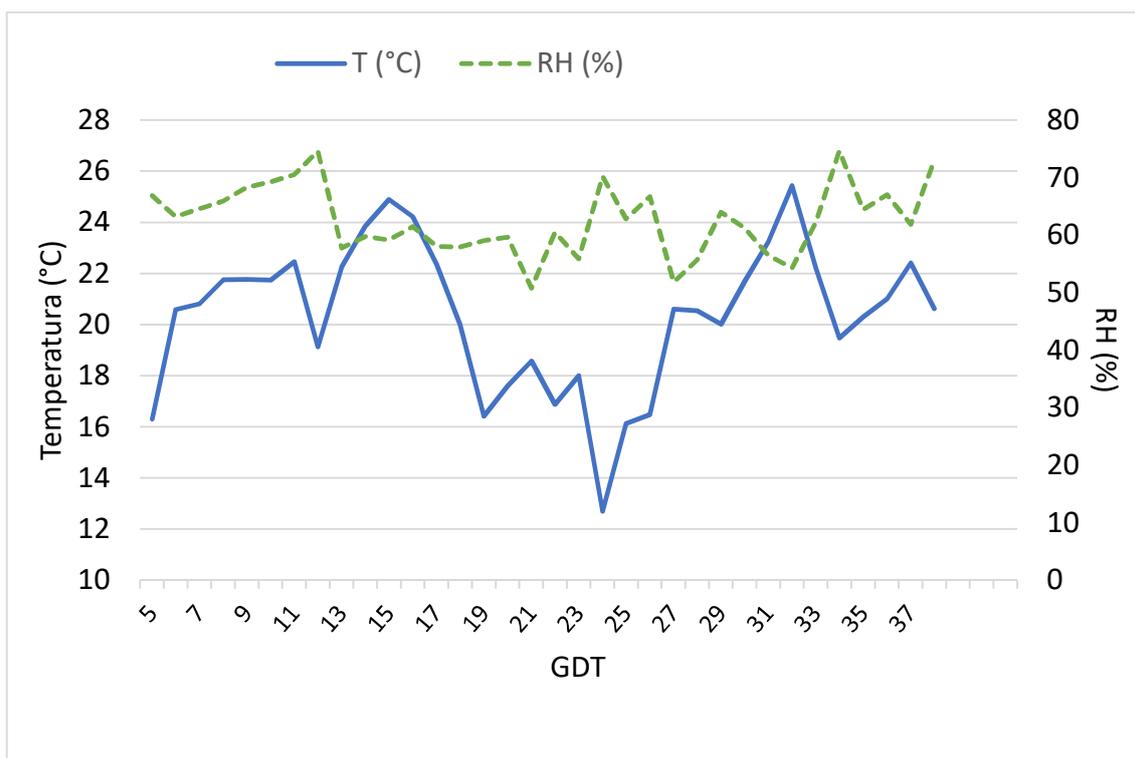


Figura 12. Andamento dei parametri ambientali di temperatura (°C) e umidità relativa (RH %) durante il periodo di sperimentazione indicato come giorni dal trapianto (GDT)

4.3 Soluzione nutritiva

- **Andamento del pH**

In figura 13 è rappresentato l'andamento del pH della soluzione nutritiva durante il ciclo colturale. Nel trattamento CTR, il pH è variato da un valore di 6.50 il 2 aprile, mantenendosi stabile fino al 5 aprile. Successivamente, ha iniziato a diminuire, raggiungendo 6.40 pH il 9 aprile e continuando a scendere fino a 5.27 il 26 aprile, per poi risalire leggermente a 6.13 il 2 maggio. Nel trattamento CTC, il pH ha seguito una tendenza simile, partendo da 6.57 il 2 aprile e mantenendosi relativamente stabile fino al 5 aprile, con una lieve discesa fino a 5.63 il 19 aprile, prima di risalire a 6.70 il 2 maggio. Per CTE il pH è risultato inizialmente più alto, 7.73, mantenendosi fino al 5 aprile, per poi diminuire fino a 5.27 il 26 aprile e stabilizzandosi intorno a 5.27-5.37 alla fine del ciclo. Infine, il trattamento CTCJ ha avuto un pH iniziale di 6.60, mantenendosi stabile fino al 5 aprile, e poi scendendo a 5.63 il 19 aprile, con una lieve risalita a 6.47 il 2 maggio.

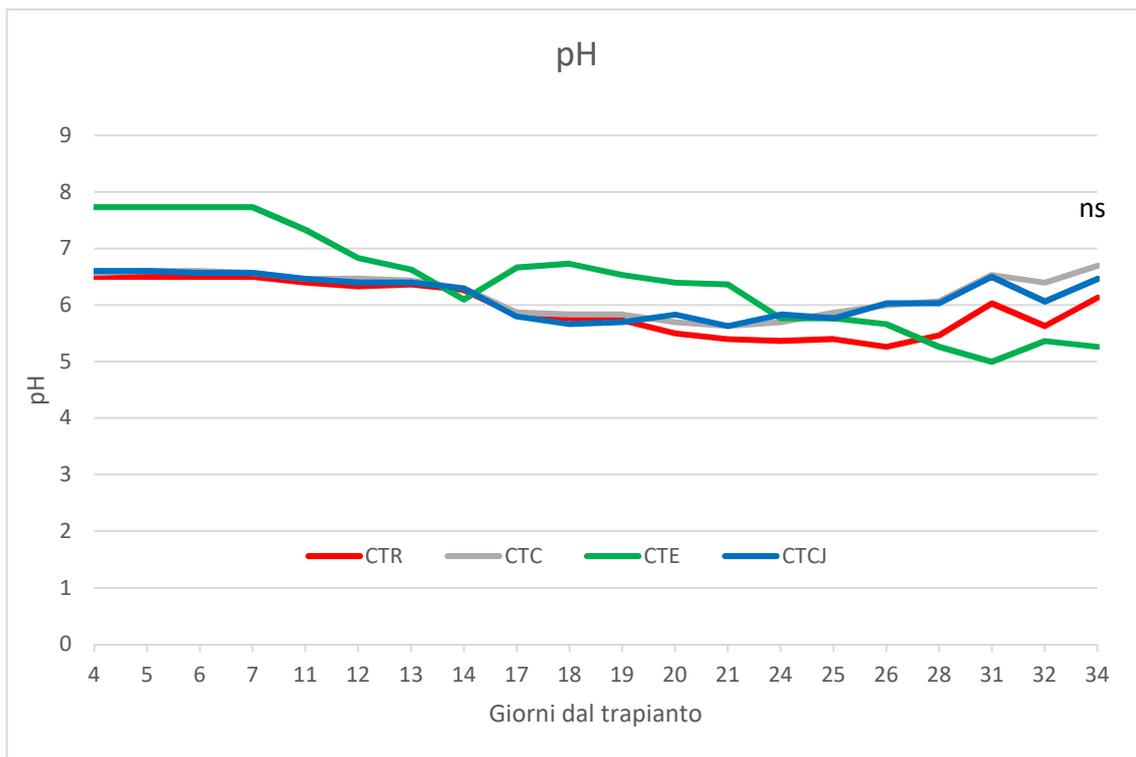


Figura 13. Andamento del pH nella soluzione nutritiva, per i quattro trattamenti nel corso del ciclo colturale.

- **Andamento della conducibilità elettrica (EC)**

Durante il ciclo colturale, la conducibilità elettrica (EC) della soluzione nutritiva nei quattro trattamenti ha mostrato diverse tendenze (Fig. 14). Nel trattamento CTR, l'EC ha presentato valori iniziali pari a 2.45 dS/cm il 2 aprile, mantenendosi relativamente stabile fino al 5 aprile, con una leggera diminuzione a 2.39 dS/cm il 9 aprile e continuando a scendere fino a 2.21 dS/cm il 26 aprile, per poi risalire leggermente a 2.19 dS/cm il 2 maggio. Nel trattamento CTC, l'EC ha seguito una tendenza simile, partendo da 2.44 dS/cm il 2 aprile e mantenendosi relativamente stabile fino al 5 aprile, con una leggera discesa a 2.25 dS/cm il 26 aprile, prima di risalire a 2.23 dS/cm il 2 maggio. Il trattamento CTE ha iniziato con un'EC di 2.39 dS/cm, mantenendosi stabile fino al 5 aprile, con alcune fluttuazioni ma generalmente rimanendo intorno ai 2.38-2.40 dS/cm per tutto il periodo, con un picco a 2.46 dS/cm il 29 aprile. Infine, il trattamento CTCJ ha avuto un'EC iniziale di 2.41 dS/cm, mantenendosi stabile fino al 5 aprile, poi scendendo a 2.25 dS/cm il 26 aprile, con una leggera risalita a 2.29 dS/cm il 2 maggio.

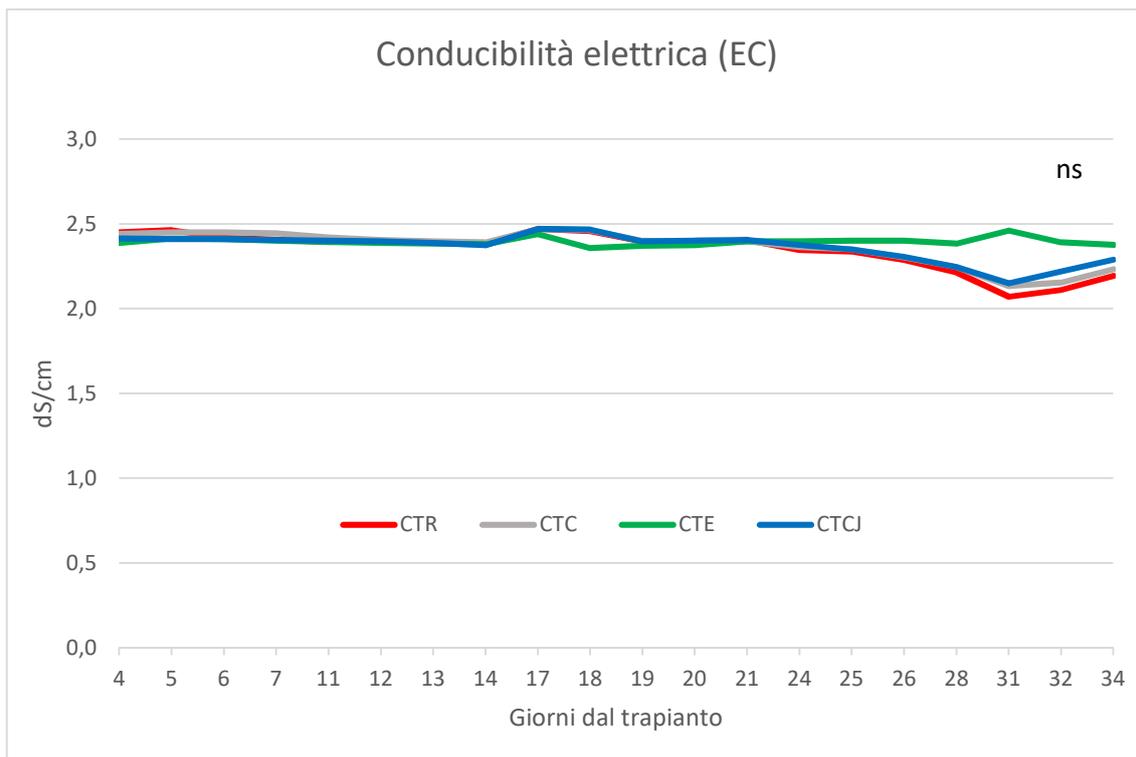


Figura 14. Andamento della conducibilità elettrica (EC) nella soluzione nutritiva (dS/cm), per i quattro trattamenti nel corso del ciclo colturale.

- **Andamento del contenuto di ossigeno disciolto**

Il contenuto di ossigeno disciolto è risultato inizialmente in sensibile aumento fino all'11 aprile (Fig. 15), con valori tra 9.57 e 12.70 per il trattamento CTR, tra 9.58 e 12.40 per CTC, tra 9.51 e 12.60 per CTE, e tra 9.56 e 12.48 per CTCJ. Successivamente, si verifica una tendenza alla diminuzione verso la fine di aprile, con letture che si attestano intorno a 8.69 per CTR, 8.64 per CTC, 8.74 per CTE, e 8.71 per CTCJ.

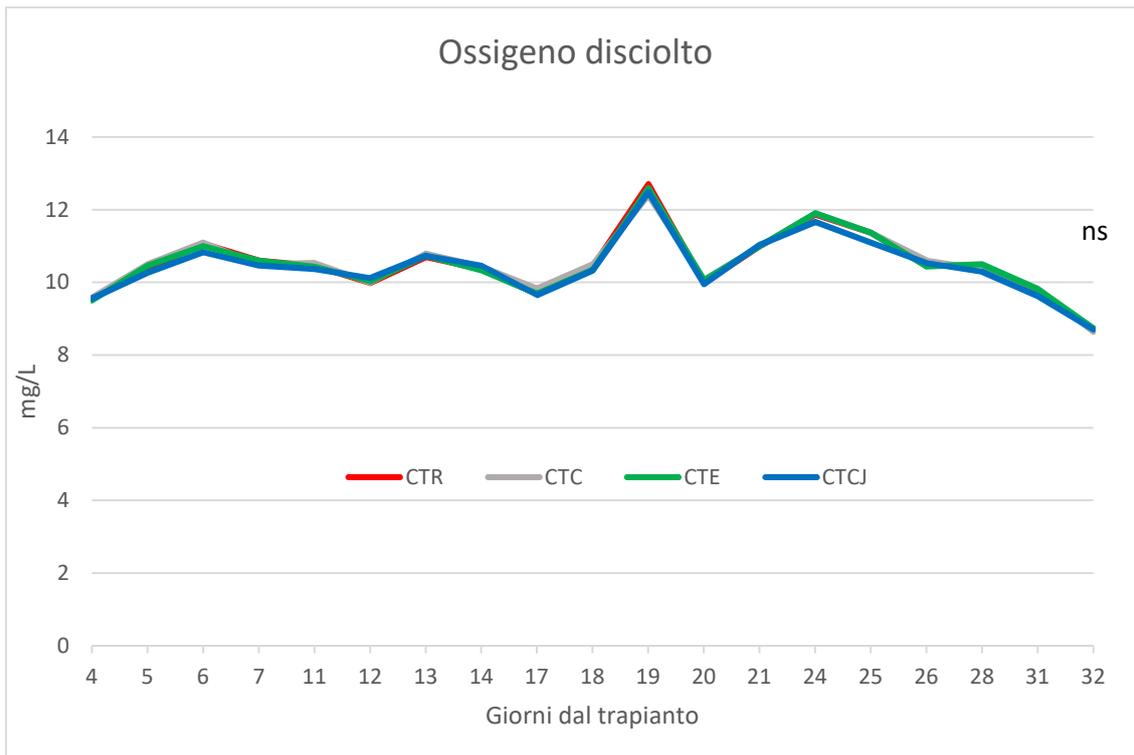


Figura 15. Andamento dell'ossigeno disciolto, misurato in mg/L nella soluzione nutritiva per i quattro trattamenti, nel corso del ciclo colturale.

- **Andamento della temperatura**

La temperatura della soluzione nutritiva è variata tra 14.03 e 22.17 °C per il trattamento CTR, tra 14.03 e 22.00 per CTC, tra 14.23 e 22.27 per CTE, e tra 14.20 e 22.07 per CTCJ (Fig. 16). Si osserva una certa variabilità nei valori giornalieri, con picchi registrati il 15 aprile per CTR (21.13°C), il 12 aprile per CTC (19.53°C), il 15 aprile per CTE (21.30°C), e il 12 aprile per CTCJ (21.27°C). Le temperature tendono generalmente a aumentare verso la metà del mese di aprile, stabilizzandosi poi intorno ai valori più alti registrati nelle fasi finali del ciclo colturale.

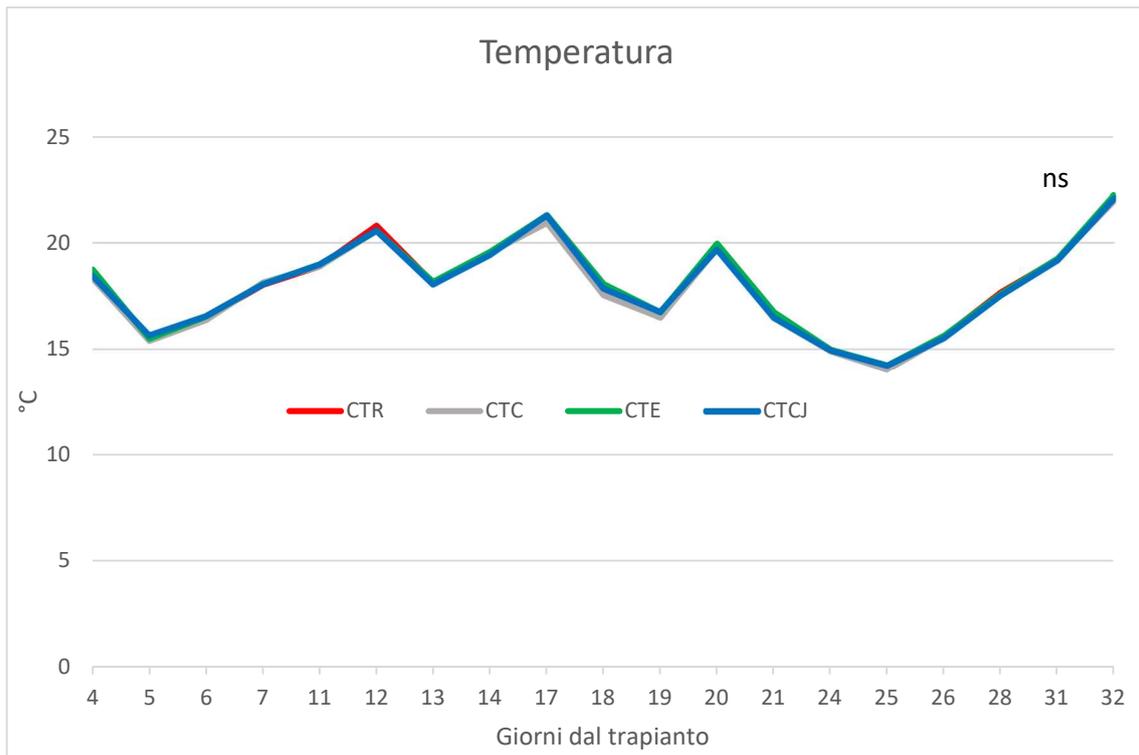


Figura 16. Andamento della temperatura della soluzione nutritiva, espressa in gradi Celsius (°C) per i quattro trattamenti, nel corso del ciclo colturale.

- **Efficienza d'uso dell'acqua**

La figura 17 evidenzia l'efficienza dell'uso dell'acqua espressa in termini di chilogrammi di biomassa commerciale prodotta per litro d'acqua utilizzata, per quattro diversi trattamenti. Il trattamento CTR segue da vicino, con un'efficienza leggermente inferiore ma comunque vicina a 0,09 kg/L. Il trattamento CTCJ si posiziona al terzo posto, con un valore attorno a 0,07 kg/L, evidenziando una discreta efficienza nell'uso dell'acqua. Infine, il trattamento CTE mostra l'efficienza più bassa, con un valore che si aggira intorno a 0,03 kg/L.

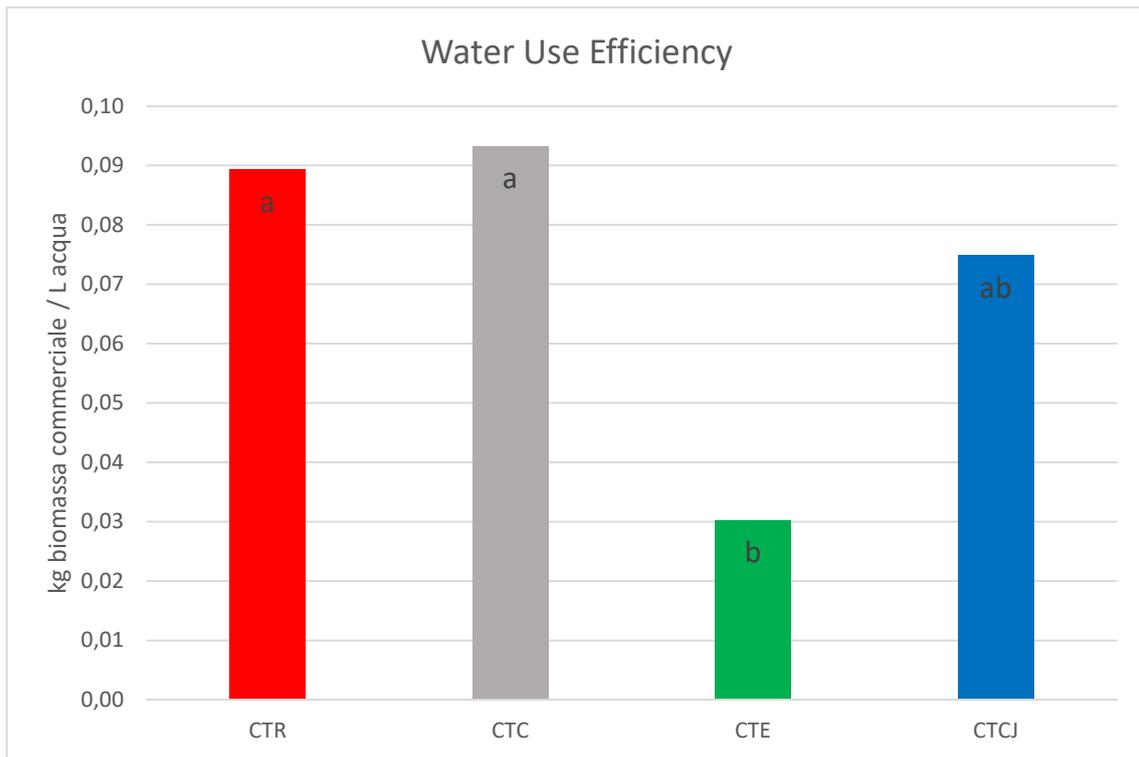


Figura 17. Efficienza d'uso dell'acqua (WUE), espressa in kg di lattuga fresca prodotta per litro (L) di acqua utilizzato.

Analizzando i dati in relazione alla sostanza secca (Figura 18), si può osservare che il trattamento CTC presenta la più alta efficienza, con un valore superiore a 0,005 kg di sostanza secca per litro d'acqua. Il trattamento CTR segue con un'efficienza attorno a 0,004 kg/L, dimostrando una buona capacità di conversione dell'acqua in sostanza secca. Il trattamento CTCJ si posiziona al terzo posto, con un valore vicino a 0,003 kg/L, mentre il trattamento CTE mostra l'efficienza più bassa, con un valore inferiore a 0,002 kg/L.

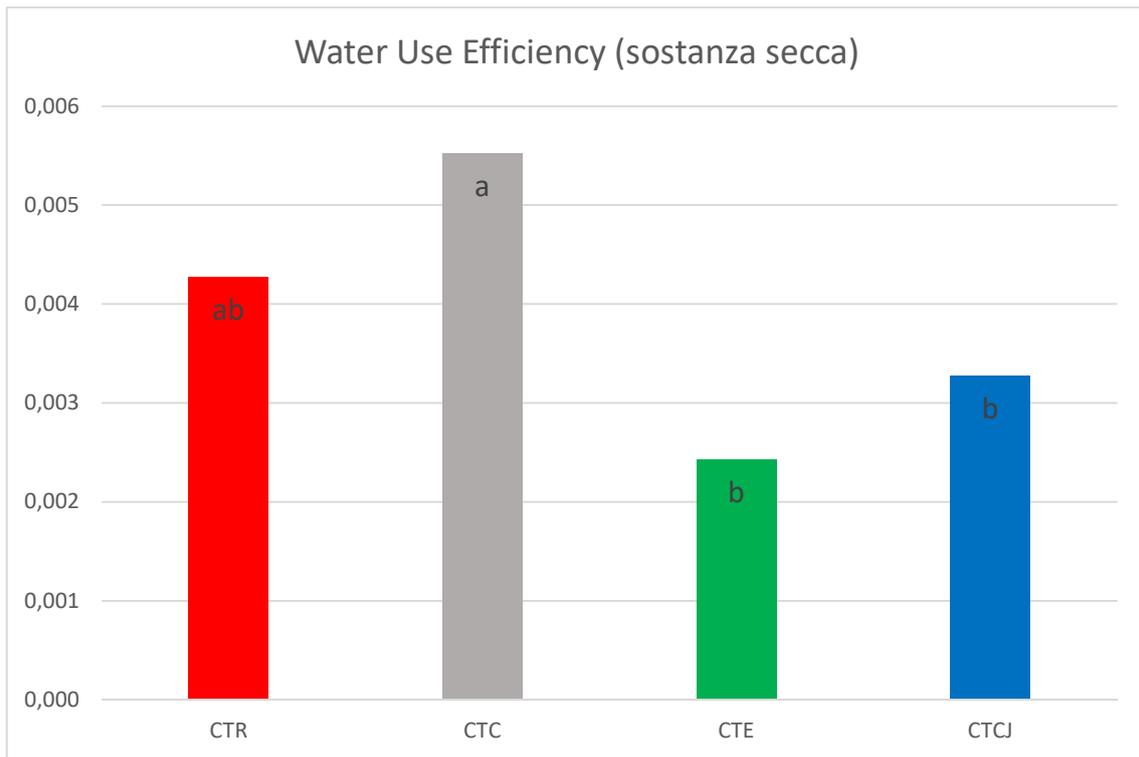


Figura 18. Efficienza d'uso dell'acqua (WUE), espressa in kg sostanza secca prodotta per litro (L) di acqua utilizzato.

4.4 Indici vegetativi

4.4.1 Indice SPAD

Lo stato nutrizionale della coltura, misurato come indice SPAD, ha mostrato variazioni significative durante il ciclo di coltivazione (Fig. 19). Nel primo rilievo (GDT 6), i trattamenti CTC (20.50) e CTE (20.37) hanno evidenziato un indice SPAD statisticamente maggiore rispetto agli altri due trattamenti (CTR = 19.16, CTCJ = 19.42). Dopo 11 GDT, i trattamenti CTR (24.48), CTC (24.93) e CTCJ (24.70) hanno mostrato un incremento nei valori di SPAD statisticamente significativi rispetto al trattamento CTE (22.99 a GDT 17). Quest'ultimo ha evidenziato valori più bassi dal 27 GDT fino alla raccolta (CTE: 25.92 a GDT 27 e 24.20 a GDT 32).

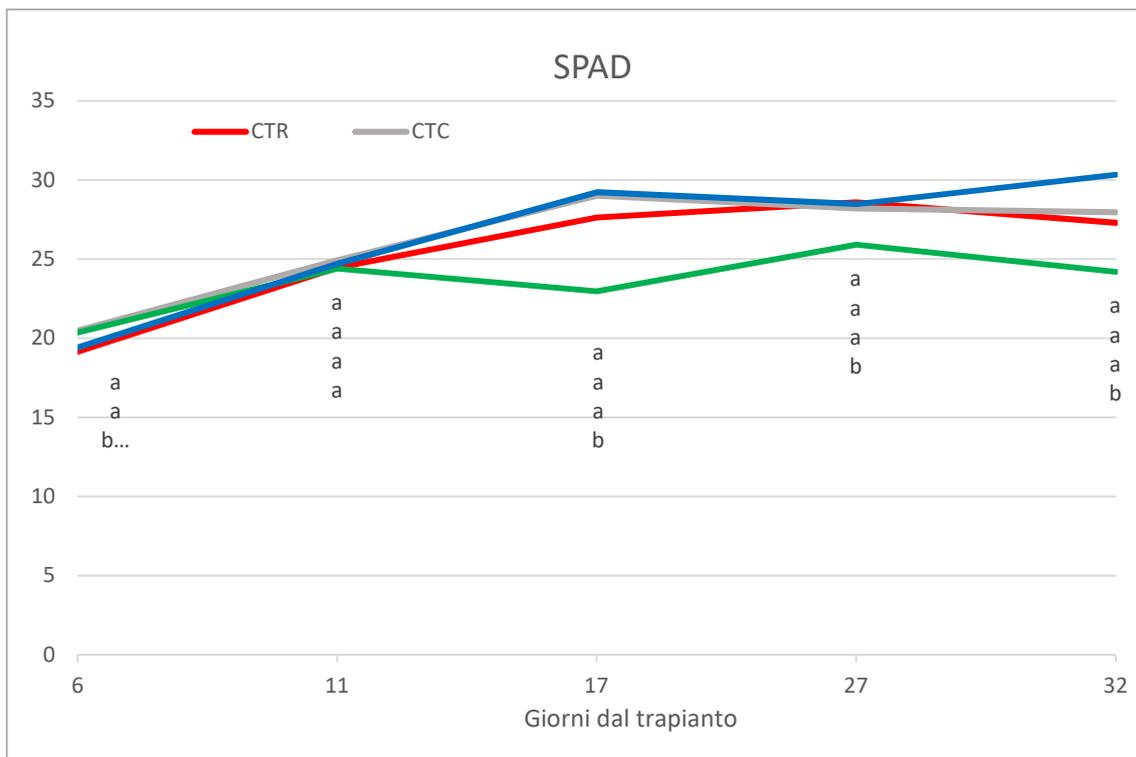


Figura 19. Andamento dell'indice SPAD per i quattro trattamenti studiati. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.4.2 Dualex

o Clorofille

Le concentrazioni di clorofilla rilevate nelle foglie di lattuga (Fig. 20) sottoposte ai diversi trattamenti non hanno mostrato differenze significative fino a 11 giorni dal trapianto (GDT). A 17 GDT, il trattamento CTC ha evidenziato valori statisticamente maggiori rispetto al trattamento CTE. In dettaglio, le concentrazioni di clorofilla sono aumentate rapidamente fino a 11 GDT per tutti i trattamenti, raggiungendo valori simili e senza differenze significative tra CTR, CTC, CTE, e CTCJ. A 17 GDT, tuttavia, il trattamento CTC ha mostrato una diminuzione meno pronunciata, mantenendo valori superiori rispetto a CTE, che ha mostrato una significativa diminuzione (etichettata con 'b'). Questa differenza nei valori di clorofilla tra i trattamenti CTC e CTE è stata confermata statisticamente, evidenziando l'efficacia del trattamento CTC nel mantenere elevate concentrazioni di clorofilla. Successivamente, a 27 e 32 GDT, le differenze tra i trattamenti si sono ridotte, con tutti i gruppi che mostrano una leggera diminuzione nei valori di clorofilla, ma senza differenze significative tra i trattamenti, sebbene il trattamento CTE abbia mantenuto valori leggermente inferiori rispetto agli altri.

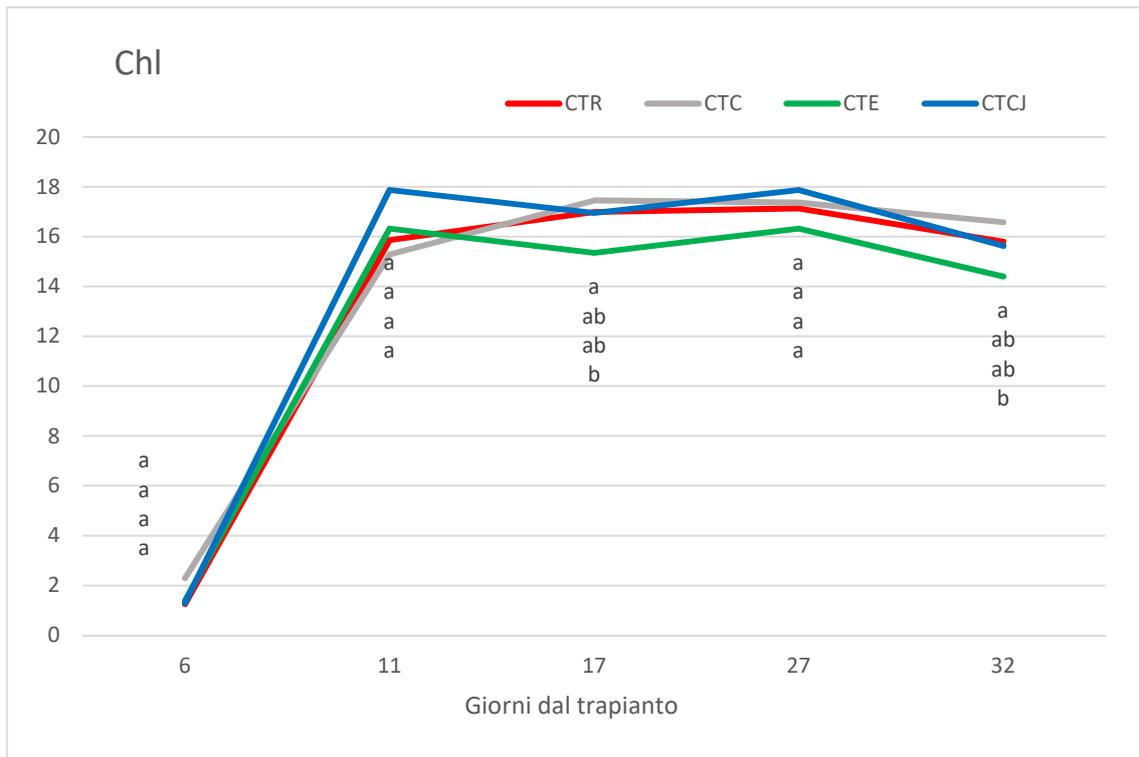


Figura 20. Andamento del parametro misurato con il DUALEX: Chl (clorofilla). Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

○ Antociani

Gli antociani, misurati durante il ciclo di coltivazione (Fig. 21), non hanno evidenziato differenze significative tra i trattamenti. Per il trattamento CTR, a 6 GDT i valori si sono attestati intorno a 0,08, aumentano a 0,26 il 9 GDT, poi diminuiscono leggermente a 0,23 il 15 GDT, e continuano a variare fino a 0,25 a 32 GDT. Questo suggerisce una certa stabilità generale con piccole variazioni nel corso del periodo osservato.

Nel trattamento CTC, gli antociani partono da 0,05 a 6 GDT, aumentano a 0,26 a 11 GDT, poi diminuiscono a 0,20 a 17 GDT, e si stabilizzano intorno a 0,24 a 27 e 32 GDT. Questo indica una tendenza alla stabilità dopo un picco iniziale. Per il trattamento CTE, gli antociani iniziano a 0,06 a 6 GDT, aumentano leggermente a 0,27 a 11 GDT, poi diminuiscono a 0,22 a 17 GDT, continuano a variare intorno a 0,22-0,25 a 27 e 32 GDT. Questo mostra una variazione modesta nel periodo osservato. Infine, nel trattamento CTCJ, la concentrazione di antociani è pari a 0,05 a 6 GDT, aumentano a 0,26 a 11 GDT, poi mostrano una variazione minima intorno a 0,24-0,26 a 17, 27 e 32 GDT. Questi dati indicano una relativa stabilità nei livelli di antociani nel corso del periodo osservato, con variazioni minime nel trattamento CTCJ.

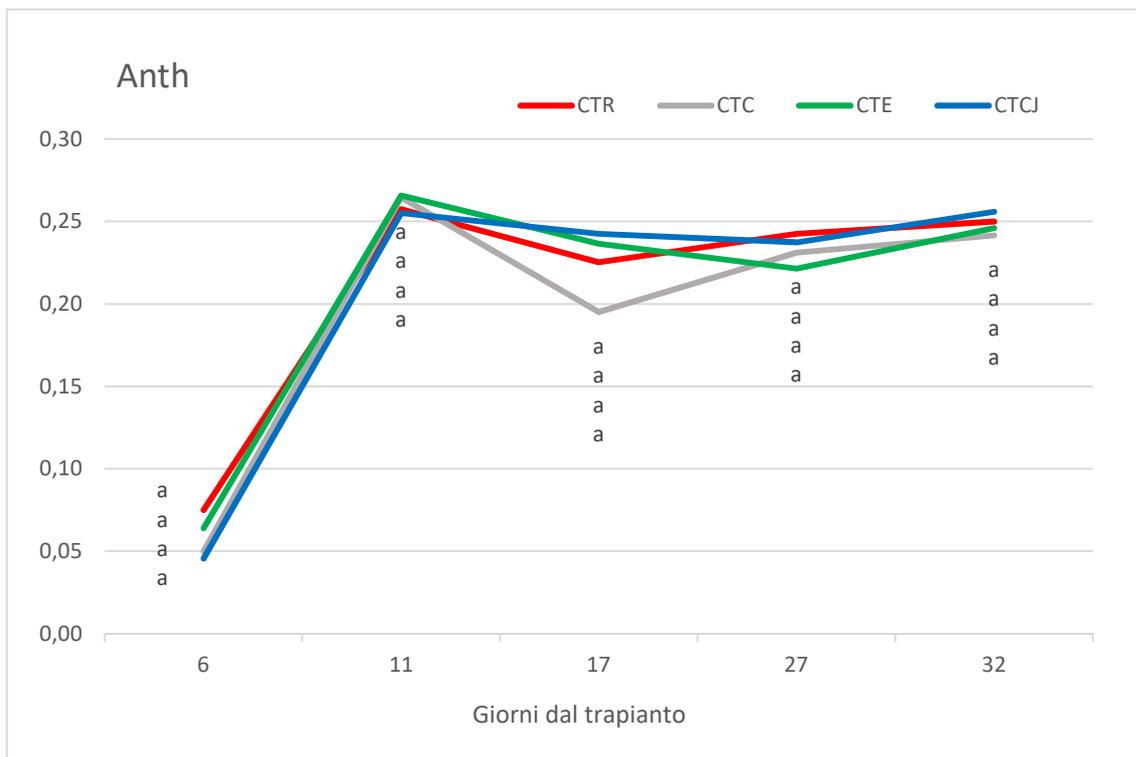


Figura 21. Andamento del parametro misurato con il DUALEX: Anth (antociani). Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

○ Flavonoidi

I flavonoidi, misurati attraverso diversi trattamenti nel corso del mese di aprile, mostrano variazioni interessanti nelle loro concentrazioni (Fig. 22).

Per il trattamento CTR a 6 GDT i valori sono pari a 0,11, aumentano a 0,57 a 11 GDT, poi diminuiscono a 0,54 a 17 GDT, continuano a diminuire a 0,42 a 27 GDT, stabilizzandosi infine a 0,36 a 32 GDT. Nel trattamento CTC, i flavonoidi partono da 0,20 a 6 GDT, scendono a 0,52 a 11 GDT, aumentano a 0,55 a 17 GDT, diminuiscono a 0,36 a 27 GDT e infine aumentano leggermente a 0,45 a 32 GDT. Questo mostra una variazione più complessa rispetto al CTR, con fluttuazioni significative nel periodo di osservazione. Per il trattamento CTE, i flavonoidi presentano un contenuto iniziale di 0,16 a 6 GDT, aumentano notevolmente a 0,74 a 11 GDT, poi scendono a 0,68 a 17 GDT, continuano a diminuire a 0,60 a 27 GDT, e leggermente a 0,58 a 32 GDT. Infine, nel trattamento CTCJ, i flavonoidi partono da 0,15 a 6 GDT, aumentano a 0,42 a 11 GDT, poi diminuiscono a 0,53 a 17 GDT, continuano a scendere a 0,40 a 27 GDT, e rimangono stabili a 0,40 a 32 GDT. Questi dati suggeriscono una variabilità moderata nei livelli di flavonoidi nel periodo osservato, con una tendenza generale alla stabilità verso la fine del ciclo culturale.

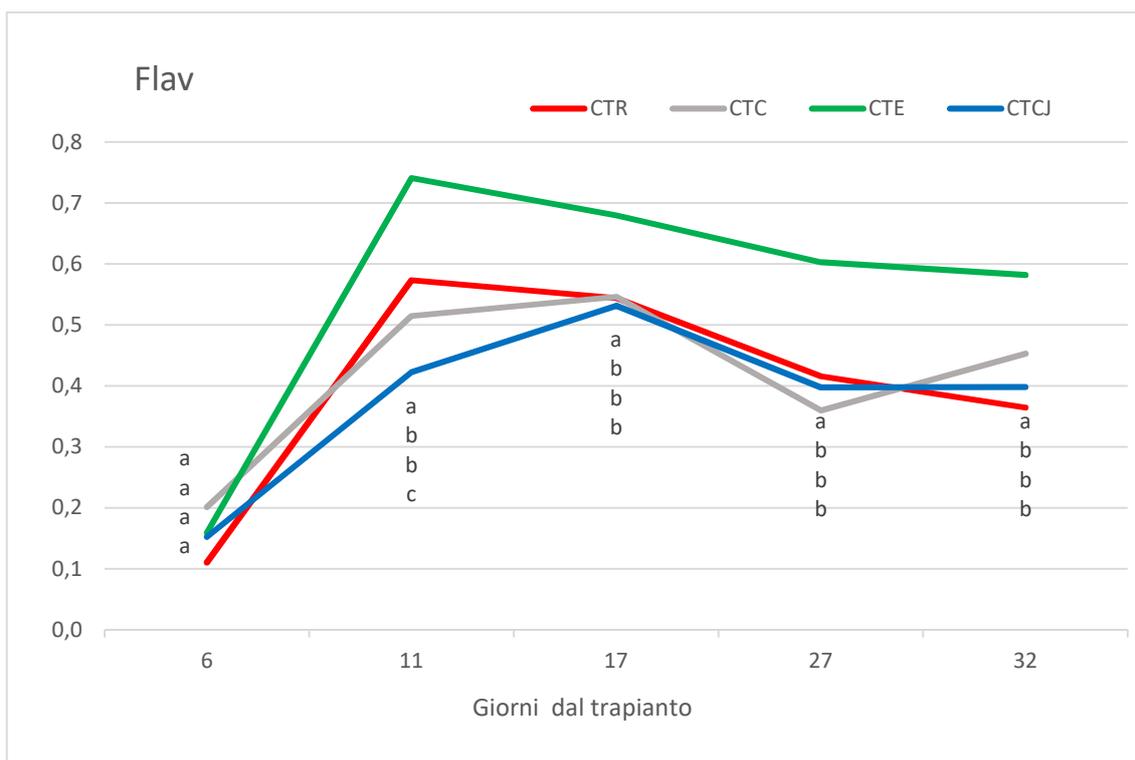


Figura 22. Andamento del parametro misurato con il DUALEX: Flav (flavonoidi). Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

○ Nitrogen Balance Index (NBI)

Per il trattamento CTR, l'NBI ha registrato valori di 4,36 a 6 GDT, aumentando a 30,62 a 11 GDT, poi ulteriormente a 33,39 a 17 GDT, fino a 44,90 a 27 GDT e infine a 46,07 a 32 GDT (Fig. 24). Nel trattamento CTC, l'NBI ha fornito valori iniziali di 3,90 a 6 GDT, è aumentato a 28,50 a 11 GDT, poi a 31,60 a 17 GDT, a 42,30 a 27 GDT, e infine a 44,50 a 32 GDT. Questo andamento mostra un incremento simile a quello osservato nel trattamento CTR, con una crescita costante dell'indice NBI. Per il trattamento CTE, l'NBI iniziale è stato di 4,00 a 6 GDT, è salito a 29,70 a 11 GDT, poi a 32,40 a 17 GDT, a 43,10 a 27 GDT e a 45,20 a 32 GDT. Anche in questo caso, si osserva un incremento progressivo dell'indice NBI nel corso del ciclo culturale. Infine, nel trattamento CTCJ, l'NBI ha registrato valori di 3,80 a 6 GDT, è aumentato a 27,90 a 11 GDT, poi a 30,50 a 17 GDT, a 41,80 a 27 GDT, e infine a 43,90 a 32 GDT. Questo andamento riflette un trend di crescita continua simile agli altri trattamenti, con variazioni nei valori di NBI che indicano cambiamenti nella vegetazione durante il periodo di crescita delle colture.

In generale, tutti i trattamenti hanno mostrato un incremento dell'indice NBI nel corso del ciclo culturale, suggerendo un aumento della biomassa o della copertura vegetale nel campo durante il

mezzo di aprile. CTE è risultato significativamente diverso ed ha sempre fornito valori inferiori rispetto agli altri trattamenti.

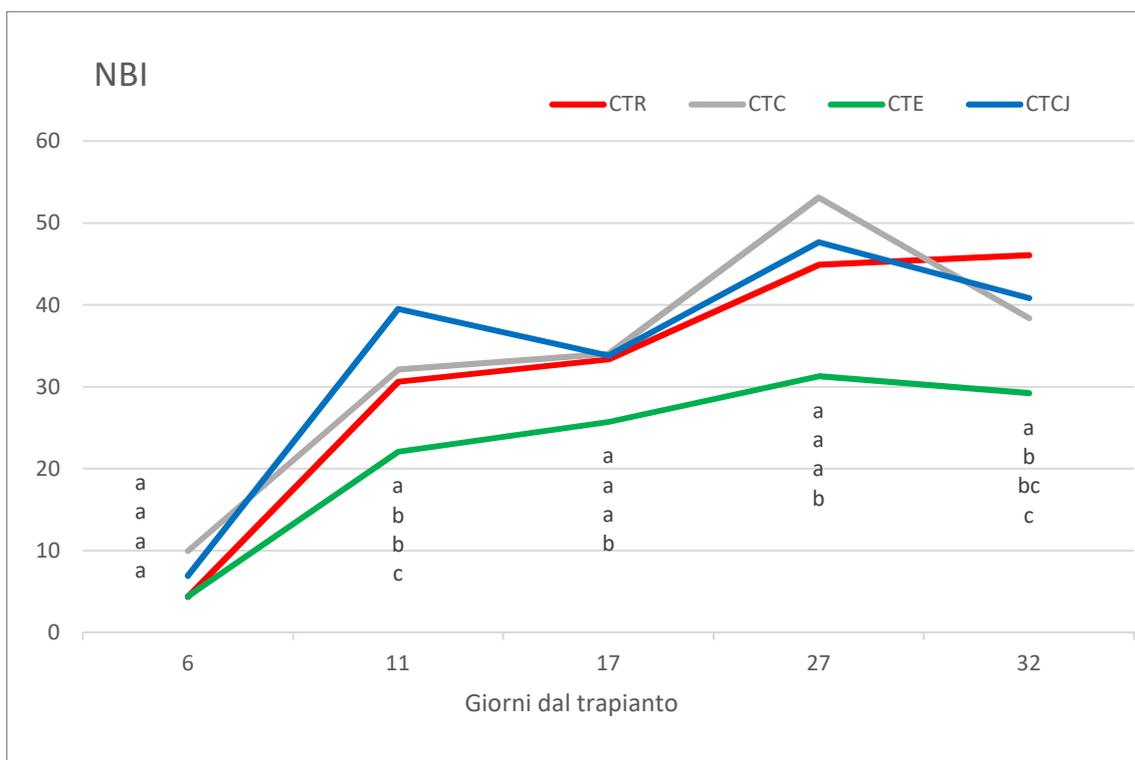


Figura 23. Andamento del parametro misurato con il DUALEX: NBI (Nitrogen Balance Index). Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.5 Canopy cover

Durante il periodo compreso tra il GDT 13 (11 aprile) e il GDT 31 (29 aprile), è stato osservato un aumento progressivo della canopy cover per i quattro trattamenti, come si evince dalla figura 24. Il trattamento CTR ha mostrato un incremento significativo, partendo da una copertura del 7.46% il GDT 13 (11 aprile) e raggiungendo un picco del 41.83% il GDT 31 (29 aprile). Analogamente, il trattamento CTC ha registrato valori iniziali più bassi, con una canopy cover del 7.13% il GDT 13 (11 aprile), crescendo fino al 35.73% il GDT 31 (29 aprile). Il trattamento CTE, invece, ha mostrato una crescita più moderata, con valori che sono aumentati dal 5.44% il GDT 13 (11 aprile) al 10.06% il GDT 31 (29 aprile). Infine, il trattamento CTCJ ha evidenziato una tendenza simile agli altri, con una copertura del 7.61% il GDT 13 (11 aprile) e un aumento fino al 34.18% il GDT 31 (29 aprile).

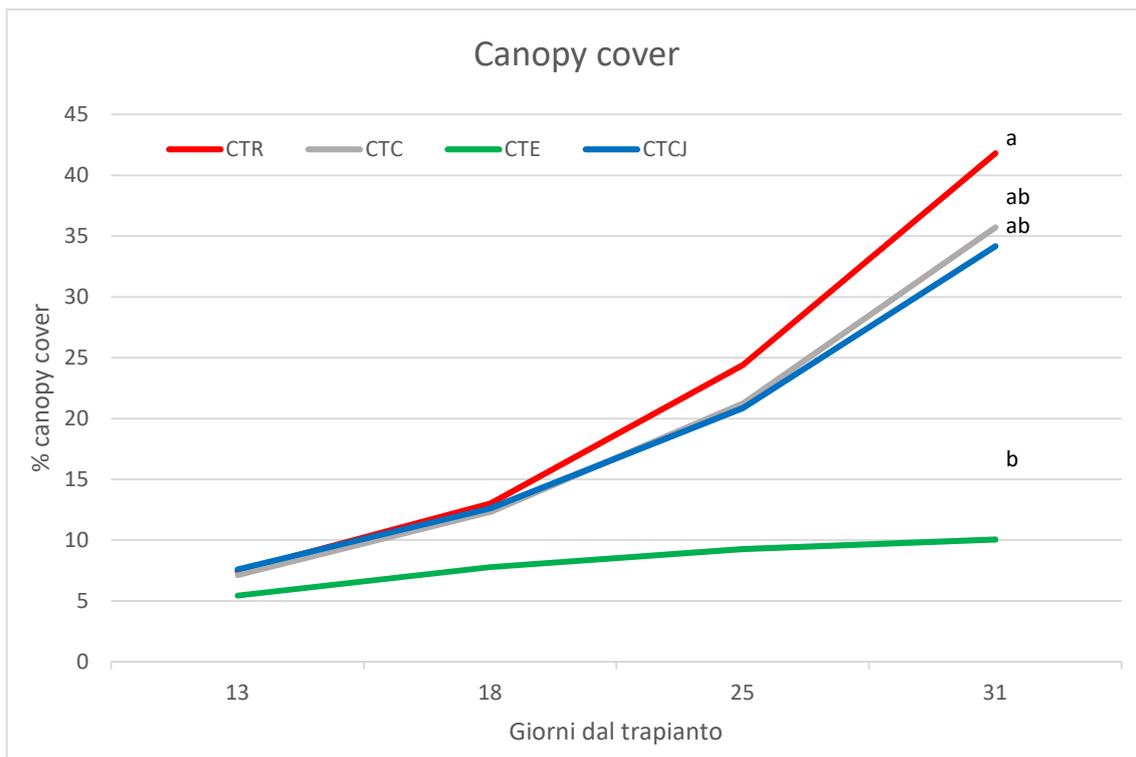


Figura 24. Andamento della canopy cover, espressa in percentuale (%) per i quattro trattamenti, nel corso del ciclo colturale.

4.6 Rilievi morfo-ponderali

4.6.1 Accrescimento

Nel trattamento CTR, il peso delle piante ha evidenziato un aumento progressivo: partendo da un valore iniziale non significativamente diverso dagli altri trattamenti a GDT 0, si registra un incremento a 143.36 grammi a GDT 6, che prosegue fino a raggiungere 366.07 grammi/pianta a GDT 17 (Fig. 25). In relazione a CTC, si osserva un pattern simile a CTR, con un valore ponderale finale pari a 337.73 grammi/pianta a GDT 17. Le differenze significative si manifestano principalmente a GDT 11 e 17, dove il CTC ha evidenziato un aumento superiore rispetto al CTE e al CTCJ.

Il trattamento CTE, che include il compost tea tal quale, ha presentato una crescita iniziale simile agli altri trattamenti, con un incremento a 139.03 grammi a GDT 6 e 200.89 grammi a GDT 11. Tuttavia, si evidenzia una differenza significativa rispetto al CTC a GDT 17, con un incremento finale di 221.59 grammi. Analogamente, il trattamento CTCJ ha espresso un peso finale pari a 333.08 grammi/pianta a GDT 17, con una crescita che non risulta significativamente diversa dagli altri trattamenti fino a GDT 17.

In sintesi, i trattamenti CTC e CTCJ evidenziano una crescita vegetativa significativamente superiore rispetto al CTE a partire da metà ciclo colturale, indicando un effetto positivo dei composti nel favorire lo sviluppo delle piante durante il periodo di studio.

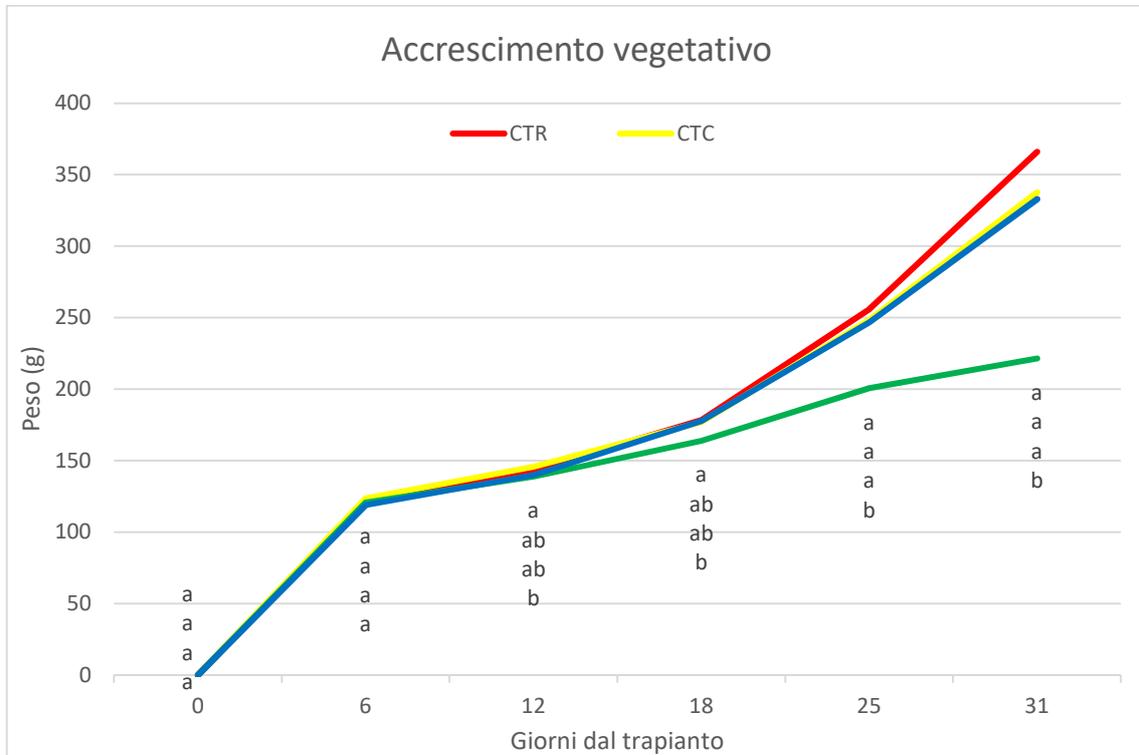


Figura 25. Andamento dell'accrescimento vegetativo espresso in grammi (g) per i quattro trattamenti studiati, nel corso del ciclo colturale. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.6.2 Biomassa aerea

I trattamenti CTR, CTC e CTCJ non presentano differenze significative tra di loro e i valori di biomassa aerea misurati sono rispettivamente: 364 grammi, 338 grammi e 308 grammi (Fig. 26). Mentre, la biomassa aerea del trattamento CTE è aerea significativamente inferiore rispetto agli altri trattamenti con 69 grammi

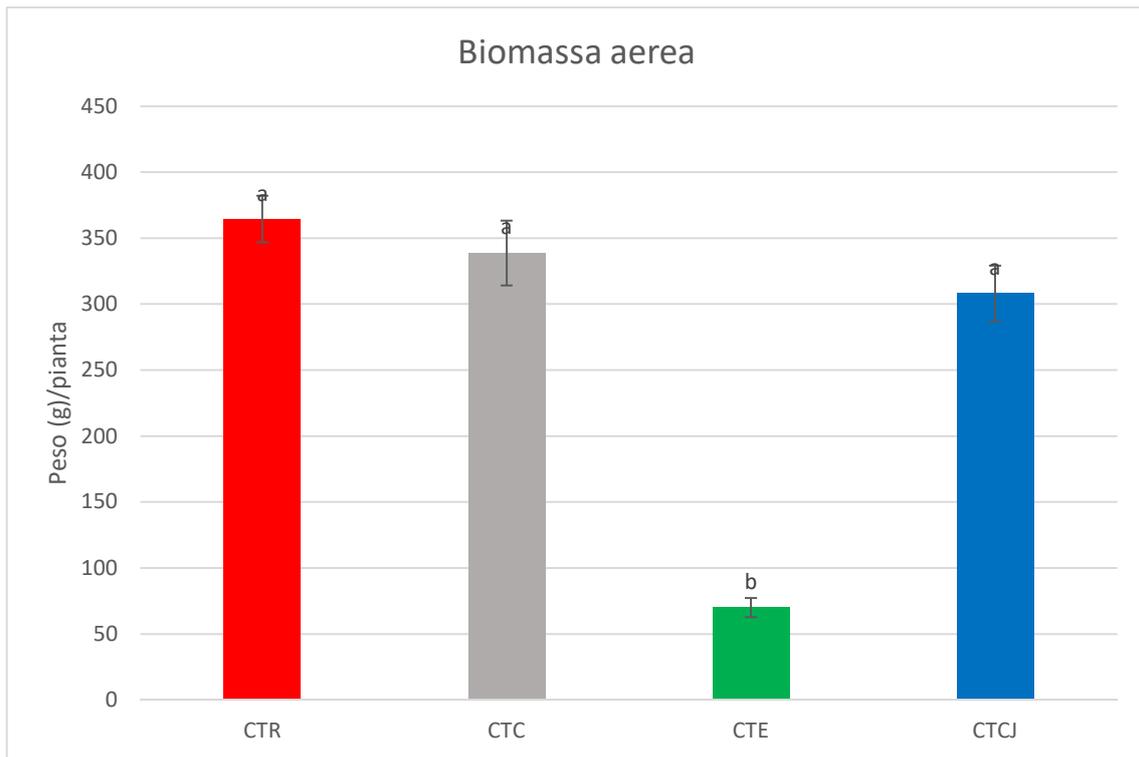


Figura 26. Effetto della soluzione nutritiva sulla biomassa aerea misurata in grammi/pianta per i quattro trattamenti studiati. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.6.3 Biomassa radicale

La biomassa radicale misurata nei quattro trattamenti, riportata nel grafico (Fig. 27), mostra variazioni significative. Il trattamento CTC emerge con la biomassa radicale più elevata pari a 22.5 g/pianta, seguito dal trattamento CTE con 19.9 g/pianta. Al contrario, i trattamenti CTR e CTCJ presentano valori inferiori, con 16.2 g/pianta per CTR e 16.7 g/pianta per CTCJ.

Questi risultati evidenziano che CTC ha una biomassa radicale significativamente superiore rispetto agli altri trattamenti, mentre CTE mostra una ridotta biomassa radicale rispetto a CTC, ma comunque maggiore rispetto a CTR e CTCJ.

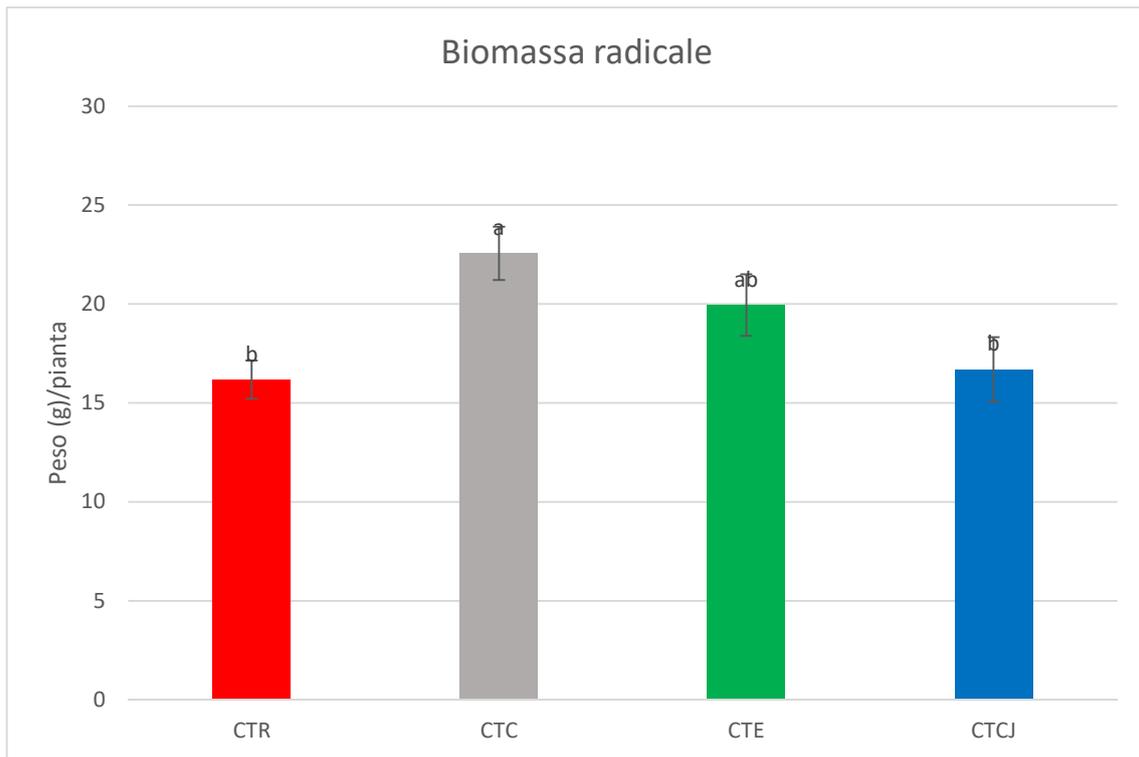


Figura 27. Effetto della soluzione nutritiva sulla biomassa radicale misurata in grammi/pianta per i quattro trattamenti studiati. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

○ Rapporto tra le biomasse

Il rapporto tra la biomassa aerea e quella radicale fornisce una chiara indicazione della distribuzione della biomassa nelle diverse parti delle piante studiate (Fig. 28). Il trattamento CTR mostra un valore medio di 22.5. Nel trattamento CTC, invece, il rapporto si è significativamente ridotto a 15.0; il trattamento con aria ionizzata della medesima soluzione (CTCJ) ha comportato un sensibile incremento del rapporto (18.4) dimostrando un rilevante effetto sulla produzione di biomassa della pianta.

Passando al trattamento CTE, il valore medio di 3.51 indica un rapporto decisamente modesto tra parte ipogea ed epigea. Il rapporto più equilibrato non è però stato accompagnato da una sufficiente produzione di biomassa rispetto agli altri trattamenti dimostrando la sostanziale incapacità del solo compost tea di giungere ad una produzione significativa.

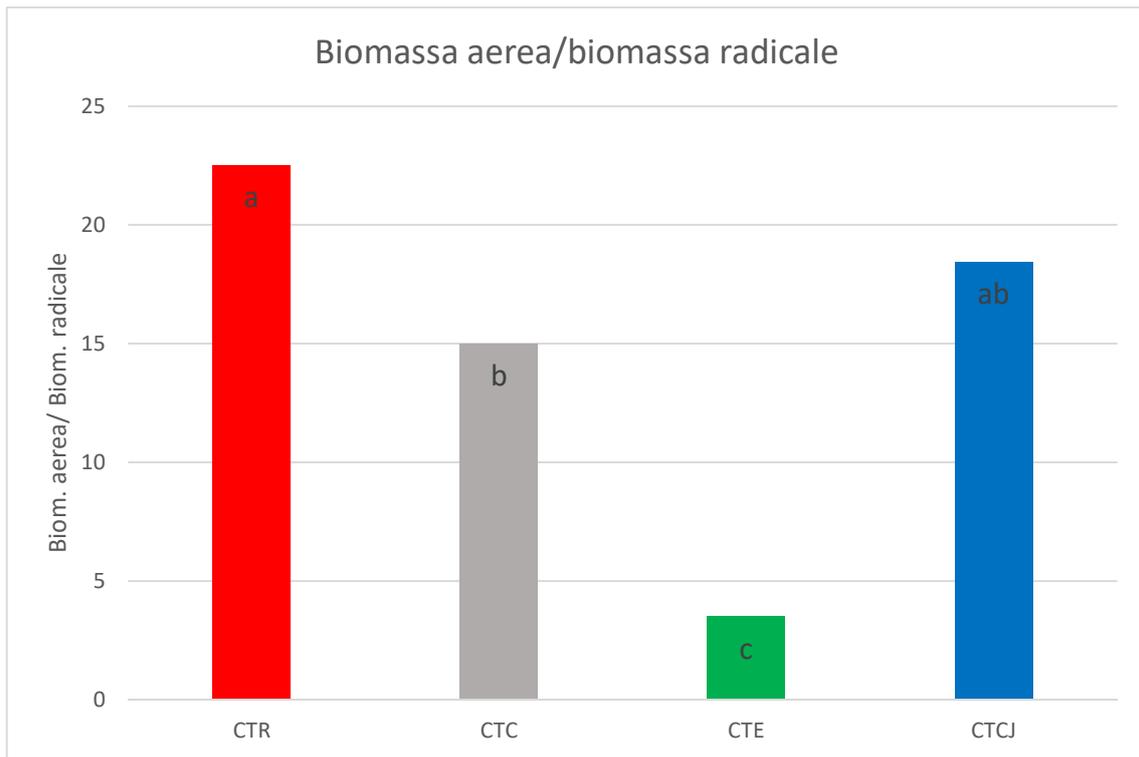


Figura 28. Effetto della soluzione nutritiva sul rapporto tra la biomassa aerea e la biomassa radicale per i quattro trattamenti studiati.

4.6.4 Sostanza secca radici (s.s % radici)

La figura 29 mostra la percentuale di sostanza secca nelle radici per i quattro trattamenti.

Il trattamento CTE si distingue significativamente dagli altri per avere una percentuale di sostanza secca nelle radici più elevata, pari a 6.85%. Gli altri trattamenti, CTR e CTC hanno dimostrato valori simili intorno al 5%, mentre CTCJ si è posizionato leggermente al di sopra del 5%, con una percentuale di 5.32%.

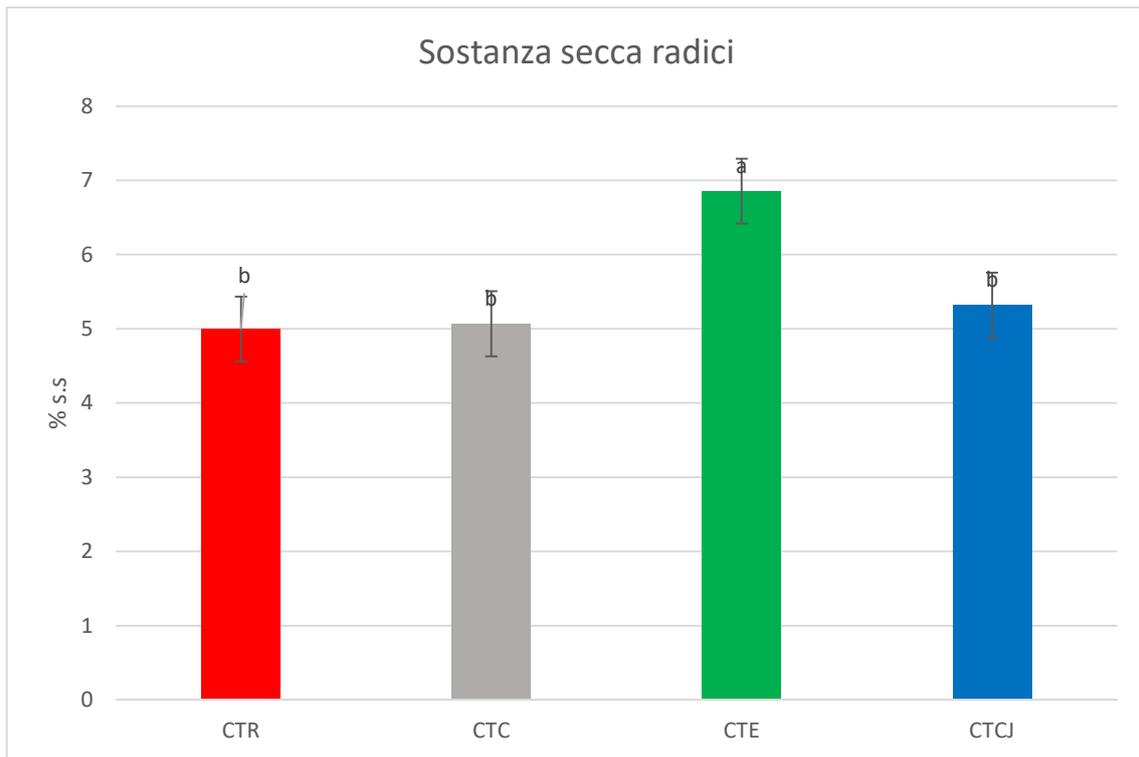


Figura 29. Effetto della soluzione nutritiva sulla sostanza secca delle radici (s.s% radici) misurata in g per i quattro trattamenti studiati. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.6.5 Diametri

In relazione al diametro della pianta, il trattamento CTE si distingue per presentare differenze significative rispetto agli altri trattamenti (Fig. 30). Mentre CTR, CTC e CTCJ mostrano diametri più simili tra loro, intorno ai 29-30 cm per il diametro 1 e ai 28-30 cm per il diametro 2, il trattamento CTE evidenzia diametri significativamente inferiori, con valori intorno ai 16-17 cm per entrambi i diametri.

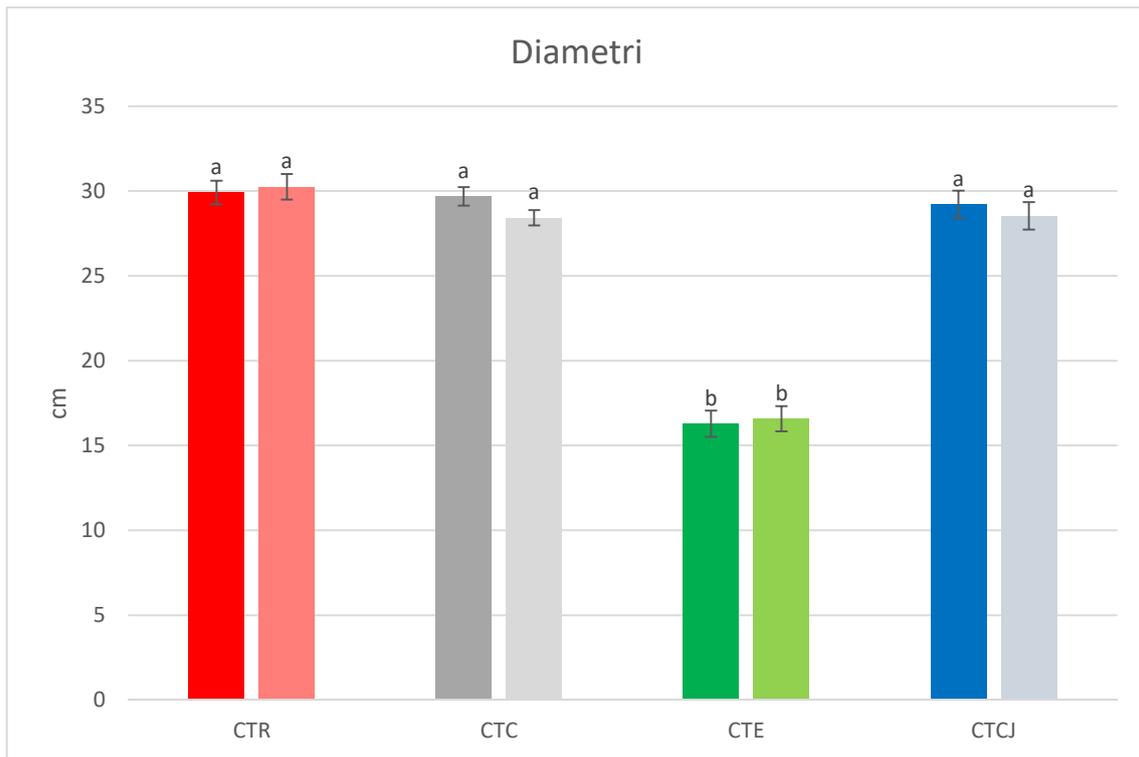


Figura 30. Diametri misurati in centimetri (cm) per i quattro trattamenti studiati. A sinistra di ogni trattamento è riportato il diametro 1 e a destra il diametro 2. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.7 Caratteristiche qualitative

4.7.1 Sostanza secca

La figura 31 esprime la percentuale di sostanza secca per quattro diversi trattamenti: CTR, CTC, CTE e CTCJ. I valori medi della sostanza secca sono i seguenti: 4.78% per CTR, 5.91% per CTC, 8.02% per CTE e 4.37% per CTCJ. Dalla figura emerge chiaramente che il trattamento CTE presenta la percentuale di sostanza secca più elevata con un valore medio del 8.02%. Questo risultato evidenzia una significativa differenza rispetto agli altri tre trattamenti, i quali mostrano valori medi più simili tra loro. Nel dettaglio, il trattamento CTR e il trattamento CTCJ presentano valori medi di sostanza secca rispettivamente del 4.78% e del 4.37%, indicando una comparabilità tra questi due trattamenti. Il trattamento CTC mostra un incremento rispetto a CTR e CTCJ, con una media del 5.91%, suggerendo una possibile variazione nella composizione della sostanza secca rispetto agli altri trattamenti.

Il trattamento CTE, con la sua media dell'8.02%, si distingue nettamente per la sua maggiore concentrazione di sostanza secca, suggerendo condizioni sperimentali o effetti ambientali che favoriscono un accumulo significativo di materiale secco.

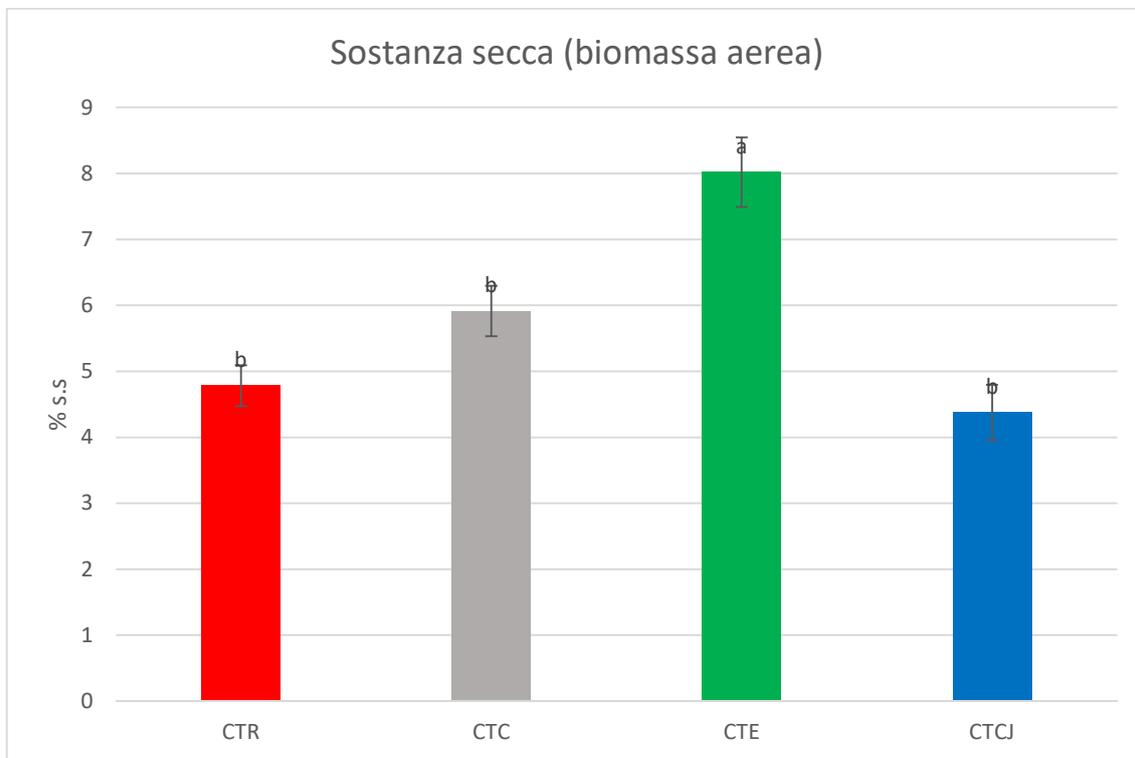


Figura 31. Effetto della soluzione nutritiva sul contenuto di sostanza secca (%) misurata per trattamenti. Controllo (CTR), Compost Tea tal quale (CTE), Compost Tea corretto (CTC) e compost tea corretto arricchito con aria ionizzata (CTCJ). Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.7.3 pH

La figura 32 offre un'analisi dei valori medi di pH per quattro trattamenti distinti: CTR, CTC, CTE e CTCJ. Osservando i dati, emerge che i trattamenti CTR, CTC e CTCJ presentano valori di pH molto simili tra loro, con valori medi che oscillano attorno a 5.76, 5.73 e 5.77 rispettivamente.

D'altra parte, il trattamento CTE si discosta nettamente dagli altri, evidenziando un valore medio di pH inferiore, pari a 5.48.

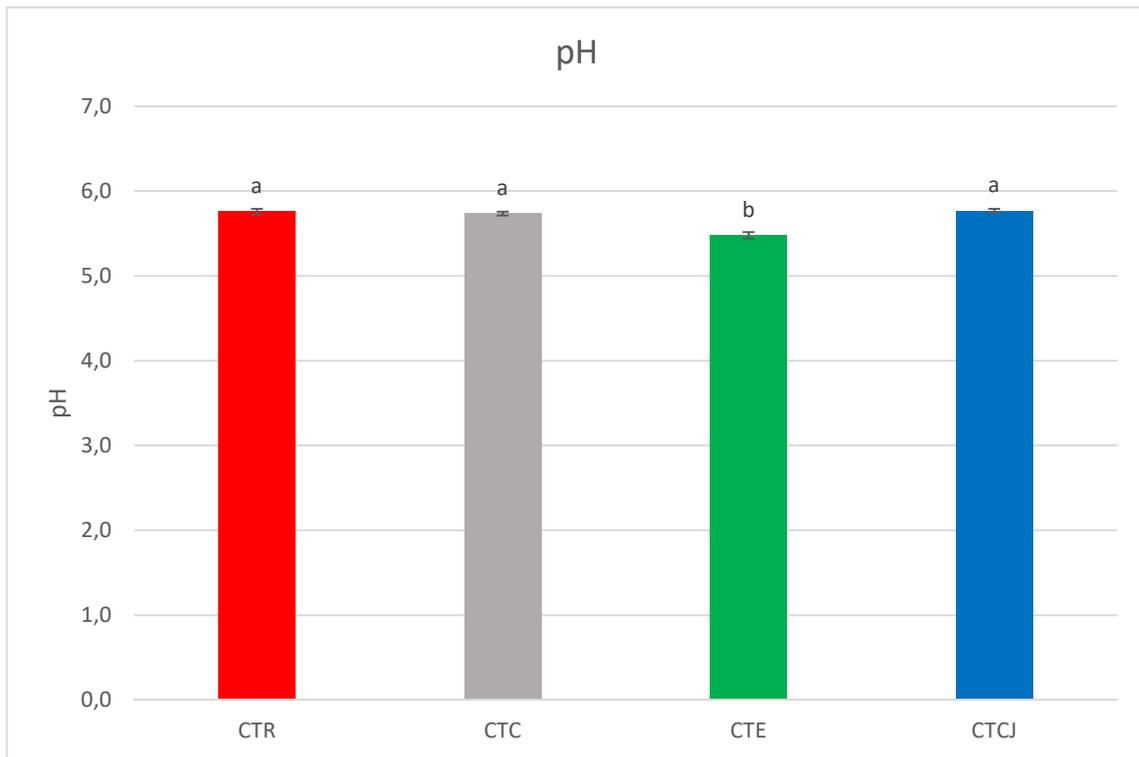


Figura 32. Effetto della soluzione nutritiva sul pH della pianta di lattuga misurato per i quattro trattamenti. Controllo (CTR), Compost Tea tal quale (CTE), Compost Tea corretto (CTC) e compost tea corretto arricchito con aria ionizzata (CTCJ). Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.7.4 Conducibilità elettrica

I dati relativi alla conducibilità elettrica rilevata nei tessuti della biomassa aerea di lattuga mostrano che CTR presenta una conducibilità elettrica media di 7.83 dS/cm, CTC di 8.02 dS/cm, CTE di 8.00 dS/cm e CTCJ di 7.92 dS/cm (Fig. 33).

Il trattamento CTC risulta essere quello con un valore di conducibilità elettrica superiore, anche se il valore non è significativamente maggiore dei trattamenti CTE e CTCJ che al loro volta non presentano differenze nemmeno con il trattamento CTR.

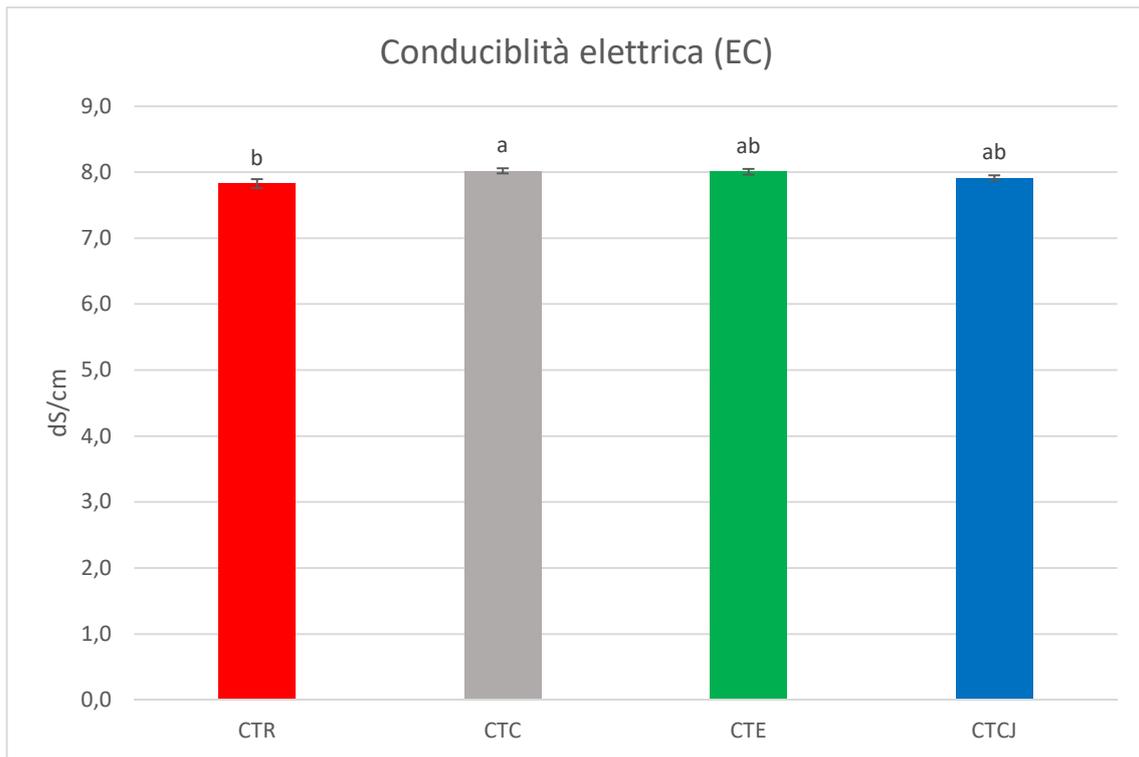


Figura 33. Effetto della soluzione nutritiva sulla conducibilità elettrica (EC) misurata in dS/cm per i quattro trattamenti. Controllo (CTR), Compost Tea tal quale (CTE), Compost Tea corretto (CTC) e compost tea corretto arricchito con aria ionizzata (CTCJ). Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.7.5 Solidi solubili totali

La figura 34 evidenzia i valori medi dei solidi solubili (misurati in °Brix) per quattro differenti trattamenti: CTR, CTC, CTE e CTCJ. I valori medi dei solidi solubili sono i seguenti: CTR con 1.44 °Brix, CTC con 1.72 °Brix, CTE con 3.84 °Brix e CTCJ con 1.92 °Brix. Dal grafico, è evidente che il trattamento CTE presenta il valore più elevato di solidi solubili, con 3.84 °Brix, differenziandosi in modo significativo dagli altri tre trattamenti, i quali mostrano valori medi più simili tra loro.

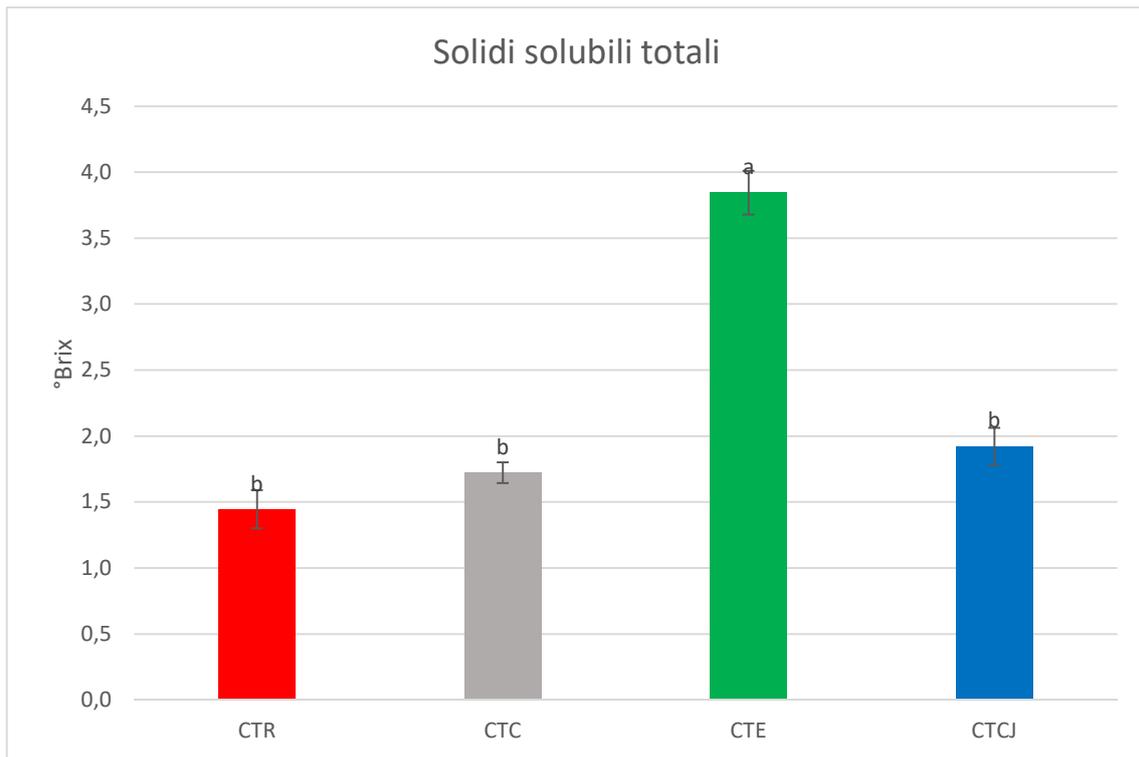


Figura 34. Effetto della soluzione nutritiva sul contenuto di solidi solubili totali (TSS) misurato in °Brix per i quattro trattamenti studiati. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.7.6 Acidità titolabile

I valori medi dell'acidità titolabile, espressa in mg di acido citrico per 100 ml di soluzione, per i trattamenti: CTR, CTC, CTE e CTCJ sono riportati in figura 35. I valori medi dell'acidità titolabile sono i seguenti: CTR con 0.0026 mg/100 mL, CTC con 0.0026 mg/100 mL, CTE con 0.0028 mg/100 mL e CTCJ con 0.0010 mg/100 mL.

Dai dati, emerge che le differenze tra i trattamenti non sono statisticamente significative. Questo indica che i livelli di acidità titolabile per i trattamenti CTR, CTC, CTE e CTCJ non mostrano variazioni rilevanti tra loro.

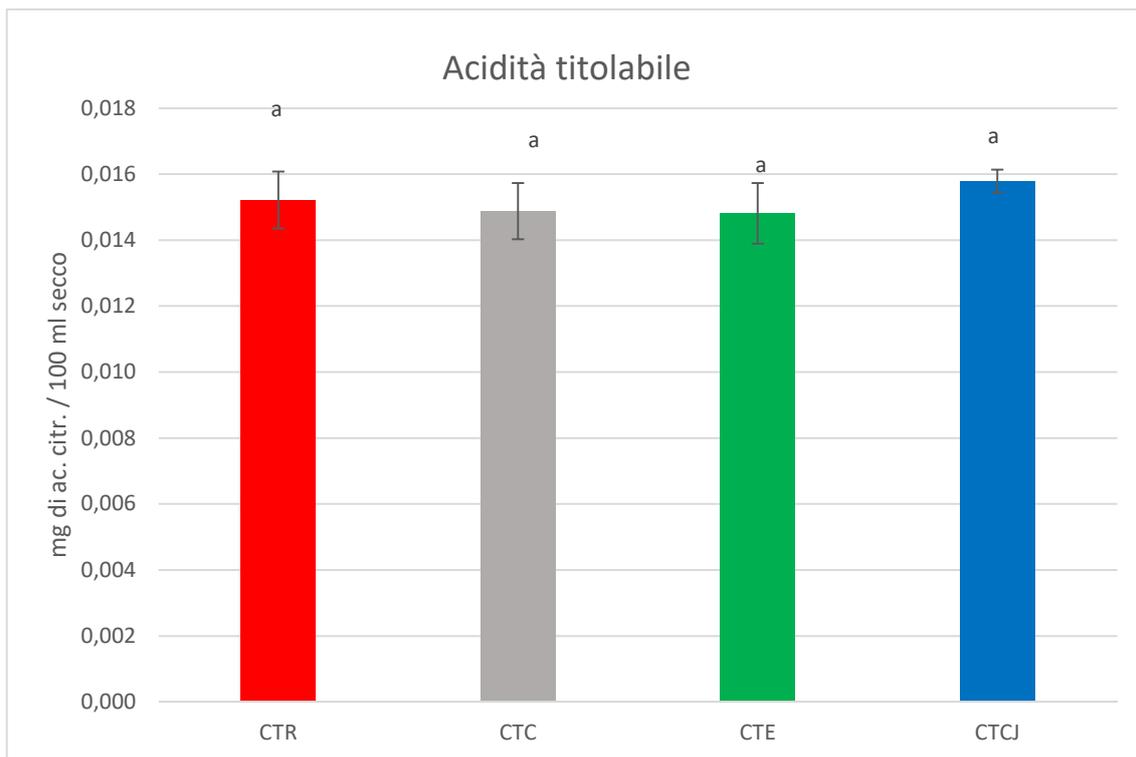


Figura 35. Effetto della soluzione nutritiva sull'acidità titolabile misurata in mg di acido citrico/100 mL del secco per i quattro trattamenti studiati. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.7.7 Polifenoli totali

I valori medi dei polifenoli totali per i quattro diversi trattamenti sono riportati in figura 36. Il contenuto dei polifenoli totali è espresso in milligrammi di acido gallico equivalente per chilogrammo di campione secco nei vari trattamenti: CTR con 5705 mg di GAE/kg, CTC con 5486 mg di GAE/kg, CTE con 5226 mg di GAE/kg e CTCJ con 5135 mg di GAE/kg.

Dai dati presentati, emerge che tutti i trattamenti mostrano un contenuto simile di polifenoli totali. Non sono evidenti differenze significative tra i trattamenti CTR, CTC, CTE e CTCJ in termini di quantità di polifenoli totali presenti nei campioni analizzati.

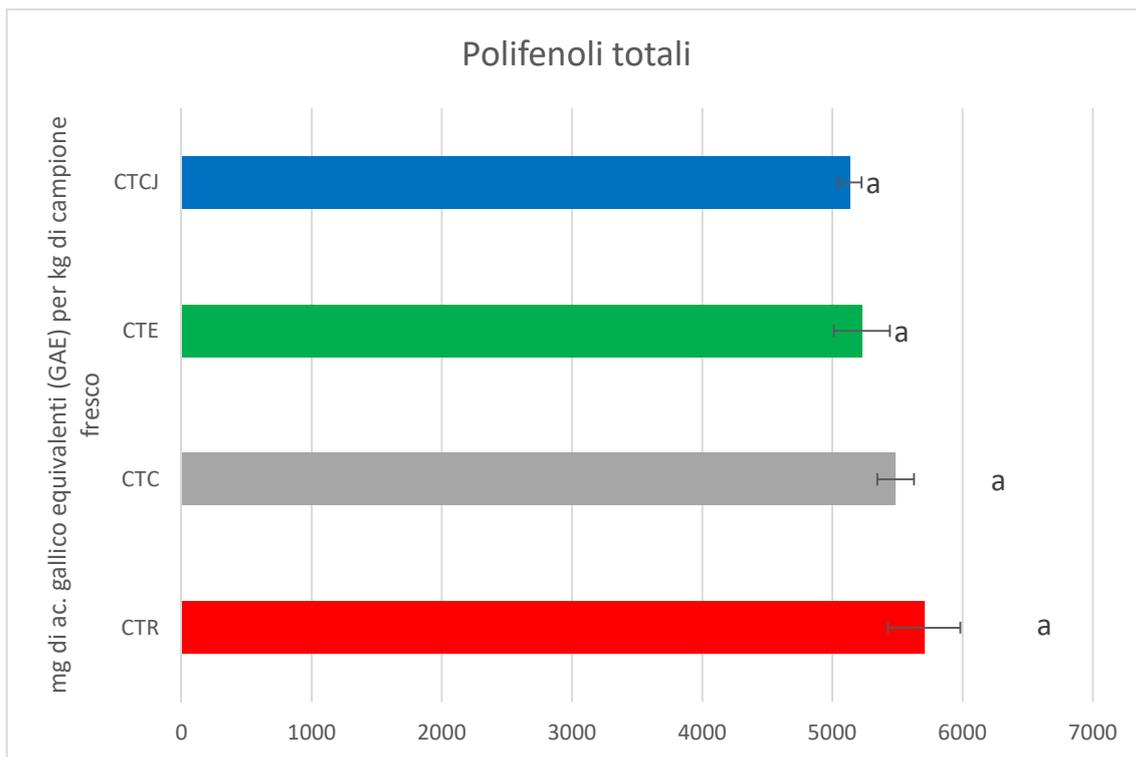


Figura 36. Effetto della soluzione nutritiva sul contenuto di polifenoli totali per i quattro trattamenti, determinati con i metodi FRAP e Folin-Ciocalteu. I polifenoli totali sono espressi in mg di ac. gallico equivalenti (GAE) per kg di campione secco. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.7.8 Antiossidanti totali

Il contenuto degli antiossidanti totali è espresso in milligrammi di Fe^{2+} equivalenti per chilogrammo di campione secco nei vari trattamenti: CTR: 3011 mg di Fe^{2+} equivalenti/kg, CTC: 2986 mg di Fe^{2+} equivalenti/kg, CTE: 4552 mg di Fe^{2+} equivalenti/kg, CTCJ: 2728 mg di Fe^{2+} equivalenti/kg.

Questi dati indicano che CTE ha il contenuto di antiossidanti totali più elevato tra i trattamenti esaminati, mentre CTCJ mostra il contenuto più basso. CTR e CTC mostrano livelli simili di antiossidanti totali, posizionandosi tra CTCJ e CTE in termini di quantità misurate per chilogrammo di campione secco.

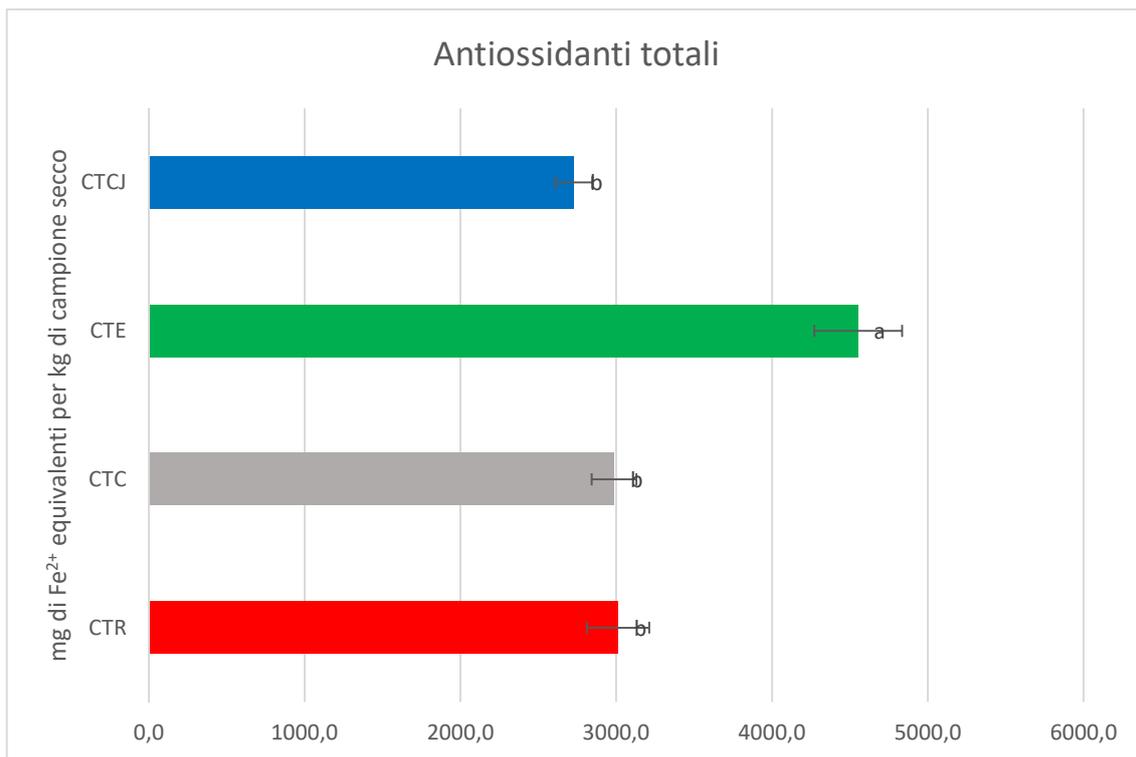


Figura 37. Effetto della soluzione nutritiva sul contenuto di antiossidanti totali per i quattro trattamenti, determinati con i metodi FRAP e Folin-Ciocalteu. Gli antiossidanti totali sono espressi in mg di Fe²⁺ equivalenti (Fe²⁺E) per kg di campione secco. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

4.7.9 Clorofille

○ Clorofilla a

Il contenuto di clorofilla a è espresso in microgrammi per millilitro nei vari trattamenti: CTR: 1484.52 µg/mL, CTC: 1525 µg/mL, CTE: 1017 µg/mL, CTCJ: 1290 µg/mL (Fig. 38).

Questi dati indicano che CTC ha il contenuto di clorofilla a più elevato tra i trattamenti esaminati, mentre CTE mostra un contenuto significativamente inferiore. CTR e CTCJ mostrano livelli simili di clorofilla a, posizionandosi tra CTE e CTC in termini di quantità misurate per millilitro.

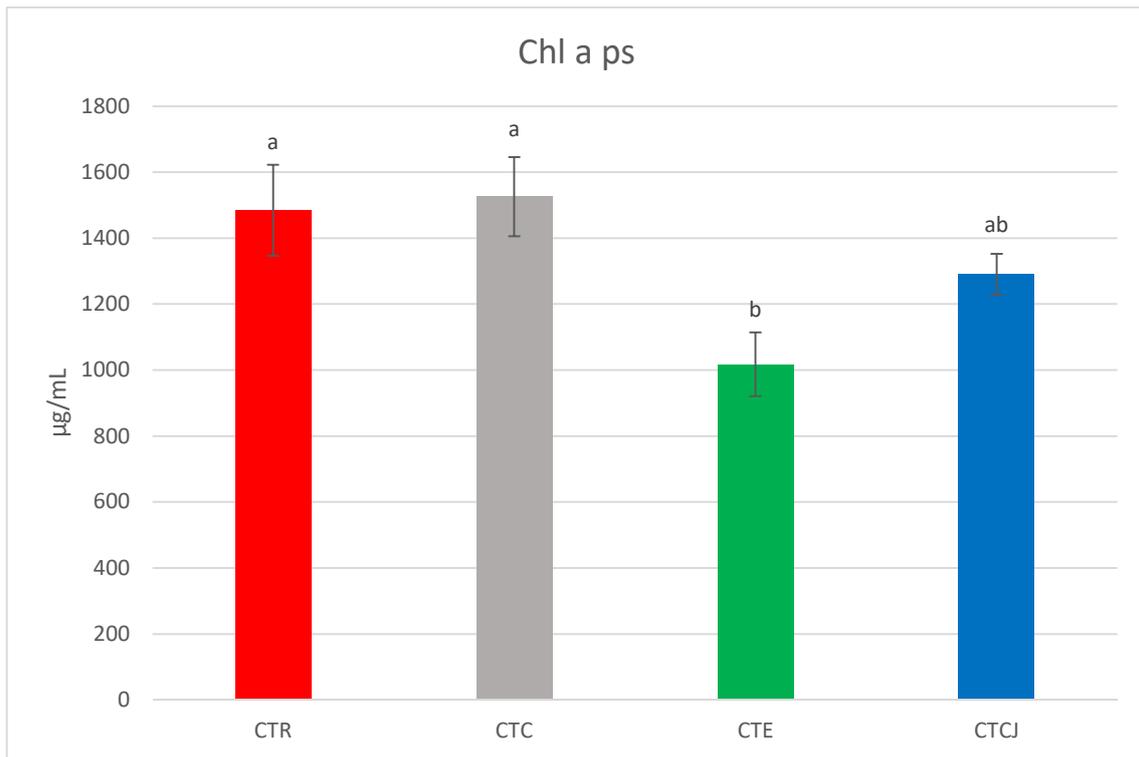


Figura 38. Effetto della soluzione nutritiva sul contenuto di clorofilla a (espresso in $\mu\text{g/mL}$) per i quattro trattamenti studiati. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

○ **Clorofilla b**

I valori medi di clorofilla b per i quattro diversi trattamenti sono riportati in figura 39.

Il contenuto di clorofilla b è espresso in microgrammi per millilitro nei vari trattamenti: CTR: 906 $\mu\text{g/mL}$, CTC: 938 $\mu\text{g/mL}$, CTE: 606 $\mu\text{g/mL}$, CTCJ: 810 $\mu\text{g/mL}$.

Questi dati indicano che CTC ha il contenuto di clorofilla b più elevato tra i trattamenti esaminati, mentre CTE mostra un contenuto significativamente inferiore. CTR e CTCJ mostrano livelli simili di clorofilla b, posizionandosi tra CTE e CTC in termini di quantità misurate per millilitro.

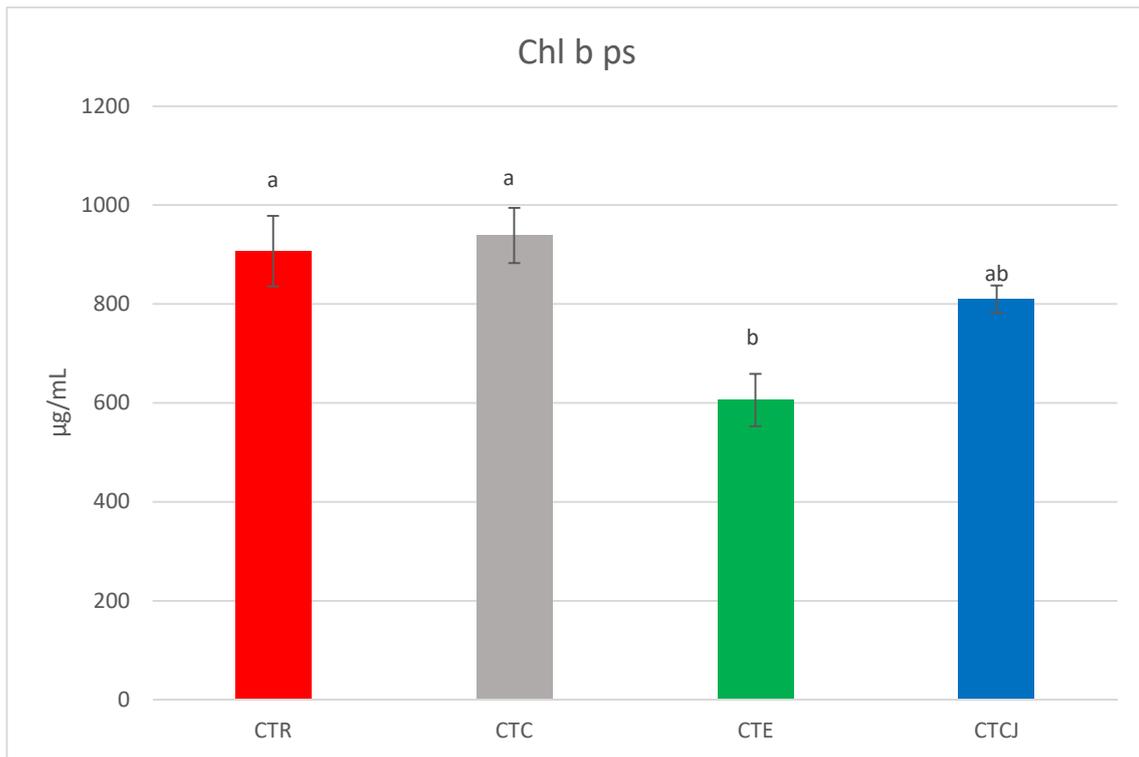


Figura 39. Effetto della soluzione nutritiva sul contenuto di clorofilla b (espresso in $\mu\text{g/mL}$) per i quattro trattamenti studiati. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

○ **Carotenoidi e xantofille**

Il contenuto di carotenoidi e xantofille non è risultato significativamente diverso tra i trattamenti (Fig. 40). In particolare è descritto come segue: CTR: 160 $\mu\text{g/mL}$, CTC: 164 $\mu\text{g/mL}$, CTE: 96.3 $\mu\text{g/mL}$, CTCJ: 129 $\mu\text{g/mL}$.

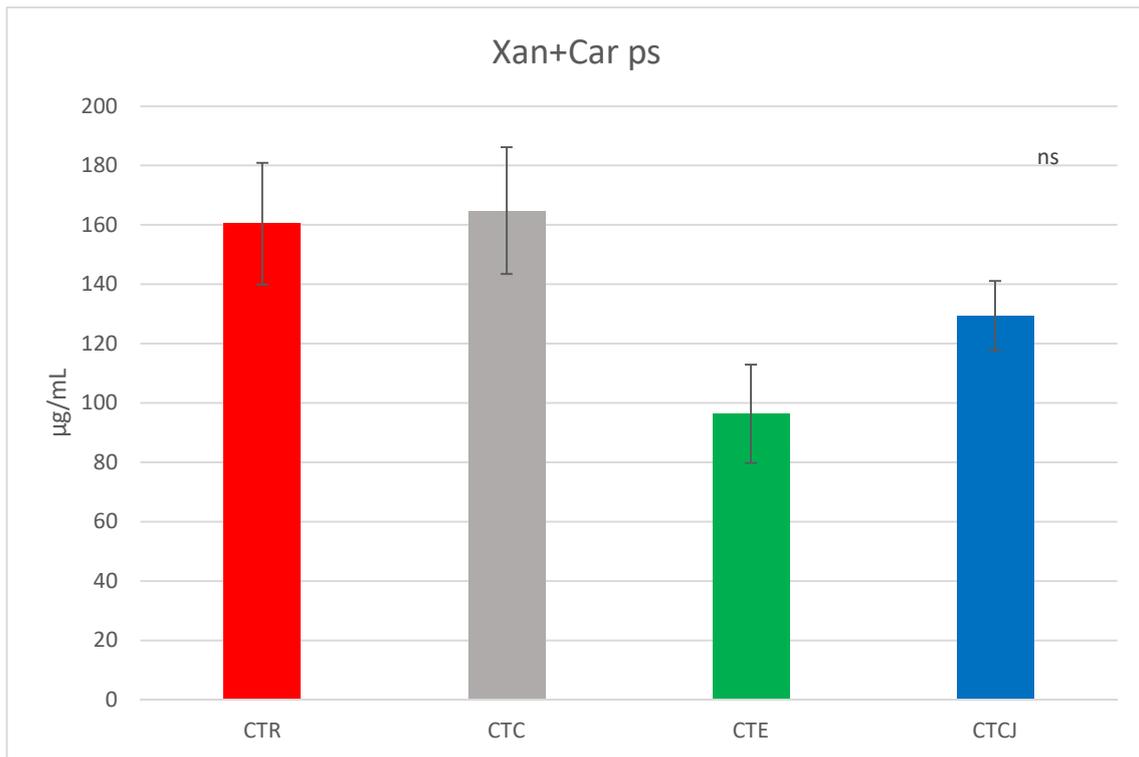


Figura 40. Effetto della soluzione nutritiva sul contenuto di carotenoidi e xantofille (espresso in µg/mL) per i quattro trattamenti studiati. Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test di Tukey ($p < 0.05$).

5. Discussione

Questo studio ha confrontato l'efficacia di quattro diversi trattamenti nelle soluzioni per la fertilizzazione della lattuga: il controllo (CTR), il compost tea tal quale (CTE), il compost tea corretto (CTC) e il compost tea corretto arricchito con aria ionizzata (CTCJ). La tabella 9 riporta il risparmio di nutrienti derivato dall'uso di compost tea (CTE) e compost tea corretto (CTC) rispetto all'uso di fertilizzanti di sintesi (CTR), espressi in mmol/L. I valori mostrano la differenza tra i nutrienti forniti dai trattamenti CTE e CTC rispetto a quelli forniti dal trattamento CTR, in termini di mmol per litro. Come evidenziato, l'uso di CTE ha portato a risparmi significativi in termini di azoto (15.82 mmol/L), potassio (2.01 mmol/L), calcio (2.76 mmol/L), e altri nutrienti. Similmente, il trattamento CTC ha mostrato risparmi notevoli per molti nutrienti analizzati, dimostrando l'efficacia di queste pratiche alternative nella gestione sostenibile dei nutrienti.

Questi risultati indicano che l'adozione di compost tea e compost tea corretto può contribuire significativamente alla riduzione dell'uso di fertilizzanti di sintesi, promuovendo una gestione più efficiente e sostenibile della fertilità del suolo.

Tabella 9. Risparmio di nutrienti con CTE e CTC rispetto a CTR (mmol/L)

Nutriente	CTR (mmol/L)	CTE (mmol/L)	CTC (mmol/L)	Risparmio con CTE (mmol/L)	Risparmio con CTC (mmol/L)
Azoto (N)	16.00	0.18	14.06	15.82	1.94
Fosforo (P)	1.00	0.00	1.76	1.00	-0.76
Potassio (K)	10.00	7.99	8.79	2.01	1.21
Calcio (Ca)	4.50	1.74	3.95	2.76	0.55
Magnesio (Mg)	1.00	0.64	0.88	0.36	0.12
Sodio (Na)	0.00	8.12	2.79	-8.12	-2.79
Zolfo (S-SO ₄)	2.50	7.23	2.49	-4.73	0.01
Cloro (Cl)	40.00	5.73	70.00	34.27	-30.00
Ferro (Fe)	30.00	9.43	30.00	20.57	0.00
Boro (B)	1.00	0.46	1.00	0.54	0.00
Rame (Cu)	5.00	0.00	5.00	5.00	0.00
Zinco (Zn)	5.00	0.00	5.00	5.00	0.00
Manganese (Mn)	5.00	0.00	5.00	5.00	0.00
Molibdeno (Mo)	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00

I risultati ottenuti dal presente studio rivelano interessanti differenze nell'accrescimento vegetativo delle piante di lattuga sottoposte a diversi trattamenti con compost tea. In particolare, l'analisi dei dati mostra come i trattamenti con compost tea arricchito (CTC) e compost tea ionizzato (CTCJ) abbiano portato a una crescita vegetativa più significativa rispetto al compost tea tal quale (CTE).

Il trattamento di controllo (CTR) ha mostrato un incremento progressivo del peso delle piante, iniziando da valori iniziali comparabili agli altri trattamenti e raggiungendo 366 grammi alla fine del ciclo colturale.

D'altro canto, il trattamento CTC ha seguito un pattern di crescita simile al CTR, ma con una risposta vegetativa leggermente inferiore, culminando in 337 grammi. Questo risultato indica che il compost tea arricchito supporta una crescita vigorosa delle piante. Il trattamento CTE, che ha previsto l'uso del compost tea tal quale, ha mostrato una crescita iniziale simile agli altri trattamenti, ma con un incremento finale significativamente inferiore a quello degli altri trattamenti, con un valore di 221 grammi. Questo suggerisce che, sebbene il compost tea tal quale sia utile nelle prime fasi di crescita, esso non fornisce tutti i nutrienti necessari per sostenere una crescita ottimale nel lungo periodo.

Il trattamento CTCJ ha dimostrato una crescita graduale e consistente evidenziando un comportamento vegetativo simile a quello del trattamento CTC.

A sostegno dei risultati ottenuti riguardanti l'accrescimento vegetativo, i dati sulla biomassa aerea finale e le dimensioni dei cespi di lattuga confermano ulteriormente i risultati.

In particolare, il trattamento CTE si distingue nettamente dagli altri per le sue differenze significative. Mentre i trattamenti CTR, CTC e CTCJ mostrano diametri dei cespi più omogenei, con valori di circa 29-30 cm, il trattamento CTE evidenzia diametri molto inferiori, con valori intorno ai 16-17 cm per entrambi i diametri.

Questi risultati indicano chiaramente che le piante trattate con CTE hanno sviluppato cespi di dimensioni significativamente minori rispetto agli altri trattamenti.

La biomassa aerea misura ulteriormente questa tendenza: i trattamenti CTR, CTC e CTCJ non presentano differenze significative tra di loro, con valori rispettivamente di 364 grammi, 338 grammi e 308 grammi. Al contrario, la biomassa aerea del trattamento CTE è drasticamente inferiore, con un valore di soli 69 grammi.

Queste evidenze dimostrano che, sebbene il compost tea tal quale (CTE) possa inizialmente favorire la crescita, nel lungo termine non fornisce i nutrienti necessari per sostenere una crescita ottimale e vigorosa delle piante di lattuga. I trattamenti CTC e CTCJ, invece, supportano una crescita più equilibrata e robusta, sia in termini di dimensioni dei cespi che di biomassa aerea, confermando così l'importanza di una formulazione nutrizionalmente completa del compost tea.

Nel contesto della nostra ricerca, i risultati ottenuti in termini di accrescimento vegetativo trovano ulteriore supporto nello studio di Celano et al. (2012). In questo studio, che ha confrontato l'efficacia di quattro diverse formulazioni di compost tea, è emerso che il compost tea più completo in termini di nutrienti (paragonabile al nostro trattamento CTC) ha mostrato i migliori risultati.

Celano et al. (2012) hanno prodotto i loro compost tea mediante fermentazione aerobica, utilizzando un estrattore in fase liquida dotato di un sistema di aerazione forzata. I compost utilizzati includevano residui verdi di pomodoro e scarola, miscelati in diverse combinazioni per ottenere un rapporto C/N di circa 30, nonché un compost commerciale derivato dalla frazione organica dei rifiuti solidi urbani. La coltivazione del pomodoro, condotta in pieno campo, ha seguito un disegno sperimentale a blocchi randomizzati con tre repliche, applicando i compost tea alla porzione epigea delle piante ogni 7-10 giorni.

I risultati di Celano et al. (2012) hanno evidenziato che il compost tea ottenuto dalla combinazione più bilanciata di nutrienti ha determinato una risposta produttiva significativamente migliore in termini di quantità e qualità della produzione, così come uno stato sanitario superiore delle piante. In particolare, i parametri valutati comprendevano l'indice vegetativo, il grado di copertura e lo stato fitosanitario, con punteggi che variavano da 1 (situazione peggiore) a 5 (situazione migliore).

La presente ricerca ha indagato anche l'impatto di diversi trattamenti sulla biomassa radicale della lattuga, utilizzando come parametro di valutazione la misurazione della biomassa radicale. I risultati hanno mostrato che il trattamento CTC ha significativamente stimolato la crescita dell'apparato radicale, con una biomassa radicale registrata di circa 22.57 grammi, il valore più alto tra i trattamenti testati. Questo incremento sostanziale della biomassa radicale nel trattamento CTC suggerisce un'efficace promozione della crescita radicale rispetto agli altri trattamenti esaminati.

L'analisi dei dati ha indicato che il trattamento continuativo di ionizzazione, come evidenziato nel trattamento CTCJ, ha invece mostrato una diminuzione della biomassa radicale rispetto a CTC. Questo fenomeno potrebbe essere attribuito alla possibile devitalizzazione della componente organica del terreno, compresa la potenziale distruzione di chelati utilizzati nei trattamenti agricoli, a causa dell'esposizione prolungata alla ionizzazione.

Il trattamento CTE, sebbene abbia mostrato una biomassa radicale superiore rispetto ai trattamenti CTR e CTCJ, ha comunque registrato una crescita radicale inferiore rispetto a CTC. Ciò potrebbe essere associato a un possibile squilibrio nutrizionale nel trattamento, inclusi eccessi di elementi come sodio, cloro e azoto ammoniacale, che possono limitare la crescita radicale nonostante la presenza di una sostanza organica stimolante.

In conclusione, l'effetto positivo osservato nel trattamento CTC sulla biomassa radicale suggerisce che una combinazione equilibrata di componenti organiche e minerali può favorire una crescita

radicale ottimale. Al contrario, l'approccio continuativo di ionizzazione potrebbe non essere vantaggioso per la salute radicale delle piante, suggerendo la valutazione di strategie di trattamento discontinuo per massimizzare i benefici sulla crescita delle radici nelle colture di lattuga e potenzialmente in altre colture vegetali.

Nel presente studio, i valori medi degli antiossidanti totali (mg di Fe²⁺ equivalenti/kg di campione secco) ha presentato differenze significative.

In particolare, il trattamento CTE ha mostrato il contenuto di antiossidanti totali più elevato, seguito da CTR e CTC con valori simili, mentre CTCJ ha mostrato il contenuto più basso. Questo suggerisce che il compost tea tal quale è particolarmente efficace nel migliorare la capacità antiossidante della lattuga. Anche lo studio di Perez et al., (2018) presentato dalla Regione Lagunera nello Stato di Coahuila, Messico, ha trovato che l'uso di compost tea e compost tea combinato con acido ascorbico (TCAA) ha portato a un significativo aumento della capacità antiossidante nel foraggio verde idroponico.

Il trattamento TCAA ha mostrato aumenti del 25% e del 32% (ABTS⁺ e DPPH⁺, rispettivamente) rispetto al controllo. Questo indica una tendenza simile: il compost tea migliora la capacità antiossidante in diverse colture. ma anche valutare

In entrambi gli studi emerge la presenza di condizioni di stress che la coltura può avere vissuto durante il ciclo colturale. Come noto, infatti, qualsiasi forma di stress biotico o abiotico determina importanti variazioni nel metabolismo della pianta che quasi sempre si traducono in un incremento del contenuto di composti antiossidanti. Anche per quanto riguarda la sostanza secca i risultati sono congrui. Nel presente studio, il trattamento CTE ha mostrato la percentuale di sostanza secca più elevata (8.02%), distinguendosi significativamente dagli altri trattamenti. CTR e CTCJ hanno valori simili, mentre CTC mostra un incremento rispetto a CTR e CTCJ.

Nello studio della Regione Lagunera, i valori di sostanza secca più alti sono stati osservati con i trattamenti compost tea (TC) e compost tea con acido ascorbico (TCAA), con rispettivamente 18.91% e 17.6%. Anche in questo caso, il compost tea si è dimostrato efficace nell'aumentare il contenuto di sostanza secca.

Entrambi gli studi dimostrano che l'uso di compost tea migliora significativamente sia la capacità antiossidante che il contenuto di sostanza secca nelle colture. Nel nostro studio, il trattamento CTE ha avuto i migliori risultati per entrambe le variabili. Similmente, nello studio della Regione Lagunera, l'uso di compost tea e la sua combinazione con acido ascorbico ha portato a miglioramenti significativi nel foraggio verde idroponico.

Questi risultati supportano l'uso di fertilizzanti organici liquidi come il compost tea in contesti agricoli sostenibili, migliorando la qualità delle colture e contribuendo a una gestione integrata dei rifiuti.

Prendendo in considerazione i solidi solubili totali, nel presente studio si evince che il trattamento CTE ha dimostrato un accrescimento stentato e lento delle piante, che non è ottimale per lo sviluppo equilibrato delle colture. Questo tipo di crescita porta i tessuti a trattenere meno acqua rispetto al controllo, risultando in tessuti ricchi di sostanza secca. Le foglie delle piante trattate con CTE erano ricche e tendevano a fiorire prematuramente, indicando uno stress fisiologico.

Il disequilibrio tra nutrienti causato dal trattamento CTE può creare antagonismi tra anioni e cationi, come cloro e sodio, che influiscono negativamente sulla crescita ottimale della pianta. Un esempio analogo è il pomodoro di Pachino, noto per la sua elevata sapidità ma povero di acqua. La pianta di lattuga trattata con CTE si è accresciuta lentamente, accumulando solidi solubili che hanno contribuito a un valore elevato di °Brix.

Secondo quanto riportato da Nicoletto et al. (2019), una possibile problematica di questa matrice è una leggera salinità. Nonostante questo, però, prove di medio lungo termine con altre matrici organiche caratterizzate da un'elevata salinità come il compost spento di fungaia (Huang et al., 2022), non hanno evidenziato problematiche nel tempo, sempre se la matrice viene utilizzata in modo razionale.

Nel confronto tra i diversi trattamenti utilizzati nel nostro studio, l'andamento dell'indice SPAD delle piante rivela chiaramente come il compost tea corretto (CTC) abbia influenzato positivamente la crescita e lo stato nutrizionale delle colture, se confrontato con il trattamento di controllo (CTR).

Per quanto riguarda il gruppo CTR, l'indice SPAD ha mostrato una crescita costante nel tempo, stabilizzandosi infine a un valore di 27.30 il 30 aprile. Questo indica una gestione standard con risultati prevedibili, ma senza evidenti miglioramenti significativi nel contenuto di clorofilla delle piante.

In contrasto, il trattamento CTC ha dimostrato un andamento più dinamico e promettente. Dopo un inizio con un valore di 20.50, l'indice SPAD è aumentato fino a un picco di 29.01, per poi stabilizzarsi intorno a 28.21. Questo profilo suggerisce che l'integrazione del compost tea con nutrienti aggiuntivi ha favorito una crescita più vigorosa e un miglioramento dello stato nutrizionale delle piante nel corso dell'esperimento.

Questi risultati sono coerenti con la letteratura esistente che sottolinea l'importanza di integrare il compost tea con altri nutrienti per massimizzare i suoi benefici agronomici. Ad esempio, un altro studio ha evidenziato che il compost tea, sebbene migliori alcuni aspetti della salute delle piante, potrebbe non sempre aumentare significativamente le rese rispetto ai fertilizzanti sintetici, a meno che non sia correttamente arricchito (MDPI, 2022).

Nel presente studio, abbiamo esaminato come l'aggiunta di compost tea (CTE) influenzi l'EC delle soluzioni nutritive utilizzate. Abbiamo osservato che il trattamento con CTE ha mostrato variazioni

significative nell'EC rispetto agli altri trattamenti, come indicato dai dati sperimentali. L'EC, misura della conducibilità elettrica, può essere influenzata dal tenore di sostanza organica nel terreno o nella soluzione nutritiva.

Secondo i risultati ottenuti, il trattamento con CTE ha evidenziato un andamento specifico nell'EC delle soluzioni nutritive rispetto ai trattamenti CTR, CTC e CTCJ. Questi risultati possono essere interpretati considerando la capacità del compost tea di apportare sostanza organica e altri nutrienti alla soluzione nutritiva, analogamente agli effetti osservati nel suolo nel lavoro di Recanatini (2022). Lo studio di Recanatini (2022) ha evidenziato che l'aumento della sostanza organica nel terreno può influenzare positivamente l'EC, migliorando la capacità del terreno di trattenere l'umidità e sostenere l'attività microbica. In analogia, nel nostro studio, l'incremento dell'EC nel trattamento CTE suggerisce un miglioramento della fertilità della soluzione nutritiva, favorito dalla presenza di sostanza organica e microrganismi benefici derivanti dal compost tea.

Questi fattori contribuiscono a una maggiore disponibilità di nutrienti per le piante, supportando una crescita più robusta e una salute migliorata delle colture trattate con compost tea. In conclusione, i nostri dati confermano che l'aggiunta di compost tea ha effetti significativi sull'EC delle soluzioni nutritive, sottolineando l'importanza della sostanza organica e dei microrganismi presenti nel compost tea per ottimizzare la fertilità del sistema colturale.

6. Conclusioni

La valorizzazione dei prodotti di scarto è parte integrante della bioeconomia, essendo finalizzata a garantire la sostenibilità dei processi produttivi, la sicurezza alimentare e la riduzione d'uso di risorse esauribili. Ciò si inquadra negli obiettivi dalla Comunità Europea per affrontare le future sfide ambientali legate al cambiamento climatico e all'incremento demografico.

In quest'ottica, le filiere agroalimentari dovranno sempre più orientarsi verso la creazione di catene produttive a elevata circolarità, competitive sul mercato e in grado di soddisfare le crescenti di esigenze di sostenibilità.

Il compost tea è stato oggetto di crescente interesse come alternativa ai fertilizzanti sintetici nella pratica agricola, poiché promuove la salute del suolo e delle piante attraverso microbi benefici. Tuttavia, l'efficacia del compost tea può variare significativamente a seconda delle sue modalità di preparazione e integrazione con altri nutrienti essenziali.

Il presente studio ha confrontato l'efficacia di quattro diversi trattamenti nella fertilizzazione della lattuga: il controllo (CTR), il compost tea tal quale (CTE), il compost tea corretto (CTC) e il compost tea corretto arricchito con aria ionizzata (CTCJ).

Emerge chiaramente che il compost tea corretto (CTC) si è dimostrato un efficace fertilizzante per la lattuga, mostrando risultati paragonabili al controllo (CTR) per diversi parametri agronomici e qualitativi studiati. Questo suggerisce che l'integrazione di composti organici corretti e minerali può favorire una crescita equilibrata e sana delle colture, migliorando la qualità del prodotto agricolo.

D'altra parte, il compost tea tal quale (CTE) ha mostrato alcune limitazioni significative come fertilizzante. La sua composizione non equilibrata nei nutrienti ha portato a una crescita irregolare delle piante di lattuga, evidenziata da sintomi di stress fisiologico come foglie ricce e fioritura prematura. Questo suggerisce che, nonostante possa migliorare alcuni aspetti della salute delle piante, il CTE potrebbe non fornire un supporto nutrizionale ottimale per una crescita vigorosa e sostenibile delle colture.

Inoltre, l'uso continuativo di plasma freddo nel compost tea corretto arricchito con aria ionizzata (CTCJ) ha mostrato di limitare la crescita e di devitalizzare alcuni composti organici nel terreno. Questo fenomeno potrebbe compromettere l'efficacia del trattamento se somministrato in modo continuo. Di conseguenza, è consigliabile valutare una somministrazione discontinua del CTCJ per massimizzare i benefici senza compromettere la salute delle piante e la qualità del suolo nel lungo periodo.

In sintesi, mentre il CTC si conferma un'opzione promettente per migliorare la qualità e la crescita delle colture di lattuga, sia il CTE che il CTCJ richiedono attenzione nella gestione e nell'applicazione per ottimizzare i risultati agronomici senza compromettere la sostenibilità e la salute delle colture.

Bibliografia

- Pant, A. P., Radovich, T. J. K., Hue, N. V., & Paull, R. E. (2012). Biochemical properties of compost tea associated with compost quality and effects on pak choi growth. *Scientia Horticulturae*, 148, 138-146.
- Haug-Baltzell, A. (2011). The Suitability of Worm Castings & Compost Tea in Organic Hydroponic Lettuce Propagation. Faculty Advisor: Dr. Tanya Quist. University of Arizona, PLS330H (Plant Propagation).
- BIGLLARDI, P. (1999). IL COMPOSTAGGIO DI QUALITÀ: “PROBLEMATICHE GESTIONALI E DI MERCATO”. *Il veterinario nella protezione dell’ambiente*, 78.
- Brazzale, L. (2013). Effetto di dosi crescenti di compost sull'allevamento di specie arbustive ornamentali in vaso.
- St. Martin, C. C. G. (2012). Compost and Compost Tea: Principles and Prospects as Substrates and Soil-Borne Disease Management Strategies in Soil-Less Vegetable Production. *Biological Agriculture & Horticulture*, 28(1).
- St. Martin, C. C. G., & Brathwaite, R. A. I. (n.d.). Compost and compost tea: Principles and prospects as substrates and soil-borne disease management strategies in soil-less vegetable production.
- Cauditelli, M., Faustini, N., Gravagno, M., Trinca, E., Alisi, C., Montereali, M. R., ... & Manzo, S. (2016). Attività sperimentale sull'impianto di compostaggio elettromeccanico Comar. ENEA.
- Centemero, M., Caimi, V., Adani, F., & Compostatori, C. I. (2001). L'impiego del Compost in Agricoltura “The Use of Compost in Agriculture”.
- Centemero, M., & Zanardi, W. (2007). Il trattamento biologico dei rifiuti urbani in Italia: compostaggio, trattamento meccanico-biologico, digestione anaerobica. *Centro 20*.
- Chaney, C. C. G. St. Martin. (2014). Potential of compost tea for suppressing plant diseases. *CAB Reviews*, 9(032).

- Compost. (2023). Quadro normativo / Giugno 2023. Documento sul “Compost, in riferimento alla normativa ambientale di cui al D. lgs 152/2006 e quella relativa ai fertilizzanti di cui al D. lgs 75/2010.
- De Pascale, S., Maggio, A., & Barbieri, G. (2006). La sostenibilità delle colture protette in ambiente mediterraneo: limiti e prospettive. *Italus Hortus*, 13(3), 33-48.
- Kumar, D., et al. (2021). Effect of soil and foliar applications of compost tea on growth characters, quality and nutrient content of soybean [*Glycine max.* (L.) Merrill] under organic cultivation. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10.
- Despommier, D. (2010). *The Vertical Farm: Feeding the World in the 21st Century*. Macmillan.
- Ingham, E. (2003). Compost tea Promises & Practicalities. *ACRES (A Voice For Eco-Agriculture)*, December 2003, Vol. 33, No. 12.
- Ingham, E. R., PhD. (2000). *The Compost Tea Brewing Manual*. Soil Foodweb Incorporated.
- Enzo, M., Gianquinto, G., Lazzarin, R., Pimpini, F., & Sambo, P. (2001). Principi tecnico-agronomici della fertirrigazione e del fuori suolo. *Tipografia-Garbin, Padova, Italy*.
- Marin, F., et al. (2015). Effects of compost tea on plant growth and plant disease management. In S. Sustainable crop disease management using natural products (pp. 234-264).
- Eudoxie, G., et al. (2019). Compost tea influence on lettuce (*Lactuca sativa* L.) root architecture. *Department of Food Production, University of the West Indies, St. Augustine, Trinidad and Tobago*.
- Hakimi, F., et al. (2024). Effects of Compost and Compost Tea on Soil Properties and Nutrient Uptake of the Moroccan Date Palm Cultivar "Mejhoul" under Organic Cultivation. *Journal of ecological engineering*.
- Huang, Z., et al. (2022). Novel liquid organic fertilizer: A potential way to effectively recycle spent mushroom substrate. *Journal of Cleaner Production*.
- Shrestha, K., Shrestha, P., Walsh, K. B., Harrower, K. M., & Midmore, D. J. (2011). Microbial enhancement of compost extracts based on cattle rumen content compost – Characterisation of a system. *Bioresource Technology*.

- Lucarini, M., Durazzo, A., & Zaccardelli, M. (2023). Effect of Compost Tea in Horticulture. *Horticulturae*, 9, 984.
- Zaccardelli, M., Pane, C., Scotti, R., Palese, A. M., & Celano, G. (2012). Impiego di compost-tea come bioagrofarmaci e biostimolanti in orto- frutticoltura. *Italus Hortus*, 19(2).
- MDPI. (2022). Comparative Study of Compost Tea and Synthetic Fertilizers on Crop Yields and Soil Health: Implications for Sustainable Agriculture.
- Morelli, R., et al. (2023). Progetto PEI 2022-2024: SMS Green: bioeconomia circolare, sostenibilità melo-suolo. *ACTA ITALUS HORTUS*, 121.
- Musmeci, L., & Gucci, P. M. B. (1999). Aspetti igienico-sanitari per la produzione di compost di elevata qualità. *ANNALI-ISTITUTO SUPERIORE DI SANITA*, 33, 595-604.
- Nasini, L., et al. (2011). Compostaggio dei sottoprodotti della filiera olivicola-olearia ed effetti della fertilizzazione degli oliveti con il compost ottenuto. *I Convegno Nazionale dell'Olio e dell'Olio*, 1, 42-46.
- Pilla, N., et al. (2023). Effect of Compost Tea in Horticulture. *Horticulturae*, 9, 984.
- Nicoletto, C., et al. (2019). Distillery anaerobic digestion residues as fertilizers for field vegetable crops: performance and efficiency in mid-term successions. *Agronomy*, 9(8), 463.
- Pagniello, B. (2009). Impatto ambientale dell'orticoltura in serre tipiche dell'ambiente mediterraneo e analisi delle tecniche di coltivazione in fuori suolo.
- Pardossi, A., et al. (2008). Aeroponics: a potential tool for root biology studies. *Plant Biosystems- An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 142(2), 280-289.
- Peiris, P. U. S., & Weerakkody, W. A. P. (2015). Effect of organic based liquid fertilizers on growth performance of leaf lettuce (*Lactuca Sativa* L.). In *International conference on agricultural, ecological and medical sciences (AEMS-2015) April (pp. 7-8)*.
- Nappi, E. V. P., & Barberis, R. (1997). Criteri per la valutazione della qualità dei compost.

- Postma, J., Alsanus, B. W., Whipps, J. M., & Wohanka, W. (2003). La microflora nei sistemi di coltivazione fuori suolo. *Informatore Fitopatologico*, 53(3), 35-39.
- Salas Pérez, L., et al. (2018). Effect of the addition of ascorbic acid and compost tea on the production and antioxidant capacity of corn hydroponic forage. *Nova scientia*.
- Kelley, S. (2004). Building a knowledge base for compost tea. *BioCycle*, June 2004, Vol 45, No. 5, p.32.
- Savvas, D., & Lieth, H. (2016). *Advances in Hydroponics Research*. Nova Science Publishers.
- Scheuerell, S. J., & Mahaffee, W. F. (2002). Variation in populations of *Pseudomonas fluorescens* in diverse forms of compost teas. *Journal of Environmental Horticulture*.
- Jung, S. Y., Kim, H. S., Moon, W. K., & Hong, E. M. (2024). Comparison and analysis of soil microbial communities in organic and conventional paddy fields by farming season. *Environmental research*.
- Allahyari, S., Honarmand, S. J., Khoramivafa, M., & Zolnorian, H. (2014). Effect of vermicompost extracts (compost tea and vermiwash) on the vegetative growth of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) under hydroponic conditions. *International Journal of Biosciences*.
- Silvestri, S., Nappi, P., & Barberis, R. (1997). Il processo di compostaggio. *L'INFORMATORE AGRARIO*, 53(44), 11-14.
- Tesi, R. (2002). *Colture fuori suolo in orticoltura e floricoltura*. Bologna, Italy: Edagricole.
- Tittarelli, F., & Ortolani, L. (n.d.). La coltivazione fuori suolo in agricoltura biologica: aspetti tecnici e normativi. *Francia 9.15.000*, 24-200.
- Tognoni, F., et al. (2005, November). Tecniche idroponiche per colture in serra. *In Proceedings of Congresso Nazionale Strategie per il Miglioramento dell'Orticoltura Protetta in Sicilia, Scoglitti (RG), Italy (pp. 25-26)*.
- Van Os, E. A., et al. (2003). Disinfezione delle soluzioni nutritive in sistemi fuori suolo a ciclo chiuso. *Informatore Fitopatologico*, 53(3), 30-34.

- Naidu, Y., Meon, S., Kadir, J., & Siddiqui, Y. (2010). Microbial Starter for the Enhancement of Biological Activity of Compost Tea. *INTERNATIONAL JOURNAL OF AGRICULTURE & BIOLOGY*, 12(1).
- Celano, G., & Zaccardelli, M. (2012). Il compost-tea su pomodoro dà più resa e migliore qualità.
- Zaccardelli, M., Villecco, D., Pane, C., Ragosta, G., Palese, A. M., & Celano, G. (2010). Realizzazione di un sistema di compostaggio “on farm” dei residui di pomodoro. *Biol. Ital*, 1, 63-67.
- RECANATINI, L. (2021). TECNICHE DI COMPOSTAGGIO E METODI PER IL RIPRISTINO DELLA FERTILITÀ DEI SUOLI.
- Bozzolo, A. (2010). Influenza dell'apporto di compost sulle caratteristiche del suolo e sull'attività vegetative e produttiva della vite in vigneti dei colli euganei.

Ringraziamenti

Vorrei prendere un momento per esprimere la mia più profonda gratitudine a tutte le persone che hanno contribuito al completamento di questo percorso e di questa tesi, rendendo possibile questo importante traguardo nella mia vita accademica e professionale.

Innanzitutto, desidero rivolgere il più sincero ringraziamento al mio relatore, il Professor Carlo Nicoletto. La sua infinita dedizione e il tempo generosamente donato sono stati elementi chiave nel mio percorso. Un ringraziamento speciale va anche alla mia correlatrice, la Dottoressa Silvia Locatelli. La loro guida, il loro costante sostegno e i preziosi consigli che mi hanno offerto lungo tutto il percorso di ricerca hanno illuminato il mio cammino accademico.

Un sentito ringraziamento va al mio collega di lavoro, guida e amico, Giordano Uberti. La sua dedizione, la sua competenza e il suo incoraggiamento costante hanno rappresentato un sostegno fondamentale, consentendomi di superare le sfide e di raggiungere i miei obiettivi con maggiore sicurezza e determinazione.

Desidero poi esprimere la mia profonda gratitudine ai miei genitori, Alessandro ed Elena. Mio padre, mio idolo e fonte di ispirazione, e mia madre, sempre presente, ascoltandomi e offrendomi preziosi consigli e perle di saggezza. Le loro parole sono un costante sostegno, e la loro prontezza nel sostenere ogni mia sfida è stata una fonte di ispirazione inestimabile. La loro presenza e il loro amore sono il fondamento su cui ho costruito il mio percorso. Il loro sostegno incondizionato e il costante incoraggiamento hanno rappresentato un faro nella mia vita, spingendomi costantemente a dare il meglio di me stessa. Non potrò mai ringraziarli abbastanza per tutto ciò che hanno fatto per me.

Grazie a mio nonno, Remigio Lucchini, che ha sempre creduto in me più di chiunque altro. Il suo sostegno e la sua fiducia in me sono stati sempre ineguagliabili. La sua determinazione incrollabile e la sua passione sono una fonte inesauribile di ispirazione per me.

Non posso dimenticare di ringraziare il mio braccio destro, sempre disponibile ad aiutarmi in ogni occasione, Emanuela Trevisan. La sua presenza costante, la sua voglia di fare e il suo impegno hanno reso il lavoro di ricerca più leggero e gratificante.

Infine, vorrei esprimere la mia profonda gratitudine ai miei supporti psicologici: alle mie sorelle Martina e Laura e alle mie più care amiche Valentina, Matilde, Laura, Caterina e Francesca. Anche se sono nominate alla fine, sono state sempre i pilastri su cui mi sono potuta appoggiare, sempre presenti quando ne avevo più bisogno. Con la loro presenza costante, hanno illuminato i miei momenti

più bui e mi hanno sostenuto attraverso ogni difficoltà emotiva e incertezza che ho incontrato lungo il percorso.

Grazie di cuore a tutte le persone straordinarie che hanno contribuito, con il loro amore, il loro sostegno e la loro presenza, alla realizzazione di questo importante traguardo nella mia vita.

