



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SISTEMI AGRICOLI INNOVATIVI

INFLUENZA DI INTENSITÀ LUMINOSA E FOTOPERIODO
SU CRESCITA E PRODUZIONE DI TRE SPECIE DI BABY
LEAF IN VERTICAL FARM

*INFLUENCE OF LIGHT INTENSITY AND PHOTOPERIOD
ON GROWTH AND YIELD OF THREE BABY LEAF
SPECIES IN VERTICAL FARM*

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
Michele Urriani

Relatore:
PROF. LUIGI LEDDA

Correlatore:
PROF. PAOLA A. DELIGIOS

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Alla mia ragazza, alla mia famiglia e ai miei compagni di corso.

SOMMARIO

SOMMARIO	3
ELENCO DELLE TABELLE.....	4
ELENCO DELLE FIGURE	5
PREMESSA	7
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE	9
CAPITOLO 2.....	26
2.1 Obiettivi del lavoro di tesi	26
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI.....	27
3.1 Descrizione del dispositivo sperimentale.....	27
3.2 Descrizione dei trattamenti	28
3.3 Materiale vegetale utilizzato	29
3.4 Substrato di crescita	29
3.5 Semina.....	30
3.6 Gestione agronomica dell'esperimento	31
3.7 Rilievi	32
3.8 Analisi statistica	34
CAPITOLO 4 RISULTATI.....	35
CAPITOLO 5 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI	44
CAPITOLO 6 BIBLIOGRAFIA	47

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 Consumo di suolo sul territorio nazionale	17
Tabella 2 Dettaglio dei trattamenti. Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD).....	28
Tabella 3 Effetto dei trattamenti e del tipo vegetale sull'altezza e sul peso fresco delle piante campionate a frequenza regolare durante il ciclo di coltivazione. Gdl (gradi di libertà), DdC (data di campionamento), H (altezza/pianta), Pfr (peso fresco/pianta).....	36
Tabella 4 Effetto dei trattamenti e della varietà su numero di foglie, superficie fogliare, peso secco e percentuale di sostanza secca. Gdl (gradi di libertà), Fg (numero/pianta), LA (area fogliare/pianta), Psc (peso secco/pianta), % ss (percentuale di sostanza secca/pianta).	38
Tabella 5 Effetto dei trattamenti e della varietà su altezza, peso fresco, e numero di steli in cavolo nero. Gdl (gradi di libertà), H (altezza/pianta), Pfr (peso fresco/pianta), St (numero di steli/pianta).....	40
Tabella 6 Effetto dei trattamenti su altezza, peso fresco, e numero di steli in mizuna. Gdl (gradi di libertà), H (altezza/pianta), Pfr (peso fresco/pianta), St (numero di steli/pianta)....	42
Tabella 7 Effetto dei trattamenti su altezza, peso fresco, e numero di steli in acetosa. Gdl (gradi di libertà), H (altezza/pianta), Pfr (peso fresco/pianta), St (numero di steli/pianta)....	43

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 0-1 – Stabilimento di Vertical Farming (“Local Green”, Cervesina, PV).....	8
Figura 1-1 Consumo di suolo (https://www.google.com).....	15
Figura 1-2 Localizzazione dei principali cambiamenti dovuti al consumo di suolo tra il 2006 e il 2022 (elaborazioni ISPRA su cartografia SNPA).....	17
Figura 1-3 Idroponica (https://www.growshopitalia.com).....	20
Figura 1-4 Aeroponica (https://centrostudiagronomi.blogspot.com/2011/06/andrea-vuole-sapere-cose-la.html).....	21
Figura 1-5 Acquaponica (https://www.grey-panthers.it).....	21
Figura 1-6 Lampada Lumeny indoor 600w 3 canali con bloom booster.....	22
Figura 1-7 LED lamp with cree CXA Xlamp COB chip.....	23
Figura 3-1 Local Green vista dall’alto.....	27
Figura 3-2 Dispositivo sperimentale.....	28
Figura 3-3 Fase di semina con apposita seminatrice.....	30
Figura 3-4 Vassoi destinati ai 6 diversi trattamenti dopo la semina.....	30
Figura 3-5 Parometro.....	31
Figura 3-6 Sensori per la nursery.....	32
Figura 3-7 Piantine durante la germinazione.....	32
Figura 3-8 Misurazione dei parametri su alcune varietà.....	33
Figura 3-9 Griglia per rilevare le foglie di lattuga.....	33
Figura 4-1 Effetto dell’interazione significativa trattamento × varietà sull’altezza delle piante di lattuga monitorate durante la seconda data di campionamento. Le barre rappresentano la deviazione standard (n=5).....	36
Figura 4-2 Effetto dell’interazione significativa trattamento × varietà sul peso fresco delle singole piante di lattuga prelevate durante la quarta data di campionamento. Le barre rappresentano la deviazione standard (n=5).....	37

Figura 4-3 Effetto dell'interazione significativa trattamento \times varietà sull'altezza delle piante di cavolo nero monitorate durante la terza data di campionamento. Le barre rappresentano la deviazione standard (n=5)..... 40

Figura 4-4 Effetto dell'interazione significativa trattamento \times varietà sul peso fresco delle singole piante di cavolo nero prelevate durante la terza data di campionamento. Le barre rappresentano la deviazione standard (n=5)..... 41

Figura 4-5 Effetto dell'interazione significativa trattamento \times varietà sul numero di steli per pianta registrato durante la seconda data di campionamento. Le barre rappresentano la deviazione standard (n=5)..... 41

PREMESSA

Il presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo principale quello di valutare la risposta a diversi trattamenti di intensità luminosa e di fotoperiodo di sei essenze di baby leaf all'interno di un vertical farm (Figura 0-1). Tale approccio innovativo all'agricoltura sta guadagnando crescente rilevanza sia in Italia che nelle aree più industrializzate, dove vengono realizzati grandi laboratori automatizzati su più livelli per la coltivazione di ortaggi e frutta, al fine di soddisfare le crescenti esigenze alimentari. Un esempio significativo è rappresentato da Local Green, con sede a Cervesima (PV), dove è stata condotta l'attività di tesi. Local Green figura tra le prime realtà italiane a adottare le pareti di coltivazione verticali in ambienti controllati, sfruttando la tecnologia del Vertical Farming. Tale approccio innovativo, diffusosi negli ultimi anni, permette di ridurre significativamente il consumo di suolo e di risorse naturali. Secondo Plant Labs, per produrre un chilo di lattuga in campo aperto, in media, sono necessari 250 litri di acqua, mentre tale quantità si riduce a 20 litri in serra e 1 litro in vertical farm. Analogamente, per quanto riguarda il suolo, in un metro quadro di terreno all'aperto si producono circa 3.9 kg di lattuga all'anno, che salgono a 41 kg in serra e tra gli 80 e i 120 kg in vertical farm. Inoltre, l'ambiente controllato permette di ridurre o eliminare l'utilizzo dei pesticidi. La vicinanza delle vertical farm ai consumatori contribuisce ulteriormente alla riduzione delle emissioni dovute ai trasporti. Inoltre, il sistema delle vertical farm si dimostra efficiente in quanto non dipende dalle condizioni meteorologiche esterne e risulta meno vulnerabile agli eventi avversi, sempre più frequenti a causa dei cambiamenti climatici. Dal punto di vista alimentare, il vertical farming suscita l'aspettativa di diventare una soluzione per fronteggiare il problema della fame nel mondo. Michele Butturini, ricercatore presso il Dipartimento di Orticoltura e Fisiologia dei Prodotti della Wageningen University spiega che la questione è significativa e complessa. Egli sottolinea che, dato il superamento della quota di popolazione mondiale che risiede nelle città rispetto a quella nelle zone agricole, il vertical farming potrebbe rappresentare una preziosa risorsa di approvvigionamento alimentare per le metropoli. Butturini evidenzia un esempio eloquente di questa prospettiva durante la pandemia, nel corso della quale si è assistito a New York a un'esplosione della domanda di

prodotti ottenuti in dispositivi di indoor farming. Questo sottolinea il ruolo cruciale che il vertical farming può avere nel soddisfare la crescente richiesta di cibo, specialmente nelle aree urbane. Attualmente, le aziende che si occupano di vertical farming sono ancora di dimensioni ridotte, pertanto il loro contributo rimane limitato. Tuttavia, l'eventualità di una fragilità nella logistica globale potrebbe rendere il vertical farming un metodo rapido di accesso alla produzione alimentare. Un maggiore contributo in volumi potrebbe arrivare in generale dalle coltivazioni in ambiente controllato, le serre ad alta e media tecnologia. In un articolo del 2010 pubblicato su *Il Sole 24 Ore*, Maccaferri afferma che il vertical farming riduce notevolmente il consumo di suolo e di risorse naturali (Maccaferri, 2010). Questo ambiente controllato offre una garanzia relativa alla produzione, soprattutto in un contesto di instabilità climatica e politica che si prevede nei prossimi decenni. Il cambiamento climatico degli ultimi anni ha suscitato preoccupazioni riguardo al suo impatto negativo sui progressi verso il raggiungimento degli Obiettivi del Millennio, specialmente nella riduzione della povertà e della fame, garantendo al contempo la sostenibilità ambientale. Queste sfide rappresentano un importante e difficile banco di prova per l'agricoltura dei Paesi in via di sviluppo (Pvs), dove il settore agricolo è estremamente sensibile agli eventi climatici, soprattutto nelle aree caratterizzate da bassi redditi e alta incidenza di sottanutrizione. Di conseguenza, una parte considerevole del dibattito politico internazionale è incentrata sulla ricerca delle soluzioni più adeguate a rendere il sistema di produzione agricola e alimentare di queste economie resiliente alle attuali minacce del cambiamento climatico (Sassi, 2010).

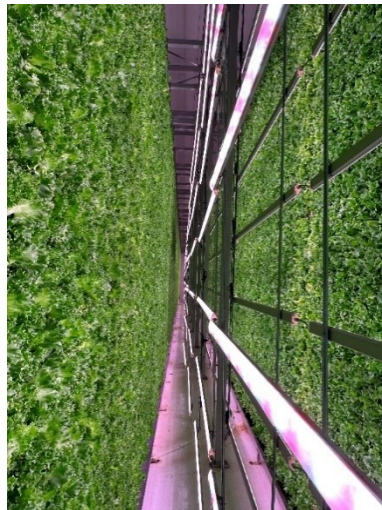


Figura 0-1 – Stabilimento di Vertical Farming (“Local Green”, Cervesina, PV)

Capitolo 1

INTRODUZIONE

1.1 Problematica di riqualificazione dei capannoni dismessi in ambito urbano

1.1.1 Aree industriali dismesse in Italia

Le aree industriali abbandonate sono spesso viste in modo negativo, associate a condizioni di lavoro precarie e inquinamento ambientale. Questi spazi, segnati da una marginalità sia urbana che sociale, sono frequentemente caratterizzati dal degrado urbano. Quando un'attività industriale cessa la sua operatività, non lascia solo uno spazio fisico vuoto, ma continua a influenzare il territorio, contribuendo all'inquinamento con i suoi effetti persistenti. Per molto tempo si è ritenuto che la soluzione migliore fosse bonificare queste aree, purtroppo cancellando spesso testimonianze storiche di notevole valore. Il patrimonio industriale e la bonifica non hanno sempre proceduto di pari passo, ma ci sono stati casi in cui è stato possibile conciliare entrambe le esigenze senza compromessi, trovando soluzioni che valorizzano sia l'ambiente sia il patrimonio storico. In Europa, il riutilizzo delle aree industriali è cominciato negli anni '60, con interventi di rinnovo, rivitalizzazione, e recupero. Solo a partire dalla metà degli anni '80, il patrimonio industriale è stato riconosciuto per il suo valore culturale, promuovendo così la conservazione delle testimonianze delle attività produttive. Le aree industriali dismesse, di solito già servite da importanti infrastrutture urbane come impianti ferroviari o principali reti stradali, possono costituire un'importante risorsa per il ridisegno del tessuto urbano locale, una volta restituite alla città. In molti casi, la riqualificazione di queste aree è stata resa possibile grazie ai fondi regionali per lo sviluppo europeo, i quali attualmente non sono più disponibili. In Italia, secondo i dati ISTAT, circa il 2% dell'intero territorio è costituito da aree industriali dismesse, la maggior parte delle quali è afflitta da problemi di inquinamento, rappresentando un serio rischio per la salute che non può essere trascurato. In Italia, esistono numerosi esempi di ristrutturazioni di successo che hanno trasformato ex fabbriche e stabilimenti in spazi culturali e istituzionali. A Torino, ad esempio, teatri e videoteche hanno preso il posto delle fabbriche di tram, distillerie e stabilimenti delle Officine Grandi Magazzini, riempiendo così il vuoto lasciato da queste strutture industriali. Altrettanto

significativa è la trasformazione degli edifici Pirelli a Milano, oggi sede dell'Università Bicocca. Musei sono stati istituiti all'interno delle ex miniere di zolfo di Peticara Nuovafeltria. Tuttavia, queste iniziative rimangono ancora episodi rari. Nel nostro Paese, spesso si preferisce sfruttare le limitate aree libere di territorio anziché rivalutare zone che rappresentano importanti testimonianze della nostra storia. Oltre a queste rare iniziative di valorizzazione, purtroppo ci sono casi di fallimento, come quella di Bagnoli. Quest'area fu la sede della più grande industria siderurgica del Mezzogiorno, ospitando fabbriche come l'Ilva, l'industria chimica dell'Eternit e fabbriche per la lavorazione di coloranti. Nel 1985, in questa area, circa 16 mila persone lavoravano attivamente. Tuttavia, appena dopo 5 anni, l'altoforno venne spento e gli operai dell'Italsider, con l'ultimo pezzo di acciaio incandescente, prepararono il loro ultimo caffè. La speranza era quella di trasformare l'area una volta occupata dalla fabbrica inquinante in parchi e poli museali, creando posti di lavoro legati al turismo. Tuttavia, a distanza di vent'anni, al posto delle ciminiere abbattute non sono sorti *studios* televisivi o nuove attività, ma in quei 2 milioni di metri quadrati sono rimaste solo sostanze pericolose come amianto e metalli pesanti. In questo scenario desolante, sorge un piccolo baluardo di speranza rappresentato dalla Città della Scienza, un museo scientifico all'avanguardia, dove la comunità locale vive e lavora all'interno di una vecchia fabbrica chimica dal 1993. Ideata dal fisico Vittorio Silvestrini, rappresenta il primo esempio di riconversione completamente riuscita. Questo complesso ospita il più grande e innovativo museo *hands on* d'Italia, e uno dei più grandi e innovativi musei interattivi d'Europa. Il nostro Paese potrebbe trarre ispirazione da questa esperienza, dovendo forse avere il coraggio, soprattutto attraverso l'approvazione di nuove leggi, di trasformare queste zone "ex" – che portano con se un triste retaggio – in splendide realtà di rinascita economica e sociale (Aiello, 2012).

1.1.2 Riqualificazione delle aree industriali in ambito agricolo e il progetto Ri-Genera

Le nuove frontiere dell'agricoltura, sostenibile e innovativa si estendono alle aree industriali dismesse, donando nuova vita a spazi abbandonati e capannoni ormai inutilizzati. In questi luoghi, che l'industria ha abbandonato e che sono considerati "vuoti" per le attività produttive, grazie alle innovazioni tecnologiche, alla ricerca e alla flessibilità del settore primario, diventa possibile coltivare prodotti agricoli in condizioni ottimali, riducendo l'uso di pesticidi e il consumo energetico.

Uno degli esempi più significativi è rappresentato dalle coltivazioni idroponiche, che richiedono un ridotto consumo d'acqua e si svolgono in ambienti "indoor", consentendo il recupero di spazi dismessi per attività produttive innovative e a basso impatto ambientale. Questo metodo, conosciuto come la nuova frontiera delle "vertical farm", permette di coltivare ortaggi, fiori, frutta e prodotti "nutraceutici" in ambienti con condizioni climatiche controllate. Tale approccio si differenzia dalla coltivazione tradizionale "in orizzontale" poiché avviene in spazi chiusi e limitati, riducendo l'uso di agrofarmaci e altri prodotti per il controllo dei parassiti. I vecchi capannoni dismessi diventano, così, orti e giardini del futuro, ideali per una produzione agricola che si concentra sul risparmio energetico e la tutela ambientale, grazie alla ricerca tecnologica condotta dall'ENEA, dal mondo universitario e all'apporto innovativo di alcune aziende.

Da questa collaborazione nasce il "Progetto Ri-Genera", sostenuto dalla Camera di Commercio, dalla Provincia e dal Comune di Padova, attraverso la firma di un protocollo d'intesa per la realizzazione e lo sviluppo di produzioni idroponiche in spazi dismessi, coinvolgendo ENEA, Coldiretti Padova, Parco Scientifico e Tecnologico Galileo, Idromeccanica Lucchini, Gentilinidue e Advance Srl (gruppo di spin-off dell'Università di Padova). Gli obiettivi dei promotori di questo accordo consistono nell'accelerare l'industrializzazione dei processi di vertical farming in Italia, nel favorire il recupero e la riqualificazione di spazi dismessi, e nel promuovere lo sviluppo di attività produttive sostenibili, di qualità e ad alto valore nutraceutico. La presenza di un'eccellenza universitaria nella ricerca agronomica e ingegneristica, una consolidata tradizione agricola e industriale, e un sistema imprenditoriale dinamico e aperto all'innovazione, rendono il territorio della regione Veneto particolarmente idoneo per l'avvio di attività sperimentali che precedono la realizzazione del progetto. In caso di esito positivo, questo modello potrebbe essere replicato a livello nazionale e internazionale.

Questa iniziativa è nata principalmente da alcune considerazioni di ordine generale. La produzione alimentare rappresenta una delle maggiori sfide del prossimo futuro, a causa dell'aumento della popolazione mondiale, della limitata disponibilità di terreno coltivabile, e dei crescenti cambiamenti climatici. È necessario, pertanto, ridurre l'impatto ambientale delle produzioni agricole, massimizzando l'efficienza nell'uso delle risorse idriche e nutrizionali, e minimizzando l'impiego di prodotti chimici di sintesi, al fine di offrire al consumatore finale un prodotto sostenibile e sicuro. Massimo Bressan, presidente di Coldiretti Padova, illustra: "Le colture idroponiche, note anche come coltivazioni 'senza suolo' o 'fuori suolo',

rappresentano una delle nuove frontiere dell'agricoltura. Questo settore sta crescendo rapidamente sia in Italia che all'estero. Inoltre, contribuiscono ad affrontare l'importante aspetto della riqualificazione dei capannoni industriali dismessi, un'emergenza economica e sociale in molte regioni italiane, soprattutto nel Centro-Nord. Tuttavia, rappresentano anche un'opportunità significativa per il rinnovamento e la ripresa delle attività produttive locali. Le 'vertical farm', realizzate con tecnologie avanzate di coltivazione idroponica indoor, consentono un notevole aumento della produzione, riducendo il consumo di risorse naturali, accorciando le distanze tra produttore e consumatore e minimizzando l'uso di fitofarmaci".

Ci sono già esempi concreti di queste applicazioni. ENEA ha sviluppato, in collaborazione con Idromeccanica Lucchini, un modello di 'vertical farm' mobile denominato "BoxXland". Si tratta di un impianto modulare ad alta tecnologia per la coltivazione in container di prodotti orticoli in verticale e fuori suolo, senza l'uso di insetticidi. Questi ambienti sono illuminati con luce a LED e gestiti da software che ne controllano l'irrigazione e il condizionamento dell'aria.

Il primo prototipo di 'vertical farm', creato per EXPO 2015, è stato presentato in numerose fiere nazionali e internazionali nel settore agroalimentare ed è attualmente disponibile in Italia e all'estero. Inoltre, sempre ENEA, in collaborazione con Gentilini e con i Dipartimenti di Agronomia, Animali, Alimenti, Risorse Naturali e Ambiente (DAFNAE) e Ingegneria dell'Informazione (DEI) dell'Università degli Studi di Padova, ha proposto nel 2016 il progetto "Vertical Farm 4.0" nell'ambito del programma Horizon 2020 SME Instruments – fase 1 dell'Unione Europea. Questo progetto mira al recupero di edifici industriali dismessi attraverso la creazione di 'vertical farm' e ha ottenuto il "Seal of Excellence" dalla Commissione Europea. Un altro esempio è il sistema innovativo di 'vertical farming' in edifici dismessi chiamato "Arkeofarm", sviluppato da ENEA e Lucchini. Questo impianto permette coltivazioni orticole intensive con sviluppo multipiano verticale, utilizzando avanzate tecniche idroponiche in un ambiente chiuso e climatizzato, con illuminazione artificiale a LED. A seconda della superficie coltivata, può essere altamente automatizzato con sistemi automatici o robotizzati per tutte le operazioni, dalla semina alla raccolta e al confezionamento. Entrambi i tipi di 'vertical farm', sia quelli in container che quelli in edifici, possono contribuire alla rinascita di beni mobili e immobili dismessi, conferendo loro una nuova destinazione produttiva. Ciò genera un significativo impatto economico, stimolando la nascita di distretti agroalimentari avanzati anche nelle aree urbane e periurbane, creando preziose opportunità di diversificazione e aprendo nuovi mercati.

Affinché tali soluzioni possano diffondersi su larga scala, è necessario superare gli ostacoli economici derivanti dai costi elevati di investimento e gestione, dovuti all'alto grado di automazione delle linee produttive e ai consumi energetici rilevanti. Inoltre, è importante considerare la percezione della qualità dei prodotti, non sempre in linea con le esigenze del mercato.

Advance, spin-off dell'Università di Padova, svolge un ruolo cruciale in questo contesto grazie alle sue competenze specifiche. Questa entità è in grado di selezionare i tipi di coltura idonei, ottimizzare i processi produttivi, migliorare la qualità dei prodotti e condurre iniziative educative e di formazione professionale. Quest'ultime sono volte a migliorare la preparazione degli operatori e a sensibilizzare i produttori, i consumatori e le istituzioni sui vantaggi delle tecniche di coltivazione idroponica e di vertical farming. In collaborazione con il Parco Scientifico Tecnologico Galileo, *Advance* può ottimizzare i processi produttivi per aumentare la sostenibilità economica e ambientale. Questo include l'analisi delle caratteristiche e delle dinamiche dei settori di riferimento, l'identificazione delle filiere e delle coltivazioni più stabili e redditizie, nonché lo sviluppo di strategie di marketing e comunicazione per rafforzare la competitività delle vertical farm e aumentare la loro penetrazione nei mercati.

Coldiretti, d'altra parte, contribuisce identificando gli spazi adatti per le vertical farm, individuando gli imprenditori interessati a intraprendere queste attività e definendo le figure professionali necessarie per la loro gestione. Inoltre, in collaborazione con partner pubblici e privati, promuove la diffusione della cultura dell'idroponica *high tech* tra i propri associati, le istituzioni e il pubblico in generale (Oggi, Redazione Padova, 2019).

1.2 Consumo di suolo in Italia

1.2.1 Valore del suolo e consumo, copertura, uso e degrado del suolo

Il suolo costituisce lo strato superiore della crosta terrestre, caratterizzato dalla presenza di componenti minerali, sostanza organica, acqua, aria e organismi viventi. Questo strato rappresenta l'interfaccia tra la terra, l'aria e l'acqua, ospitando gran parte della biosfera. Essendo una risorsa vitale, è fondamentale per l'economia, la società e l'ambiente. Il suolo sano fornisce alimenti, aumenta la nostra resilienza ai cambiamenti climatici e ai fenomeni meteorologici estremi come siccità e inondazioni, contribuendo al nostro benessere. Inoltre, ha la capacità di immagazzinare carbonio, assorbire, conservare e filtrare l'acqua, e offre servizi essenziali come alimenti sicuri e nutrienti, oltre a materiale biologico per settori non alimentari della bioeconomia (Commissione Europea, 2023).

Proteggere e promuovere la salute del suolo è di fondamentale importanza, considerando il persistente degrado di questo ecosistema vitale, parte integrante della biodiversità e risorsa non rinnovabile. I costi derivanti dall'inazione riguardo al degrado del suolo nell'Unione Europea superano i 50 miliardi di euro all'anno (Parlamento Europeo, 2021). Le funzioni ecologiche di un suolo di buona qualità non solo hanno un valore intrinseco, ma anche un valore economico e sociale, fornendo servizi ecosistemici di approvvigionamento (quali prodotti alimentari e materie prime), regolazione e mantenimento (influenza sul clima, sequestro e stoccaggio del carbonio, controllo dell'erosione, regolazione della fertilità e della qualità dell'acqua, protezione da fenomeni idrologici estremi, conservazione della biodiversità) e culturali (ricreazione, patrimonio naturale, paesaggio, funzioni etiche e spirituali) (Commissione Europea, 2023).

Il consumo di suolo è strettamente legato alle dinamiche di sviluppo urbano e infrastrutturale, principalmente dovuto alla costruzione di nuove strutture, all'espansione delle aree urbane, alla densificazione o alla trasformazione dei terreni all'interno delle aree urbane. Si definisce consumo di suolo la trasformazione di una copertura non artificiale (suolo non consumato) in una copertura artificiale del suolo (suolo consumato), distinguendo tra consumo di suolo permanente (dovuto a una copertura artificiale permanente) e consumo di suolo reversibile (dovuto a una copertura artificiale reversibile). Il consumo netto di suolo è valutato attraverso il bilancio tra consumo di suolo e aumento di superfici agricole, naturali e seminaturali dovuto a interventi di recupero, demolizione, de-impermeabilizzazione, rinaturalizzazione o altro (Commissione Europea, 2012). Il termine "copertura del suolo" (*Land Cover*) indica la copertura fisica della superficie terrestre, comprendente superfici artificiali, aree agricole, foreste, aree seminaturali, zone umide, corpi idrici, come definito dalla direttiva 2007/2/CE. La copertura artificiale può essere permanente (edifici, infrastrutture pavimentate, ecc.) o reversibile (aree non pavimentate con rimozione della vegetazione e asportazione o compattazione del terreno dovuta a infrastrutture, cantieri, piazzali, ecc.). Quindi, è importante notare che solo una parte dell'area di insediamento può essere considerata effettivamente artificiale, mentre giardini, parchi urbani e altri spazi verdi non dovrebbero rientrare in questa definizione (EEA, 2023). Tuttavia, tra le superfici artificiali sono comprese anche quelle presenti nelle zone agricole e naturali (Commissione Europea, 2013).

L'impermeabilizzazione del suolo rappresenta la forma più visibile e comune di copertura artificiale, avviene quando una porzione di terreno viene permanentemente coperta da materiali artificiali come asfalto o cemento per la costruzione di edifici, strade e altre

infrastrutture. Altre forme di consumo del suolo possono andare dalla completa perdita della "risorsa suolo" dovuta all'escavazione (anche attività di estrazione a cielo aperto) fino a una perdita parziale della funzionalità del suolo, più o meno recuperabile. Quest'ultima può essere causata da fenomeni come la compattazione in aree non pavimentate adibite a parcheggio. Questo processo può avvenire sia su aree non consumate in precedenza, sia su aree già consumate ma non ancora impermeabilizzate. Un approccio differente, ma con una connessione da distinguerne l'analisi, è rappresentato dall'uso del suolo, il quale costituisce il principale riferimento nella pianificazione e mira all'obiettivo dell'azzeramento del consumo del suolo. L'uso del suolo (*Land Use*) è un concetto differente dalla copertura del suolo e riflette le interazioni tra l'uomo e il terreno. È una descrizione di come il suolo venga o possa essere utilizzato per attività umane, come residenziale, industriale, commerciale, agricolo, silvicolo, ricreativo, e altre destinate o programmate per il futuro secondo la direttiva 2007/2/CE. Il degrado del suolo è un fenomeno caratterizzato dall'alterazione delle condizioni del suolo, determinata dalla riduzione o dalla perdita della sua produttività biologica ed economica, principalmente a causa dell'attività umana (Oldeman et al., 1991). Oltre alla produttività, altri parametri come la copertura del suolo, l'erosione idrica o il contenuto di carbonio organico possono essere utilizzati per valutare il degrado del suolo (Lal, 2015). Altre definizioni di degrado del suolo evidenziano la perdita, talvolta irreversibile, di biodiversità, funzioni e capacità di fornire servizi ecosistemici (Orgiazzi et al., 2016).



Figura 1-1 Consumo di suolo
(<https://www.google.com>)

Il monitoraggio del consumo di suolo in Italia è affidato all'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) e al Sistema nazionale a rete per la protezione dell'ambiente, come previsto dalla Legge 132 del 2016. Questo monitoraggio ha lo scopo di fornire ogni anno un quadro aggiornato sull'andamento del consumo di suolo, sulle dinamiche di trasformazione del territorio e sulla crescita urbana. Questo viene realizzato attraverso la produzione di una cartografia ufficiale di riferimento e l'elaborazione di indicatori ambientali

e territoriali. In questo modo, si ottiene una visione chiara e periodica dell'evoluzione delle trasformazioni territoriali, inclusi i cambiamenti nella copertura del suolo e l'espansione urbana. Tale monitoraggio consente di valutare le tendenze nel tempo e di adottare misure di gestione e pianificazione del territorio più consapevoli ed efficaci (SNPA, 2023).

1.2.2 Stato ed evoluzione del consumo di suolo a livello nazionale

Il consumo di suolo continua a incidere sul territorio nazionale con una velocità sempre più elevata. Nell'ultimo anno, le nuove coperture artificiali hanno coinvolto ulteriori 76.8 km² (come mostrato nella Tabella 1), rappresentando un aumento del 10.2% rispetto al 2021. Questo equivale a una media di oltre 21 ettari al giorno, la cifra più alta degli ultimi 11 anni, in cui non si era mai superata la soglia dei 20 ettari giornalieri. La crescita delle superfici artificiali ha comportato una trasformazione del suolo di circa 2.4 metri quadrati al secondo, con un incremento che è stato soltanto parzialmente compensato dal ripristino di aree naturali (6 km² in totale, principalmente associate al recupero di aree di cantiere o di altro suolo consumato reversibile).

Tuttavia, queste azioni di recupero non sono state sufficienti a raggiungere l'obiettivo di azzerare il consumo netto di suolo, che negli ultimi dodici mesi ha raggiunto i 70.8 km², di cui 14.8 km² di consumo permanente. A questo valore vanno aggiunti altri 7.5 km² che, nell'ultimo anno, sono passati da suolo consumato reversibile (come rilevato nel 2021) a permanente, contribuendo complessivamente a un aumento dell'impermeabilizzazione di 22.3 km².

In totale, la crescita netta delle superfici artificiali nell'ultimo anno ha comportato una densità di consumo di suolo pari a 2.35 m² per ogni ettaro di territorio italiano. I cambiamenti osservati hanno interessato specifiche aree del Paese (come mostrato nella Figura 1-2), con una maggiore incidenza nelle regioni della pianura Padana, soprattutto nelle zone lombarde e venete (particolarmente lungo l'asse Milano-Venezia) e lungo la via Emilia.

Il fenomeno del consumo di suolo rimane significativo lungo l'intera costa adriatica, dal Veneto alla Puglia, con densità elevate di trasformazione soprattutto nei tratti costieri delle regioni Romagna, Marche e Puglia. Il Salento, in particolare, conferma una forte tendenza degli ultimi anni con una significativa presenza di cambiamenti territoriali.

Tra le aree urbane più colpite figurano ancora Roma e Napoli. La maggiore densità del consumo di suolo è riscontrabile soprattutto lungo la fascia costiera entro un chilometro dal mare, nelle pianure, nelle città e nelle zone urbane e periurbane dei principali centri abitati e dei comuni limitrofi (ISPRA) (SNPA, 2023).

Tabella 1 Consumo di suolo sul territorio nazionale

Consumo di suolo (km ²)	76.8
Consumo di suolo netto (km ²)	70.8
Consumo di suolo netto (incremento %)	0.33
Densità del consumo di suolo netto (m ² /ha)	2.35
Impermeabilizzazione complessiva (km ²)	22.3
Incremento altre coperture non considerate (km ²)	8.5

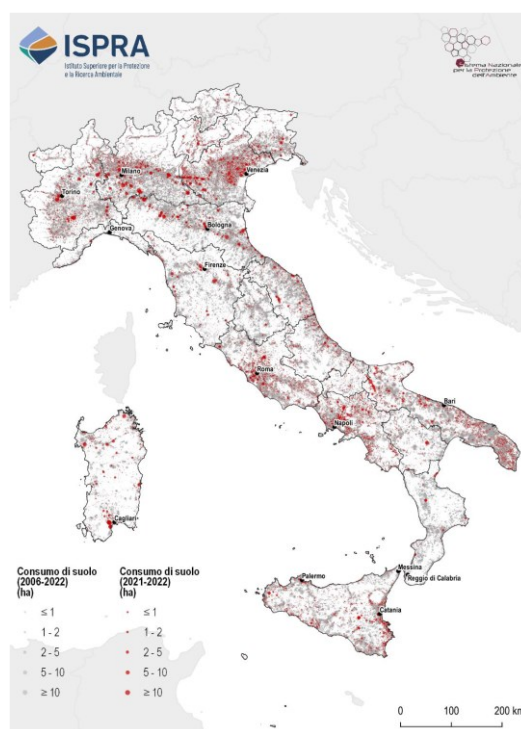


Figura 1-2 Localizzazione dei principali cambiamenti dovuti al consumo di suolo tra il 2006 e il 2022 (elaborazioni ISPRA su cartografia SNPA)

1.2.3 Strategie per contrastare il consumo di suolo

La Commissione Europea ha recentemente approvato la Strategia dell'UE per il suolo per il 2030, evidenziando l'importanza della salute del suolo per raggiungere gli obiettivi di clima e biodiversità del Green Deal europeo. Tale strategia ha delineato un quadro e misure concrete

per proteggere, ripristinare e utilizzare in modo sostenibile i suoli, con l'obiettivo di garantire e preservare la salute degli ecosistemi suoli entro il 2050, attraverso azioni pianificate entro il 2030.

Un punto chiave di questa strategia è il piano di approvare entro il 2023 una nuova legge sulla salute del suolo, volta a garantire la parità di condizioni e un elevato livello di protezione dell'ambiente e della salute. L'obiettivo ambizioso è quello di avere entro il 2050 tutti gli ecosistemi suoli dell'UE in condizioni di buona salute e maggiore resilienza. Questa prospettiva richiede cambiamenti significativi nel decennio attuale, tra cui il non aumento del degrado del suolo entro il 2030 e il raggiungimento del consumo netto di suolo pari a zero entro il 2050.

Per affrontare il consumo e l'impermeabilizzazione del suolo, la Strategia suggerisce una serie di azioni: stabilire obiettivi nazionali, regionali e locali per ridurre il consumo netto di suolo entro il 2030, integrare la "gerarchia del consumo di suolo" nei piani comunali e dare priorità al riutilizzo e al riciclo di terreni già costruiti. Ciò implica la protezione dei suoli a livello nazionale, regionale e locale, attraverso iniziative di regolamentazione e la graduale abolizione degli incentivi finanziari che contrastano questa gerarchia, come eventuali incentivi fiscali locali per la conversione di terreni agricoli o naturali in ambienti edificati.

Queste iniziative diventano cruciali considerando la riduzione delle risorse primarie e dei terreni coltivabili, la necessità di contenere l'utilizzo di pesticidi e concimi, e l'avanzamento della tecnologia che sta trasformando l'agricoltura verso un approccio che si discosta sempre più dal terreno.

Questo progetto, sebbene possa sembrare una negazione dell'agricoltura tradizionale, rappresenta una sfida affascinante, cercando di integrare la coltivazione tradizionale con l'alta tecnologia, coltivando piante destinate all'alimentazione umana in luoghi chiusi e senza l'uso diretto del terreno. L'avanzamento delle tecnologie di coltivazione indoor, che consentono la produzione di ortaggi all'interno di strutture chiuse senza beneficiare dell'illuminazione naturale, ha ottenuto notevole sviluppo in diverse parti del mondo come Giappone, Stati Uniti ed alcune regioni del Nord Europa. Principalmente, tre tecnologie sono state utilizzate per sostenere questo tipo di coltivazione:

- Aeroponica: Le radici delle piante vengono immerse in una nebbia di acqua e nutrienti.
- Idroponica: Le radici delle piante sono a contatto con una soluzione nutritiva.
- Acquaponica: Oltre alla coltivazione delle piante, si affianca l'allevamento di pesci.

Queste tecniche sono supportate dall'illuminazione artificiale a LED (diodi a emissione di luce) e consentono la realizzazione di coltivazioni multilivello, note come vertical farm. Questi metodi offrono numerosi vantaggi:

1. Riduzione significativa dei consumi di acqua, con un risparmio fino al 90% rispetto alle coltivazioni tradizionali.
2. Riduzione significativa dell'uso di agrofarmaci.
3. Coltivazione indipendente dal clima, permettendo una presenza costante sul mercato durante tutto l'anno.
4. Possibilità di coltivare prodotti a chilometro zero.
5. Aumento della produzione per unità di superficie grazie alla coltivazione su più livelli.
6. Coltivazioni completamente automatizzate, riducendo la dipendenza dal lavoro umano.

Tuttavia, esistono anche dei lati negativi. I prodotti ottenuti da queste coltivazioni indoor tendono ad avere prezzi più elevati rispetto a quelli provenienti dalla coltivazione tradizionale. Inoltre, attualmente questo tipo di progetto richiede una sostenibilità economica che in alcuni casi non è ancora garantita, anche se molte imprese stanno cercando di adattarsi a queste nuove esigenze di mercato.

Nonostante queste coltivazioni indoor soddisfino i requisiti per essere considerate attività agricole ai sensi dell'articolo 2135 del Codice civile, la normativa fiscale risulta complessa e di difficile applicazione. Questo solleva dubbi riguardo alla conformità fiscale per gli imprenditori agricoli che operano in questo settore. Si pone quindi la domanda se il legislatore terrà conto di questi sviluppi, estendendo ai coltivatori indoor gli stessi trattamenti fiscali concessi agli imprenditori agricoli tradizionali, considerando che in alcuni aspetti queste nuove tecniche stanno gradualmente sostituendo le attività agricole convenzionali.

1.3 Fuori suolo

1.3.1 Nuovi sistemi di coltivazione fuori suolo

I sistemi di coltivazione fuori suolo o idroponici hanno in comune la caratteristica principale di coltivare le piante senza la presenza diretta del suolo. Tuttavia, ci sono delle distinzioni tra di essi:

- Coltivazioni fuori suolo: In questi sistemi, le piante non hanno le radici nel terreno, ma sono supportate da substrati, che possono essere organici o inorganici (come torba o perlite). Questi substrati servono principalmente da sostegno per le piante, mentre la fornitura dei nutrienti avviene attraverso la fertirrigazione. Questa tecnica impiega

l'acqua come vettore per distribuire gli elementi nutritivi mediante sistemi di microirrigazione.

- Coltivazioni idroponiche: Il termine "idroponica" deriva dalle parole greche "hidro" (acqua) e "ponos" (lavoro), indicando il lavoro dell'acqua nel processo di coltivazione delle piante. In questo tipo di coltivazione, le radici delle piante sono immerse direttamente in una soluzione nutritiva. Due esempi comuni di sistemi idroponici sono il *floating system*, in cui le piante galleggiano su una soluzione nutritiva, e la *Nutrient Film Technique* (NFT), che prevede la crescita delle piante con le radici costantemente immerse in una sottile pellicola d'acqua che trasporta i nutrienti. Entrambe queste tecniche di coltivazione offrono un controllo più preciso sulle risorse nutritive disponibili per le piante, consentendo una crescita più efficiente e una riduzione del consumo di acqua rispetto alla coltivazione tradizionale in suolo.



Figura 1-3 Idroponica (<https://www.growshopitalia.com>)

L'aerponica è un metodo idroponico che impiega radici delle piante sospese nell'aria. In questo sistema, le piante non crescono in una soluzione nutritiva liquida come negli altri tipi di coltivazione idroponica, ma le radici vengono nebulizzate o irrorate direttamente con una soluzione nutritiva tramite appositi ugelli.



Figura 1-4 Aeroponica
 (<https://centrostudiagronomi.blogspot.com/2011/06/andrea-vuole-sapere-cose-la.html>)

L'aquaponica è un sistema ibrido che combina un sistema di coltivazione idroponica con un sistema di allevamento ittico. Questi due sistemi interconnessi consentono all'acqua utilizzata nell'allevamento dei pesci, insieme ai suoi residui organici e nutrienti, di essere filtrata e inviata al sistema idroponico per nutrire le piante. Le coltivazioni idroponiche stanno diventando sempre più diffuse, specialmente nella produzione di ortaggi, poiché offrono la possibilità di massimizzare l'uso efficiente dell'acqua e dei nutrienti. In contesti urbani privi di terreni agricoli, queste soluzioni rappresentano spesso l'unica opzione disponibile, insieme alle coltivazioni indoor o alle vertical farm.

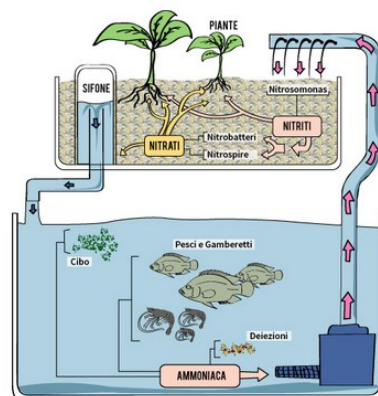


Figura 1-5 Acquaponica
 (<https://www.grey-panthers.it>)

1.3.2 Illuminazione a LED ed efficienza nell'uso della luce

Le lampade a LED rappresentano una tecnologia innovativa che consente la coltivazione indoor delle piante in modo efficace e accessibile. Questi sistemi consentono a chiunque di creare un orto casalingo con risultati eccellenti. Le lampade utilizzano diodi a emissione luminosa per generare una luce di alta qualità, offrendo diverse opzioni in termini di potenza, costi, durata e qualità del prodotto finale. Questa varietà di soluzioni mira a soddisfare le varie esigenze degli imprenditori agricoli. Esistono diversi modelli di lampade a LED per la coltivazione indoor a basso consumo, tutti *Full Spectrum*, caratterizzati da consumi energetici ridotti, resistenza termica elevata e uno spettro luminoso simile a quello solare, sebbene privi di opzioni di regolazione.

Una di queste opzioni è rappresentata dalle lampade a LED Lumeny (SMD 3CH), che emettono una luce penetrante e offrono una certa flessibilità nella regolazione della luminosità. Questi dispositivi sono dotati di un sistema a 3 canali di crescita regolabili (Veg, Agro e Bloom), ottimizzati per fornire alle piante la quantità di luce adatta a ciascuna fase di sviluppo. Questo permette di gestire l'illuminazione in modo mirato, consentendo di risparmiare energia in confronto ai modelli più basilari.

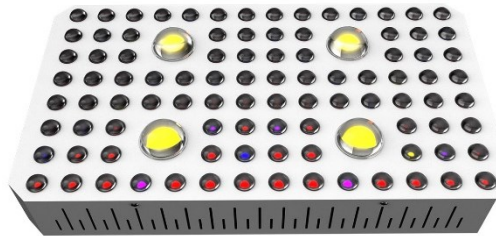


***Figura 1-6 Lampada Lumeny indoor
600w 3 canali con bloom booster***

Lumeny Cree Xlamp (SMD+COB CREE Xlamp 3CH)

Le lampade Lumeny Cree Xlamp (SMD+COB CREE Xlamp 3CH) sono conosciute come HPS Killer Cree e utilizzano LED di alta qualità della marca Cree, garantendo un'elevata efficienza nella coltivazione indoor. Questo modello, anch'esso dotato di un sistema a 3 canali per la regolazione della luce, offre un'eccellente efficienza energetica, consentendo di risparmiare sui costi energetici. La combinazione della tecnologia SMD con il LED COB (*chip*

on board) consente al coltivatore di mantenere un controllo preciso sull'illuminazione emessa dalla lampada, contribuendo a massimizzare l'efficacia della coltivazione.



**Figura 1-7 LED lamp with cree CXA
Xlamp COB chip**

La scelta di utilizzare sistemi di illuminazione a LED per la coltivazione indoor permette di monitorare attentamente lo sviluppo delle piante e godere dei numerosi vantaggi che le lampade a LED offrono. Tra questi:

- Risparmio energetico: i sistemi a LED consentono di controllare i consumi energetici, riducendoli fino all'80% rispetto alle tradizionali lampade HPS (sodio ad alta pressione). Ciò si traduce in un notevole risparmio energetico e in costi elettrici contenuti, un aspetto positivo anche per l'ambiente.
- Resa produttiva superiore: le lampade a LED migliorano la resa produttiva fornendo una maggiore penetrazione luminosa, permettendo una crescita ottimale delle piante e garantendo una maggiore quantità e qualità di frutti e fiori.
- Controllo della temperatura: queste lampade regolano la temperatura all'interno dell'ambiente di coltivazione, evitando un eccessivo surriscaldamento e riducendo la necessità di sistemi di raffreddamento esterni.
- Regolazione della luce: i moderni sistemi di lampade a LED consentono di adattare l'intensità della luce in base alle esigenze del coltivatore e alle fasi di crescita delle piante, garantendo un'illuminazione ottimale in ogni momento.
- Facile installazione: l'installazione delle lampade a LED è semplice e può essere effettuata facilmente anche dai principianti, spesso con un kit di montaggio incluso.
- Durata lunga: un altro vantaggio significativo delle lampade a LED è la loro lunga durata, che può superare le 100.000 ore, equivalente a oltre 10 anni di utilizzo.

Il film "The Martian" ha mostrato un'esperienza di coltivazione di piante nello spazio, e nonostante sia di fantasia, è ispirato alle ricerche della NASA su sistemi di produzione

alimentare nello spazio. Un recente studio condotto da diverse università ha dimostrato che l'utilizzo di potenti lampade LED può accelerare notevolmente la crescita delle piante, consentendo fino a 6 cicli annuali di raccolto. Questa scoperta potrebbe contribuire a risolvere problemi legati all'aumento demografico. Le piante, disposte con una densità elevata e sottoposte a uno specifico spettro luminoso per 22 ore al giorno, crescono ad una velocità straordinaria (Growledlamp, s.d.).

1.4 Sostenibilità ambientale e risparmio energetico

Secondo la Fondazione Barilla Center for Food & Nutrition, il 90% delle risorse idriche globali è consumato da attività come allevamenti, coltivazioni e produzione di alimenti trasformati, con l'agricoltura che da sola rappresenta il 70% del consumo di acqua. Inoltre, i dati Istat del 2021 evidenziano che l'Italia, nell'UE 27, ha estratto la quantità più elevata di acqua dolce negli ultimi vent'anni, pari a 9.2 miliardi di metri cubi, per uso potabile da fonti superficiali o sotterranee.

In un contesto in cui la sicurezza alimentare è compromessa da emergenze o cambiamenti climatici che rendono alcune aree inadatte alla coltivazione, diventa cruciale trovare soluzioni che riducano il consumo di energia, risorse e manodopera. Basandosi su questo concetto, si sviluppa l'ONO *Exponential Farming*, una startup veronese attiva nell'*agritech*, ideatrice di una piattaforma di agricoltura verticale modulare completamente automatizzata.

Questa piattaforma, che si adatta a qualsiasi *location*, favorisce una coltivazione idroponica indoor efficiente, riducendo notevolmente il consumo di acqua, eliminando l'uso di pesticidi e prodotti chimici. Thomas Ambrosi, fondatore di ONO *Exponential Farming*, sottolinea che per garantire il futuro è necessaria una rivoluzione totale: "È così che abbiamo concepito ONO *Exponential Farming*. Ed è così che la stiamo portando avanti".

Le farm di ONO *Exponential Farming* (EF) producono triplicando il raccolto utilizzando solo il 2% dell'acqua richiesta da una coltivazione tradizionale, rispettando le esigenze naturali di ogni specie vegetale. L'acqua utilizzata può essere riciclata e riutilizzata, riducendo i costi e minimizzando i rifiuti. Inoltre, la soluzione brevettata da ONO EF riduce significativamente il consumo energetico, con tecnologie che hanno mostrato una diminuzione del 70% nel caso dei LED e del 60% nella climatizzazione delle camere di crescita nell'ultimo anno.

L'EF di ONO, grazie al nuovo design delle macchine e alla capacità di costruire impianti alti fino a 16 metri senza intervento umano, offre una densità di coltura tripla rispetto ai sistemi concorrenti, con un costo al metro quadro del 73% inferiore e una riduzione del costo del

lavoro del 95%. Questa soluzione può essere applicata non solo nel settore alimentare, ma anche per la produzione di piante destinate a cosmetici, nutraceutici e estrazioni di molecole farmacologiche.

ONO EF punta a utilizzare piante come bioreattori naturali, come il tabacco, per produrre farmaci specifici per individui, raggiungendo un incremento produttivo 400 volte superiore rispetto ai laboratori (AGRIFOOD.TECH, 2022).

Capitolo 2

2.1 Obiettivi del lavoro di tesi

Nell'ambito dell'orticoltura moderna, la coltivazione delle "baby leaf" rappresenta un settore in crescita grazie alla crescente domanda di alimenti freschi e nutrienti. Le "baby leaf" sono apprezzate per la loro tenerezza, il sapore delicato e il profilo nutrizionale superiore rispetto alle foglie mature. Tuttavia, la produzione efficiente di queste piante richiede una comprensione approfondita dei fattori ambientali che ne influenzano la crescita e lo sviluppo. Tra questi, la luce gioca un ruolo cruciale, essendo una delle principali risorse che determinano i processi fotosintetici e, di conseguenza, la produttività delle colture.

Questo lavoro di tesi si inserisce in tale contesto, con l'obiettivo di esplorare l'effetto di diverse intensità luminose e fotoperiodi su tre specie di baby leaf. Lo studio si concentra sulle risposte morfologiche e biometriche delle piante, valutando parametri come l'altezza, il numero di steli per pianta e l'estensione delle foglie. Questi aspetti sono fondamentali non solo per comprendere le dinamiche di crescita delle baby leaf, ma anche per ottimizzare le pratiche di coltivazione al fine di massimizzare la resa e la qualità del prodotto finale.

La ricerca proposta si prefigge di contribuire alla letteratura scientifica esistente, fornendo dati utili per agricoltori e ricercatori interessati a migliorare le tecniche di coltivazione in ambiente controllato. Le implicazioni di questo studio possono estendersi a vari contesti, inclusi la produzione commerciale in serra e l'agricoltura urbana, offrendo soluzioni pratiche per una coltivazione sostenibile ed efficiente delle baby leaf.

Capitolo 3

MATERIALI E METODI

3.1 Descrizione del dispositivo sperimentale

L'esperimento è stato condotto presso le strutture di coltivazione verticale dell'azienda LocalGreen, site a Voghera (Figura 3-1). L'impianto è costituito da una struttura modulare a ripiani orizzontali. Ciascun modulo è composto da sei ripiani, ognuno con una superficie di 4.5 m², per un totale di 27.5 m² coltivabili per modulo (Figura 3-2). L'irrigazione è garantita da un sistema chiuso *ebb-and-flow*. Acqua osmotizzata e soluzioni nutritive vengono miscelate in una tanica principale utilizzata per le irrigazioni; l'acqua in eccesso viene recuperata in una tanica di drenaggio, filtrata e reimpressa nel serbatoio principale. Un fertirrigatore monitora costantemente il pH e la conduttività elettrica dell'acqua di irrigazione, dosando due soluzioni nutritive e una soluzione acida per mantenere i parametri nel range desiderato. L'illuminazione è fornita da lampade LED a spettro fisso. Le strutture di coltivazione sono ubicate in un ambiente chiuso isolato dall'esterno e climatizzato da una macchina UTA (Unità di Trattamento dell'Aria). I parametri di climatizzazione, irrigazione e illuminazione sono controllati da un software interno e monitorati costantemente. La frequenza di irrigazione, il fotoperiodo e l'intensità luminosa sono regolabili per ciascun ripiano.



Figura 3-1 Local Green vista dall'alto

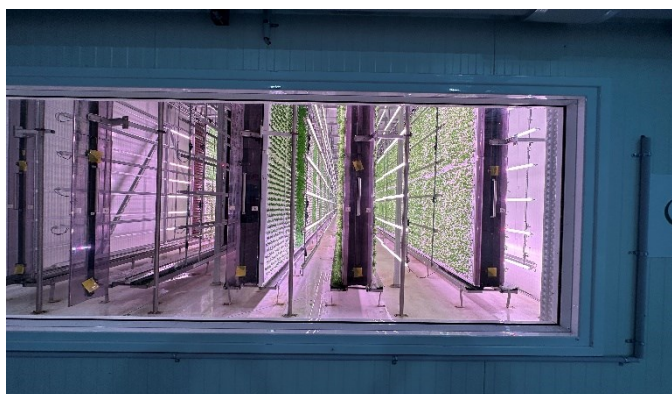


Figura 3-2 Dispositivo sperimentale

3.2 Descrizione dei trattamenti

I trattamenti confrontati consistono nella variazione di due parametri fondamentali: la densità del flusso fotonico e il fotoperiodo.

La densità del flusso di fotoni (PPFD, *Photosynthetic Photon Flux Density*) rappresenta la quantità di luce, o la sua intensità, che ha un impatto diretto sulla biomassa vegetale e sul suo tasso di crescita.

Il fotoperiodo rappresenta la durata del periodo di luce e influenza per esempio l'epoca di fioritura.

I trattamenti testati hanno incluso due fotoperiodi, di 18 ore e 24 ore, combinati con tre diverse intensità luminose (150, 180 e 220 $\mu\text{mol/s/m}^2$). I dettagli dei sei trattamenti sono riportati nella Tabella 2.

Tabella 2 Dettaglio dei trattamenti. Photosynthetic Photon Flux Density (PPFD)

Cultivar	Trattamento	Fotoperiodo (h)	PPFD ($\mu\text{mol/s/m}^2$)
LT11, LT9, KL11, KL1, SR1, MZ1	T1	18	150
	T2	18	180
	T3	18	220
	T4	24	150
	T5	24	180
	T6	24	220

3.3 Materiale vegetale utilizzato

Per l'esperimento, sono state confrontate quattro specie di baby leaf: lattuga, mizuna, acetosa e cavolo nero. Nel caso della lattuga e del cavolo nero, sono state prese in considerazione due varietà diverse.

Lattuga (LT9): Appartenente alla famiglia botanica delle *Asteraceae*, la varietà è nota come "LALIQUE RZ" (ditta sementiera Rijk Zwaan Italia, Bologna, IT) o lattuga di cristallo, grazie alle sue foglie croccanti di dimensioni uniformi. Il peso medio di una pianta è circa 200 g, con un ciclo di coltivazione variabile dai 35 ai 50 giorni.

Lattuga (LT11): Appartenente alla famiglia botanica delle *Asteraceae*, la varietà è conosciuta come "CARAVEL RZ" (ditta sementiera Rijk Zwaan Italia, Bologna, IT), una lattuga multifoglia verde scuro del tipo foglia di batavia.

Mizuna (MZ1): Appartenente alla famiglia botanica delle *Brassicaceae*, specie *Brassica rapa* var. *japonica* (ditta sementiera CN Seeds, Cambridgeshire, UK). Le foglie presentano un colore verde scuro, lucide e frastagliate con steli sottili e bianchi e un sapore delicato di senape. Lunghezza media di circa 30 cm.

Cavolo nero "rosso" (KL1): Appartenente alla famiglia botanica delle *Brassicaceae*, specie *Brassica oleracea* var. *acephala* (ditta sementiera CN Seeds, Cambridgeshire, UK). Il cavolo rosso è una pianta rustica e resistente alle basse temperature, con un colore scarlatto tendente al rossiccio, indicativo della presenza di antiossidanti come gli antociani.

Cavolo nero "verde" (KL11): Appartenente alla famiglia botanica delle *Brassicaceae*, specie *Brassica oleracea* var. *acephala* (ditta sementiera CN Seeds, Cambridgeshire, UK). Il cavolo verde è a foglia riccia, ricco di vitamine e sali minerali come fosforo e magnesio.

Acetosa (SR1): Appartenente alla famiglia botanica delle *Polygonaceae*, nota scientificamente come *Rumex acetosa* (ditta sementiera CN Seeds, Cambridgeshire, UK), una pianta dal sapore acido simile all'aceto. Presenta foglie basali picciolate e oblunghe, con apice arrotondato. Il frutto è un diclesio di colore bruno-nerastro tendente al lucido (CN SEEDS, s.d.), (RIJK ZWAAN, s.d.).

3.4 Substrato di crescita

Growfoam è il substrato di crescita utilizzato per l'esperimento, realizzato in biopolimeri completamente biodegradabili al 100%. Certificato dal TÜV (Technischer Überwachungsverein) per il compostaggio domestico e industriale, è pulito, sicuro e pronto per l'automazione (GROWFOAM, s.d.).

3.5 Semina

L'esperimento è stato avviato l'11 settembre 2023 con la semina delle specie e varietà poste a confronto. Per ogni specie/varietà sono stati utilizzati sei vassoi, uno per ciascun trattamento, per un totale di 36 vassoi. Ogni vassoio conteneva 200 fori. Durante le operazioni di semina, è stato seguito un protocollo specifico. Per le lattughe, sono stati utilizzati due semi per foro, mentre per tutte le altre varietà, sono stati posizionati 15 semi per foro. La semina è stata eseguita con l'ausilio di una seminatrice, garantendo la precisione e l'omogeneità della distribuzione dei semi in ogni foro.

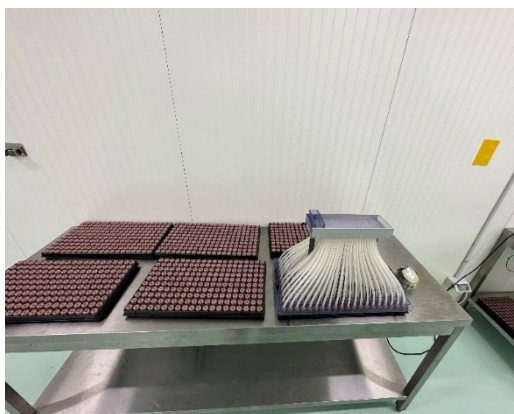


Figura 3-3 Fase di semina con apposita seminatrice



Figura 3-4 Vassoi destinati ai 6 diversi trattamenti dopo la semina

Dopo la semina, i vassoi sono stati posizionati sugli scaffali in posizioni identiche al fine di garantire condizioni uniformi tra i trattamenti. È importante sottolineare che sono state adottate precauzioni per evitare variazioni dovute, ad esempio, a irrigazione, ventilazione o luce, che avrebbero potuto influenzare i risultati dell'esperimento. In particolare, per le varietà di cavolo

nero 'rosso' e 'verde', è stata collocata una lastra di vetro su ciascun vassoio in ogni trattamento al fine di impedire alle radici di spingere la pianta verso l'alto. Queste lastre di vetro sono state rimosse mercoledì 13 settembre.

3.6 Gestione agronomica dell'esperimento

Per monitorare l'intensità luminosa (PPFD), è stato impiegato un parometro, uno strumento fondamentale per misurare la quantità di luce disponibile per le piante nei diversi trattamenti. Questo contribuisce a garantire che le condizioni luminose siano conformi alle specifiche previste per ciascun trattamento, consentendo una valutazione accurata dell'impatto della luce sulla crescita delle piante.



Figura 3-5 Parometro

È stata programmata una fertirrigazione ogni 3 ore, garantendo un apporto costante di soluzione nutritiva alle piante. Questa regolarità contribuisce a mantenere un ambiente stabile per le piante, consentendo lo studio degli effetti della luce su vari parametri di crescita. Inoltre, è stata attivata una ventilazione con una velocità di circa 0,16 m/s, fondamentale per garantire la circolazione dell'aria e la distribuzione uniforme di CO₂ e umidità tra le piante. Sono stati installati sensori che misurano l'umidità, la temperatura e la CO₂ nell'ambiente di crescita. Questi sensori trasmettono dati a un'applicazione ogni 5 minuti, permettendo un monitoraggio continuo delle condizioni ambientali e fornendo informazioni cruciali per l'analisi dei risultati sperimentali.

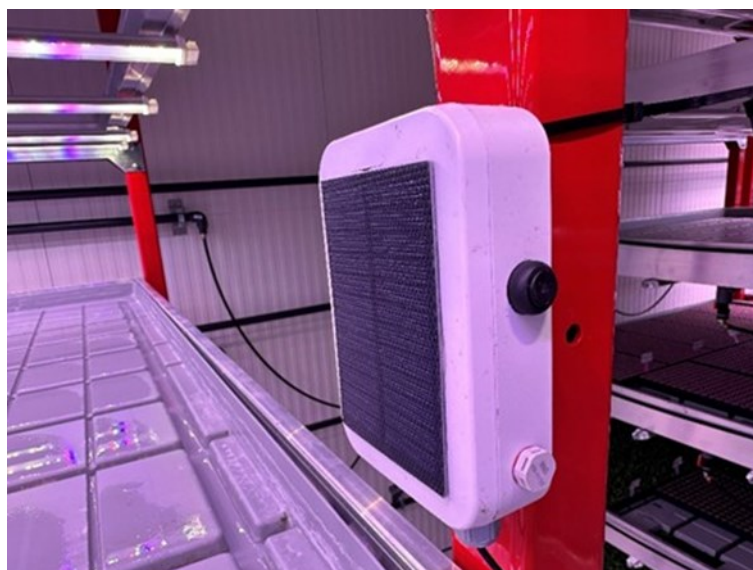


Figura 3-6 Sensori per la nursery

3.7 Rilievi

Il primo prelievo distruttivo è stato effettuato il 15 settembre su KL1, KL11 e MZ1, su tutti e sei i trattamenti. Nello specifico, è stata misurata la lunghezza, contati gli steli, e registrato il peso fresco. Tutti i dati sono stati accuratamente registrati in un file dedicato al fine di consentire un'analisi completa e scientifica dei risultati.



Figura 3-7 Piantine durante la germinazione



Figura 3-8 Misurazione dei parametri su alcune varietà

Il 18 settembre è stato eseguito il secondo campionamento, che ha riguardato tutte le essenze vegetali ad eccezione di SR1. Durante questo campionamento, le foglie prelevate da LT9 e LT11 sono state sottoposte a scansione per il calcolo della superficie fogliare. Lo stesso protocollo è stato seguito fino al 22 settembre. In questa data, sono state incluse anche le piante di SR1 nei campioni.



Figura 3-9 Griglia per rilevare le foglie di lattuga

Il 25 settembre è stato condotto l'ultimo campionamento di cavolo nero e mizuna (KL1, KL11 e MZ1). In corrispondenza di questo campionamento sono stati determinati peso, altezza, numero di steli. Il 29 settembre è stato effettuato il penultimo campionamento solo sulle lattughe LT11, LT9 e sull'acetosa SR1. Per le lattughe, dopo la determinazione del peso fresco, i campioni sono stati posti in stufa a 75 °C fino al raggiungimento del peso costante, per la determinazione del peso secco.

3.8 Analisi statistica

Le variabili di risposta misurate (altezza, numero di steli, peso fresco e secco, e superficie fogliare) sono state analizzate tramite ANOVA a due vie, considerando come fattori il tipo vegetale e il trattamento luminoso. Le variabili di risposta sono state testate rispetto ai seguenti assunti per test parametrici: i) assenza di outlier (controllo tramite Box-plot); ii) residui del modello distribuiti normalmente (controllo tramite Box-plot); iii) omoschedasticità (controllo tramite grafico dei residui). I dati sono stati trasformati secondo la procedura di Box-Cox per soddisfare tali presupposti. Le medie sono state separate mediante il test HSD di Tukey con $p \leq 0.05$. Per l'elaborazione statistica è stato utilizzato il software R (R Core Team, 2023) e il pacchetto *car* (Fox & Weisberg, 2019).

Capitolo 4 RISULTATI

4.1 Lattuga

Analizzando l'altezza (H) delle piante nell'ambito delle diverse date di campionamento (Tab. 3), è stata osservata un'influenza significativa sia dei trattamenti luminosi che delle varietà. Nello specifico, dal primo al quinto campionamento, quando le differenze tra le varietà sono risultate statisticamente significative, la varietà LT9 ha mostrato sistematicamente valori di altezza superiori rispetto alla varietà LT11. Tuttavia, all'ultima data di campionamento, si è assistito a un'inversione di tendenza, con la varietà LT11 che ha superato LT9 in altezza.

Quando l'altezza è risultata statisticamente influenzata dai trattamenti luminosi (dalla quarta alla settima data di campionamento), i tre trattamenti T4, T5, e T6 sono quelli che hanno restituito i valori di altezza mediamente più alti. In corrispondenza della seconda data di campionamento, è stata osservata un'interazione significativa $T \times V$ (Tab. 3; Fig. 4-1). In particolare, nella figura che dettaglia questa interazione (Fig. 4-1), si osserva che, eccetto per il trattamento T1, entro tutti gli altri trattamenti luminosi la varietà LT11 ha mostrato altezze inferiori rispetto a LT9.

A differenza dell'altezza, il peso fresco per pianta è risultato maggiormente influenzato dai trattamenti luminosi (Tab. 3). Questo effetto è evidente nella seconda, terza, quinta, sesta e settima data di campionamento, dove i trattamenti T5 e T6 hanno registrato i pesi freschi più alti. Il fattore varietà ha influenzato il peso fresco solo alla quinta data di campionamento, con LT9 che ha mostrato un peso fresco superiore a LT11. Alla quarta data di campionamento l'analisi statistica ha restituito un'interazione significativa tra trattamenti luminosi e varietà (Tab. 3 e Fig. 4-2).

Tabella 3 Effetto dei trattamenti e del tipo vegetale sull'altezza e sul peso fresco delle piante campionate a frequenza regolare durante il ciclo di coltivazione. Gdl (gradi di libertà), DdC (data di campionamento), H (altezza/pianta), Pfr (peso fresco/pianta).

	Gdl	1 ^a DdC		2 ^a DdC		3 ^a DdC		4 ^a DdC		5 ^a DdC		6 ^a DdC		7 ^a DdC	
		H (cm)	Pfr (g)	H (cm)	Pfr (g)	H (cm)	Pfr (g)	H (cm)	Pfr (g)	H (cm)	Pfr (g)	H (cm)	Pfr (g)	H (cm)	Pfr (g)
<i>Trattamenti (T)</i>															
T1		1.30	0.08	2.02	0.11 b	2.89	0.26 b	4.05 b	0.64	5.07 b	1.07 b	7.06 bc	1.53 b	9.38 b	2.76 c
T2		1.24	0.10	1.89	0.14 b	2.94	0.35 ab	3.81 b	0.77	5.44 b	1.24 b	6.73 c	1.90 b	10.03 ab	3.56 bc
T3		1.22	0.11	1.75	0.12 b	2.69	0.30 ab	4.19 b	0.81	5.26 b	1.44 ab	7.11 bc	2.32 ab	9.12 b	3.85 b
T4		1.32	0.09	2.27	0.18 a	3.19	0.32 ab	5.21 a	0.94	6.67 a	1.24 b	8.03 ab	2.35 ab	10.62 a	4.27 a
T5		1.15	0.12	2.21	0.20 a	3.12	0.40 a	5.48 a	1.21	6.94 a	2.00 a	8.75 a	2.88 a	10.82 a	5.04 a
T6		1.22	0.11	2.27	0.22 a	2.92	0.43 a	4.97 a	1.33	6.54 a	2.14 a	8.58 a	3.61 a	10.12 ab	4.94 a
<i>Varietà (V)</i>															
LT11		1.16 b	0.10	1.95	0.17	2.85 b	0.33	4.22 b	0.84	5.45 b	1.39 b	7.48	2.514	10.40 a	4.25
LT9		1.32 a	0.11	2.19	0.16	3.06 a	0.36	5.02 a	1.06	6.52 a	1.65 a	7.94	2.349	9.63 b	3.89
<i>Fonte di variazione</i>															
Trattamenti (T)	5	n.s.	n.s	***	***	n.s.	***	***	***	***	***	***	***	**	***
Varietà (V)	1	**	n.s	***	n.s	*	n.s.	***	***	***	*	n.s.	n.s.	**	n.s.
T × V	5	n.s	n.s	*	n.s	n.s.	n.s.	n.s.	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

n.s. differenza non significativa; * differenza significativa per $p < 0.05$; ** differenza significativa per $p < 0.01$; *** differenza significativa per $p < 0.001$. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ($p < 0.05$) secondo il test HSD di Tukey.

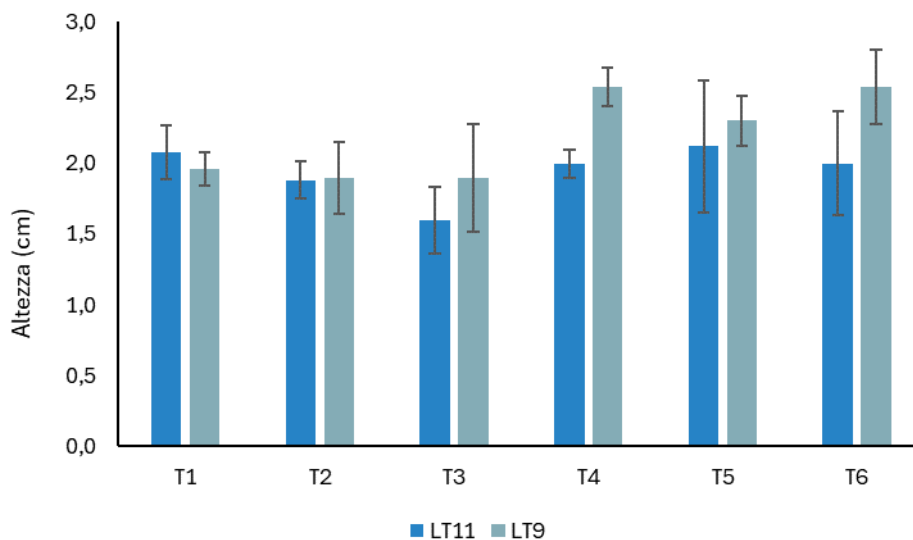


Figura 4-1 Effetto dell'interazione significativa trattamento × varietà sull'altezza delle piante di lattuga monitorate durante la seconda data di campionamento. Le barre rappresentano la deviazione standard (n=5).

Dall'analisi della (fig. 4-2), emerge che, fatta eccezione per i trattamenti T2 e T4, negli altri trattamenti LT11 ha mostrato un peso fresco inferiore rispetto a LT9. In sintesi, mentre l'altezza delle piante ha mostrato variazioni significative in base alla varietà e all'interazione tra trattamenti e varietà, il peso fresco è stato principalmente influenzato dai trattamenti luminosi, con i trattamenti T5 e T6 che hanno costantemente prodotto i risultati migliori.

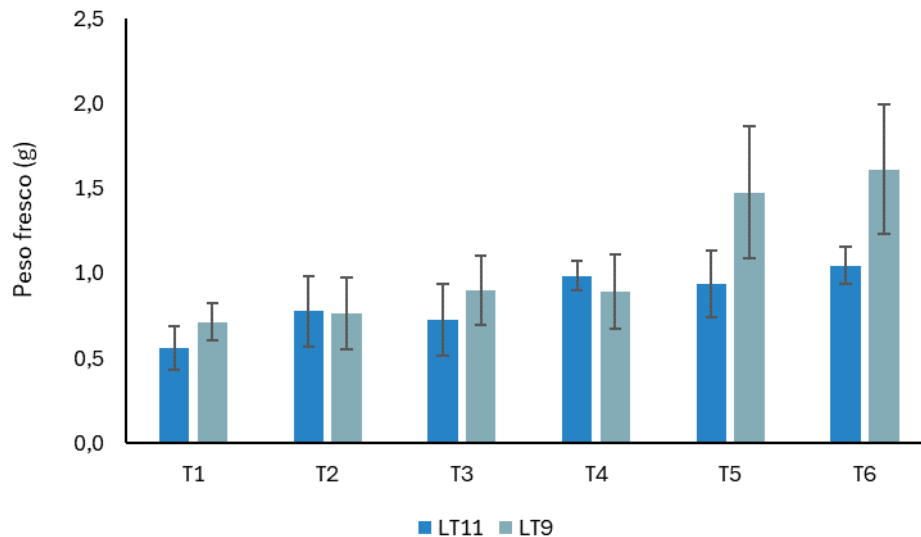


Figura 4-2 Effetto dell'interazione significativa trattamento \times varietà sul peso fresco delle singole piante di lattuga prelevate durante la quarta data di campionamento. Le barre rappresentano la deviazione standard (n=5).

Analizzando i dati presenti nella (Tab. 4), sono state osservate differenze significative sia a livello di trattamento luminoso sia di varietà. Nel caso delle foglie (Fg), la varietà LT9 ha mostrato un valore significativamente superiore rispetto alla varietà LT11.

Per quanto riguarda la superficie fogliare (LA), essa è risultata statisticamente influenzata dai trattamenti luminosi, con i primi tre trattamenti T1, T2 e T3 che hanno restituito i valori di superficie fogliare più bassi. Anche il fattore varietà ha influenzato la superficie fogliare, con la varietà LT11 che ha mostrato un valore significativamente inferiore rispetto alla varietà LT9.

Infine, il peso secco (Psc) è stato influenzato statisticamente dai trattamenti luminosi, con T4, T5 e T6 che hanno restituito i valori di peso secco mediamente più alti.

Tabella 4 Effetto dei trattamenti e della varietà su numero di foglie, superficie fogliare, peso secco e percentuale di sostanza secca. Gdl (gradi di libertà), Fg (numero/pianta), LA (area fogliare/pianta), Psc (peso secco/pianta), % ss (percentuale di sostanza secca/pianta).

	Gdl	Fg (n.)	LA (cm ²)	Psc (g)	% ss (%)
<i>Trattamenti</i>					
T1		8	2.99 b	0.04 b	2.55
T2		9	3.51 b	0.05 b	2.83
T3		9	4.17 b	0.06 ab	2.68
T4		9	4.36 ab	0.07 a	2.80
T5		10	4.87 ab	0.07 a	2.59
T6		10	5.45 a	0.09 a	2.73
<i>Varietà</i>					
LT11		8 b	3.51 b	0.07	2.70
LT9		10 a	4.94 a	0.06	2.70
<i>Fonte di variazione</i>					
Trattamenti (T)	5	n.s.	***	***	n.s.
Varietà (V)	1	**	***	n.s.	n.s.
T × V	5	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

n.s. differenza non significativa; ** differenza significativa per $p < 0.01$; *** differenza significativa per $p < 0.001$.

Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ($p < 0.05$) secondo il test HSD di Tukey.

4.2 Cavolo nero (*kale*)

Analizzando l'altezza (H) delle piante durante le diverse date di campionamento (Tab. 5), è stata osservata un'influenza significativa sia dei trattamenti luminosi che delle varietà.

Nel primo, secondo e quarto campionamento, quando le differenze tra le varietà sono risultate statisticamente significative, la varietà KL1 ha mostrato sistematicamente valori di altezza superiori rispetto alla varietà KL11. Quando l'altezza è risultata statisticamente influenzata dai trattamenti luminosi (seconda data di campionamento), i trattamenti T1, T4 e T5 hanno restituito i valori di altezza mediamente più alti.

In corrispondenza della terza data di campionamento, è stata osservata un'interazione significativa $T \times V$ (Tab. 5; Fig. 4-3). Si osserva che per i trattamenti T1, T3 e T6, la varietà KL1 ha mostrato altezze inferiori a KL11, a differenza dei trattamenti T2, T4 e T5, dove invece la varietà che ha mostrato altezze inferiori è la KL11.

Anche per il pesco fresco (Pfr), è stata osservata un'influenza significativa sia dei trattamenti luminosi che delle varietà.

Dal primo al quinto campionamento, quando le differenze tra le varietà sono risultate statisticamente significative, la varietà KL1 ha mostrato sistematicamente valori di peso fresco superiori rispetto alla varietà KL11. Quando il peso fresco è risultato statisticamente influenzato dai trattamenti luminosi (seconda e quinta data di campionamento), i tre trattamenti T4, T5 e T6 sono quelli che hanno restituito i valori di peso fresco mediamente più alti.

In corrispondenza della terza data di campionamento, è stata osservata un'interazione significativa $T \times V$ (Tab. 5; Fig. 4-4). Si osserva che, eccetto per il trattamento T1, entro tutti gli altri trattamenti luminosi la varietà KL1 ha restituito i valori di peso fresco mediamente più alti.

Per quanto riguarda il numero di steli (St), è stata osservata un'influenza significativa delle varietà. Nel quarto e quinto campionamento, quando le differenze tra le varietà sono risultate statisticamente significative, la varietà KL11 ha mostrato sistematicamente un numero maggiore di steli rispetto alla varietà KL1. In corrispondenza della seconda data di campionamento, è stata osservata un'interazione significativa $T \times V$ (Tab. 5; Fig. 4-5). Si osserva che, fatta eccezione per i trattamenti T2 e T5, negli altri trattamenti la varietà KL11 ha restituito i valori di peso fresco mediamente più alti.

Tabella 5 Effetto dei trattamenti e della varietà su altezza, peso fresco, e numero di steli in cavolo nero. Gdl (gradi di libertà), H (altezza/pianta), Pfr (peso fresco/pianta), St (numero di steli/pianta).

	1 ^a DdC			2 ^a DdC			3 ^a DdC			4 ^a DdC			5 ^a DdC			
	Gdl	H	Pfr	St	H	Pfr	St	H	Pfr	St	H	Pfr	St	H	Pfr	St
	(cm)	(g)	(n.)	(cm)	(g)	(n.)	(cm)	(g)	(n.)	(cm)	(g)	(n.)	(cm)	(g)	(n.)	
<i>Trattamenti (T)</i>																
T1	1.59	0.17	10	4.32 a	0.87 b	12	5.63	1.26	12	7.51	1.61	11	10.86	2.36 b	11	
T2	1.66	0.17	10	3.86 b	0.88 b	12	5.92	1.38	13	7.96	1.78	12	11.46	2.59 b	12	
T3	1.67	0.19	11	3.67 b	1.03 ab	14	4.98	1.25	11	7.23	1.88	11	10.48	2.67 b	11	
T4	1.58	0.17	10	4.27 a	1.09 a	14	5.70	1.49	12	7.90	2.00	12	10.79	3.14 a	13	
T5	1.55	0.22	13	4.54 a	1.21 a	14	6.08	1.71	15	8.48	2.13	12	11.99	3.56 a	12	
T6	1.53	0.18	11	3.80 b	1.15 a	14	5.43	1.62	12	7.65	2.25	12	10.98	3.52 a	12	
<i>Varietà (V)</i>																
KL1	1.71 a	0.19 a	10	4.27 a	1.08 a	13	5.75	1.58	12	8.22 a	2.09 a	11 b	11.38	3.18 a	11 b	
KL11	1.48 b	0.17 b	11	3.90 b	0.99 b	14	5.50	1.34	13	7.36 b	1.79 b	13 a	10.81	2.77 b	13 a	
<i>Fonte di variazione</i>																
Trattamenti (T)	5	n.s.	n.s.	n.s.	***	***	n.s.	**	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	***	n.s.
Varietà (V)	1	***	*	n.s.	***	*	*	n.s.	***	n.s.	**	*	**	n.s.	*	**
T × V	5	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	*	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

n.s. differenza non significativa; * differenza significativa per $p < 0.05$; ** differenza significativa per $p < 0.01$; *** differenza significativa per $p < 0.001$. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ($p < 0.05$) secondo il test HSD di Tukey.

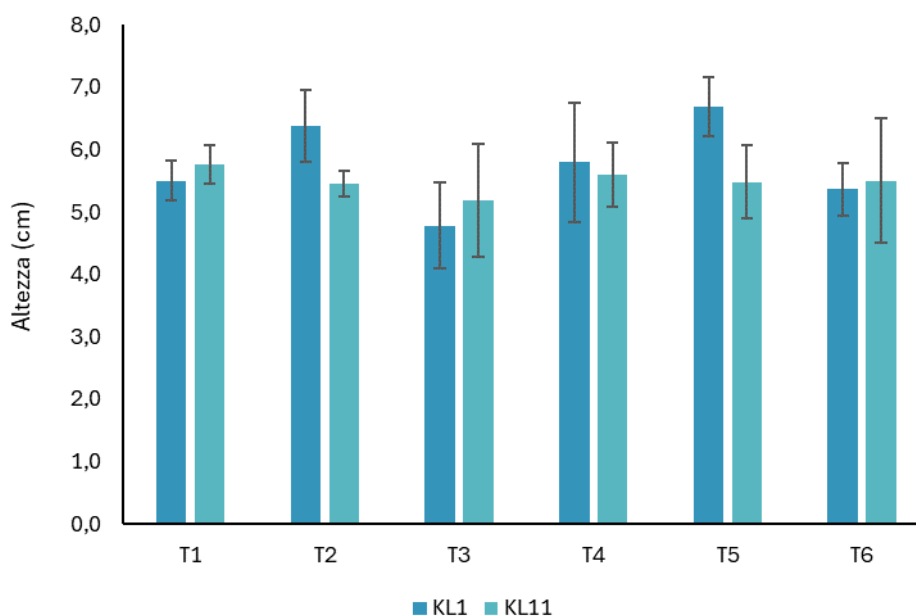


Figura 4-3 Effetto dell'interazione significativa trattamento × varietà sull'altezza delle piante di cavolo nero monitorate durante la terza data di campionamento. Le barre rappresentano la deviazione standard (n=5).

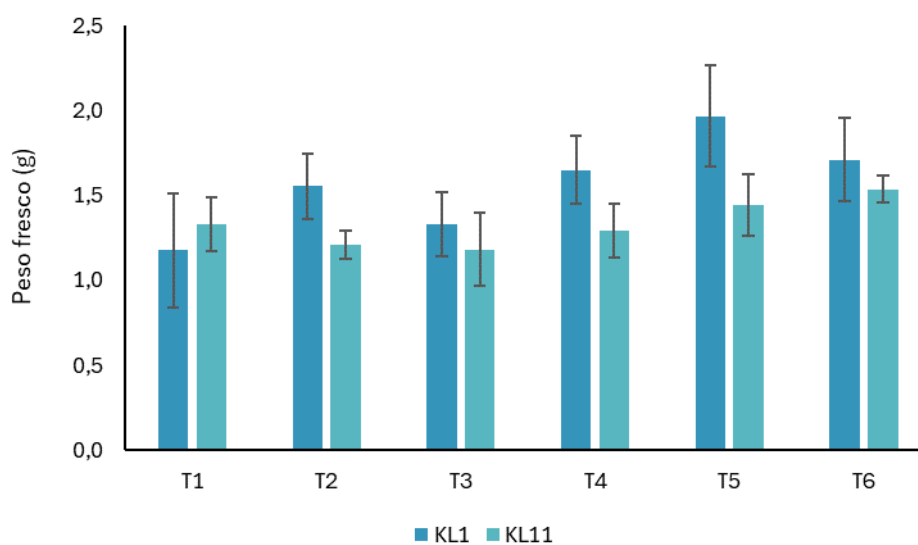


Figura 4-4 Effetto dell'interazione significativa trattamento \times varietà sul peso fresco delle singole piante di cavolo nero prelevate durante la terza data di campionamento. Le barre rappresentano la deviazione standard ($n=5$).

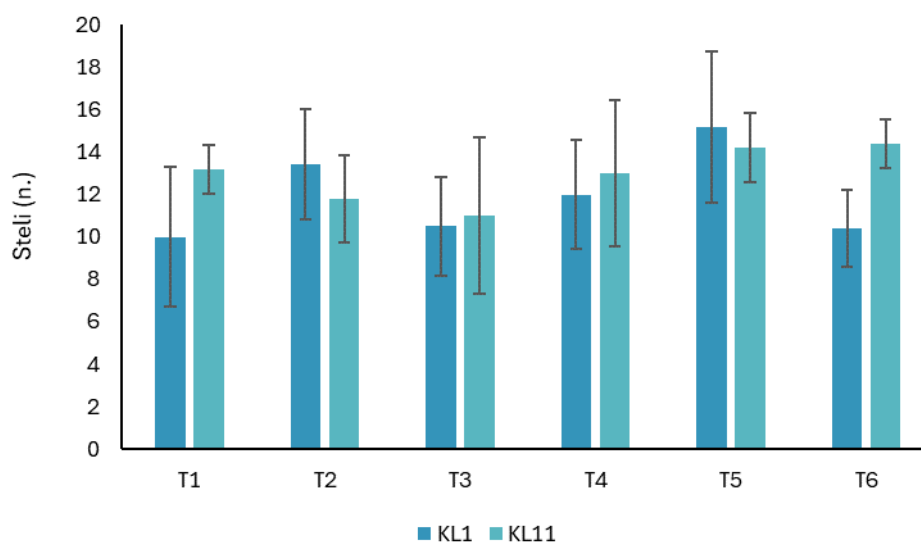


Figura 4-5 Effetto dell'interazione significativa trattamento \times varietà sul numero di steli per pianta registrato durante la seconda data di campionamento. Le barre rappresentano la deviazione standard ($n=5$).

4.3 Mizuna

Analizzando l'altezza (H) delle piante durante le diverse date di campionamento (Tab. 6), è stata osservata un'influenza significativa dei trattamenti luminosi solamente in corrispondenza della quinta data di campionamento. Il trattamento T6 ha fatto registrare i valori più elevati di altezza.

Anche il peso fresco (Pfr) è stato influenzato significativamente dai trattamenti luminosi in corrispondenza della prima e dell'ultima data di campionamento. Nella prima data di campionamento il peso fresco significativamente più alto è stato osservato in T5, nell'ultima nel trattamento T6.

Il numero di steli non è stato statisticamente influenzato da alcun trattamento luminoso.

Tabella 6 Effetto dei trattamenti su altezza, peso fresco, e numero di steli in mizuna. Gdl (gradi di libertà), H (altezza/pianta), Pfr (peso fresco/pianta), St (numero di steli/pianta).

	1 ^a DdC			2 ^a DdC			3 ^a DdC			4 ^a DdC			5 ^a DdC			
	Gdl	H (cm)	Pfr (g)	St (n.)	H (cm)	Pfr (g)	St (n.)	H (cm)	Pfr (g)	St (n.)	H (cm)	Pfr (g)	St (n.)	H (cm)	Pfr (g)	St (n.)
<i>Trattamenti (T)</i>																
T1		1.66	0.27 b	13	4.34	0.94	13	5.46	1.37	12	9.08	1.87	14	11.60 b	2.49 b	11
T2		1.62	0.28 b	14	4.30	1.10	15	6.14		16	9.28	2.14	13	12.52 ab	2.71 b	14
T3		1.74	0.22 b	10	4.14	0.90	12	5.66	1.84	14	8.28	2.35	14	12.32 b	3.59 ab	13
T4		1.66	0.25 b	13	4.30	1.10	13	6.28	1.81	15	10.32	2.24	13	13.20 ab	3.15 b	11
T5		1.64	0.36 a	13	4.50	1.22	15	6.62	2.03	14	10.12	2.43	11	14.10 ab	3.42 ab	10
T6		1.40	0.23 b	9	4.18	1.20	14	6.44	2.05	13	10.20	2.48	12	15.16 a	4.81 a	14

Fonte di variazione

Trattamenti (T)	5	n.s	*	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	**	n.s.
-----------------	---	-----	---	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	---	----	------

n.s. differenza non significativa; * differenza significativa per p < 0.05; ** differenza significativa per p < 0.01; *** differenza significativa per p < 0.001. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie (p < 0.05) secondo il test HSD di Tukey.

4.4 Acetosa

Anche l'altezza delle piante di acetosa è risultata significativamente influenzata dai trattamenti luminosi in corrispondenza delle ultime tre date di campionamento (Tab. 7). Nello specifico, T5 è risultato tra i trattamenti che hanno fatto registrare le altezze maggiori per tutte e tre le date.

I trattamenti luminosi, durante le ultime date di campionamento, hanno avuto un effetto anche sul peso fresco, che è risultato più basso nel trattamento T1.

Tabella 7 Effetto dei trattamenti su altezza, peso fresco, e numero di steli in acetosa. Gdl (gradi di libertà), H (altezza/pianta), Pfr (peso fresco/pianta), St (numero di steli/pianta).

Trattamenti (T)	1 ^a DdC			2 ^a DdC			3 ^a DdC			4 ^a DdC			5 ^a DdC		
	Gdl	H (cm)	Pfr (g)	St (n.)	H (cm)	Pfr (g)	St (n.)	H (cm)	Pfr (g)	St (n.)	H (cm)	Pfr (g)	St (n.)	H (cm)	Pfr (g)
T1		1.08	0.10	11	1.58	0.21	11	1.76 ab	0.28	9	2.32 b	0.48 b	10	2.58 b	0.74 b
T2		1.02	0.11	11	1.58	0.25	9	2.04 a	0.50	12	2.60 a	0.67 a	10	4.18 ab	1.32 ab
T3		0.78	0.13	10	1.48	0.29	10	1.56 b	0.31	8	2.74 a	0.83 a	14	4.28 a	1.44 a
T4		1.12	0.12	10	1.62	0.25	10	1.82 ab	0.24	7	2.52 ab	0.57 ab	11	3.72 ab	1.24 a
T5		1.02	0.14	9	1.58	0.23	7	2.24 a	0.39	9	2.70 a	0.58 ab	7	4.70 a	1.40 a
T6		1.12	0.13	9	1.44	0.27	9	2.04 a	0.32	7	2.50 ab	0.85 a	13	4.36 a	1.42 a

Fonte di variazione

Trattamenti (T)	5	n.s	n.s	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	*	n.s.	n.s.	*	*	n.s.	***	*
-----------------	---	-----	-----	------	------	------	------	---	------	------	---	---	------	-----	---

n.s. differenza non significativa; * differenza significativa per $p < 0.05$; ** differenza significativa per $p < 0.01$; *** differenza significativa per $p < 0.001$. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie ($p < 0.05$) secondo il test HSD di Tukey.

Capitolo 5 DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Con la crescente popolazione urbana e l'aumento di domanda di materie prime, l'agricoltura verticale si configura come una delle strategie da mettere in atto per contrastare la fame e garantire la sicurezza alimentare per il futuro. Tali innovazioni, inclusa l'intelligenza artificiale (AI) e la robotica, trasformano l'agricoltura verticale automatizzata in una tecnologia agricola all'avanguardia. L'applicazione della più recente tecnologia AI nell'agricoltura verticale facilita il controllo preciso dell'ambiente, il rilevamento precoce dei parassiti, l'automazione dei processi agricoli, il processo decisionale basato sui dati e l'agricoltura di precisione. (Swathi Erekaath, 2024). In sostanza, le *plant factories* come quella di Voghera, che utilizzano le moderne innovazioni della scienza e della tecnologia, garantiscono una maggiore produttività, una migliore qualità, costi ridotti, gestione delle risorse e sostenibilità.

Il progetto di tesi è stato realizzato per valutare la risposta di quattro specie di baby leaf a variazioni di intensità luminosa e fotoperiodo, impiegando 6 trattamenti. Durante i vari campionamenti effettuati, sono state esaminate le caratteristiche morfologiche e biometriche delle piante, come il peso fresco e il peso secco, l'altezza, il numero di steli per pianta, e l'estensione delle foglie, per osservare la loro risposta nel tempo alle differenti variazioni a cui sono state sottoposte durante il periodo della prova. Questo risulta molto utile quando si parla di riqualificazione dei capannoni urbani e industriali e del consumo di suolo, due temi attuali molto importanti, che grazie anche a questa tecnica innovativa si cerca di affrontare mettendo in atto strategie innovative ma anche sostenibili.

Questi risultati sono in linea con altri studi che evidenziano come l'uso del vertical farm influenza in modo positivo la crescita di baby leaf. (Flores, 2024) hanno effettuato uno studio per valutare l'effetto di diverse intensità di luce sulle caratteristiche agronomiche in quattro specie di *Brassicaceae*. I risultati hanno rivelato che l'intensità della luce ha generato variazioni nelle caratteristiche agronomiche, nel colore, nel contenuto di clorofilla e nell'attività antiossidante dei microgreen di brassicacee, con cambiamenti basati da ascrivere alle specie e alle cultivar. Anche (Das, 2024) nel loro esperimento condotto in ambiente controllato, hanno osservato che l'intensità luminosa di propagazione potrebbe essere

utilizzata come strategia efficace e sostenibile per migliorare la resa del raccolto e la qualità nutrizionale della lattuga coltivata nel CEA.

In una prova condotta da (Marie-Helene Talbot, 2024) in ambiente controllato, si mirava a fornire un'analisi completa, utilizzando un modello dinamico, dell'influenza delle condizioni di crescita tipicamente utilizzate per coltivare la lattuga sull'energia e sulla resa delle colture. Sono state studiate diverse combinazioni di temperatura dell'aria (20, 24 e 28 °C), deficit di pressione del vapore (0,54 e 0,85 kPa), intensità di illuminazione (da 200 a 700 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) e fotoperiodo (da 12 a 24 ore). I risultati hanno indicato che il miglior compromesso tra carico energetico e resa si ottiene a una temperatura dell'aria di 24 °C. Inoltre, la riduzione dell'intensità luminosa e l'estensione del fotoperiodo hanno avuto un impatto positivo sia sul carico energetico che sulla resa. Alcune condizioni di crescita, come la riduzione del deficit di pressione del vapore, possono ridurre la necessità di deumidificazione. Per intensità di illuminazione superiori a 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, sebbene il carico energetico continui ad aumentare linearmente con l'intensità di illuminazione, il tasso di crescita è limitato, con conseguente riduzione dell'efficienza produttiva. Questi risultati offrono preziose informazioni sull'influenza delle condizioni di crescita sul carico energetico e sulla resa.

Un altro studio (Meng, 2024) a differenza del nostro, dove abbiamo utilizzato nel caso di tre trattamenti intervalli di luce di 18 h invece che 24 h, ha mostrato come la luce continua riduca il PPFD necessario, diminuendo così l'investimento di capitale iniziale sui LED ad alto rendimento e le spese operative per l'illuminazione notturna, quando in alcune aree le tariffe elettriche sono inferiori rispetto a quelle diurne. I trattamenti DLI notturni allo 0% hanno erogato luce diurna con un fotoperiodo di 12 ore, mentre i trattamenti DLI notturni al 25% e al 50% hanno erogato rispettivamente luce alternata e luce continua, entrambi con un fotoperiodo di 24 ore. La lattuga e il cavolo riccio hanno generalmente avuto risposte di crescita più pronunciate allo schema di luce con il DLI più elevato, mentre la crescita della rucola non è stata influenzata dallo schema di luce. Rispetto alla luce diurna, la luce continua ha aumentato la biomassa dei germogli di lattuga in entrambi i DLI, ma ha aumentato la biomassa dei germogli di cavolo solo con il DLI più alto. Rispetto alla luce continua, la luce alternata ha ridotto la massa dei germogli di lattuga solo con il DLI più elevato, ma non ha influenzato la maggior parte dei parametri di cavolo riccio o rucola. Raddoppiando il DLI è stata aumentata la biomassa secca di germogli di tutte le colture del 44-150% e la biomassa fresca di germogli di rucola del 38-73% attraverso i modelli di luce. La biomassa fresca di germogli di lattuga e cavolo riccio è aumentata con un DLI crescente sotto luce continua o

diurna. Concludiamo che il modello di luce e il DLI hanno avuto effetti interattivi e specifici della coltura sulla crescita dei baby green. Con lo stesso DLI, la luce continua può aumentare la crescita di lattuga e cavoli, ma non di rucola e verdure baby rispetto alla luce diurna, soprattutto con un DLI elevato. Quindi dopo questo studio in comparazione anche al nostro, si può osservare che ogni baby leaf viene influenzata in modo differente dal quantitativo di luce che gli viene erogata. Questo è molto importante a livello di efficienza dell'impianto, perché comparando le diverse specie in coltivazione nei vari impianti di vertical farm, è possibile stimare le varie esigenze in termini di luce che ogni specie richiede, per ridurre i consumi energetici. In conclusione, si può affermare che lo studio fornisce risultati promettenti per quanto riguarda la coltivazione di ortaggi di piccola taglia di IV gamma negli impianti di vertical farm, sottoponendo le varie baby leaf a diversi trattamenti luminosi con differenti fotoperiodi e intensità luminose. Nuovi studi dovrebbero essere effettuati per espandere questa tipologia di coltivazione su larga scala, per permettere una coltivazione controllata e monitorata durante tutto il ciclo di vita della pianta, e per garantire al consumatore un prodotto con un'elevata shelf-life, riduzione di pesticidi e a basso impatto in termini di "sostenibilità ambientale". In questo modo sarà possibile sfruttare le potenzialità di questo sistema di produzione, per avere un prodotto anche in breve tempo con cicli di produzione anche di 21 giorni a differenza di colture in pieno campo che richiedono un maggior tempo, maggior quantitativo di trattamenti, irrigazione e concimazioni a differenza di queste dove tutto viene somministrato riducendo al minimo gli sprechi. D'altra parte, però alcuni paesi sotto-sviluppati e in via di sviluppo con approcci di coltivazione per lo più tradizionali, dove le coltivazioni impattano in modo rilevante e incidono sul consumo di suolo, bisogna trovare soluzioni per far sì di ridurre al minimo queste problematiche, per esempio fornendo sussidi adeguati per realizzare impianti verticali innovativi. In questo modo verrà preservato l'ambiente di coltivazione e verranno soddisfatte le esigenze alimentari, con particolare attenzione alla salute umana.

Capitolo 6 BIBLIOGRAFIA

- AGRIFOOD.TECH, 2022. *AGRIFOOD.TECH*. [Online] Available at: <https://www.agrifood.tech/sostenibilita/agricoltura-e-sviluppo-sostenibile-il-vertical-farming-riduce-il-consumo-di-acqua-ed-energia/> [Consultato il giorno 2024].
- Aiello, F., 2012. *Scienza in rete, "il recupero delle aree industriali dismesse"*. [Online] Available at: <https://www.scienzainrete.it/contenuto/articolo/recupero-delle-aree-industriali-dismesse> [Consultato il giorno 2024].
- Anon., s.d. [Online] Available at: <https://growfoam.ag/> [Consultato il giorno 2024].
- Anon., s.d. [Online] Available at: <https://cn-seeds.co.uk/> [Consultato il giorno 2024].
- Avelino Ntifiez Delgado, E. L. P. & F. D.-F. V., 1995. VEGETATED FILTER STRIPS FOR WASTEWATER. *Bioresource Technology*, Volume 51, pp. 13-22.
- Bianchi, G., Verdi, G. & Rossi, M., 2018. Titolo dell'articolo. *Journal Name*, 48(3), pp. 11-15.
- CN SEEDS, s.d. *CN SEEDS*. [Online] Available at: <https://cn-seeds.co.uk/> [Consultato il giorno 2024].
- Das, P. D. M. D. G. S. A. S. W. K., 2024. *Scopus, "L'intensità della luce di propagazione influenza la resa, la morfologia e la fitochimica della lattuga a foglia viola (Lactuca sativa)"*. [Online] Available at: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58121193200> [Consultato il giorno 2024].

- Flores, M. H.-A. C. G. M. E. V., 2024. *Scopus Preview, "Effetto di diverse intensità di luce sulle caratteristiche agronomiche e sui composti antiossidanti dei microgreens di Brassicaceae in un sistema di fattoria verticale"*. [Online] Available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85188097672&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=a10d7f9b7540cf11360a4c9cedf2999d&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY+%28Vertical+farm+photoperiods%29&sl=61&sessionSearchId=a10d7f9b7540cf11360a4c9cedf2999d&r> [Consultato il giorno 2024].
- Fox, J. & Weisberg, S., 2019. *An {R} Companion to Applied Regression*. Third Edition a cura di Thousand Oaks CA: Sage. GROWFOAM, s.d. *GROWFOAM*. [Online] Available at: <https://growfoam.ag/> [Consultato il giorno 2024].
- Growledlamp, s.d. <https://growledlamp.it/>. [Online] Available at: <https://growledlamp.it/> [Consultato il giorno 2024].
- Lucio Brotto, D. P., 2010. Progetti REDD+: nuove frontiere e vecchie barriere nel mercato forestale del carboni. *agrireregionieuropa*.
- Maccaferri, A., 2010. *Il vertical farming abbatte il consumo di suolo e di risorse naturali*. [Online] Available at: <https://www.ilsole24ore.com/art/il-vertical-farming-abbatte-consumo-suolo-e-risorse-naturali-AESNTBB#U4015088524WgE> [Consultato il giorno 2024].
- Maccaferri, A., 2021. *Il sole 24 ore*. [Online] [Consultato il giorno Novembre 2021].
- Marie-Helene Talbot, D. M., 2024. *Science Direct, "Analizzare l'influenza delle condizioni di crescita sia sul carico energetico che sulla resa delle colture di uno spazio agricolo ad ambiente controllato"*. [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192400789X> [Consultato il giorno 2024].

- Meng, Q. S., 2024. *Scopus Preview*, " *La luce continua può favorire la crescita dei baby green rispetto alla luce diurna con un elevato livello di luce giornaliera*". [Online] Available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85185823085&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=a10d7f9b7540cf11360a4c9cedf2999d&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY+%28Vertical+farm+photoperiods%29&sl=61&sessionSearchId=a10d7f9b7540cf11360a4c9cedf2999d&r> [Consultato il giorno 2024].
- Oggi, Redazione Padova, 2019. *Padova Oggi*. [Online] Available at: <https://www.padovaoggi.it/green/progetto-rigenera-vertical-farm-padova-17-dicembre-2019.html#:~:text=Progetto%20Ri%2DGenera,-Da%20questa%20partnership&text=%C2%ABL'obiettivo%20%2D%20spiegano%20i,e%20ad%20alto%20valore%20nutraceutico>. [Consultato il giorno 2024].
- R Core Team, 2., 2023. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, URL <https://www.R-project.org/>..
- RIJK ZWAAN, s.d. *RIJK ZWAAN*. [Online] Available at: <https://www.rijkwaaan.com/en/home> [Consultato il giorno 2024].
- Rossi, M., Bianchi, G. & Verdi, G., 2018. Titolo dell'articolo. *Journal Name*, pp. 10-15.
- Sassi, M., 2010. *Cambiamento climatico e agricoltura nei Paesi in via di sviluppo: nuove sfide per la povertà e l'insicurezza alimentare - Agriregionieuropa*. [Online] Available at: <https://agriregionieuropa.univpm.it/en/content/article/31/22/cambiamento-climatico-e-agricoltura-nei-paesi-di-sviluppo-nuove-sfide-la> [Consultato il giorno 2024].
- Scariot V, D. P. S. F. A. R. D., 2022. Impresa florovivaistica e gestione dei costi. In: *Florovivaismo Principi e Tecniche*. Milano: Edagricole, pp. 23-43.
- SNPA, 2023. *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici*, s.l.: s.n.
- Swathi Erekaath, H. S. M. S. C. D., 2024. *Science Direct*. [Online] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670724001859> [Consultato il giorno 2024].
- Verdi, G., 2017. Titolo del capitolo. In: R. Cristiano, a cura di *Titolo del libro*. Ancona: CasaEditrice, pp. 10-20.

RINGRAZIAMENTI

La scelta di intraprendere il percorso di laurea triennale in Sistemi Agricoli Innovativi è stata una scelta molto importante in virtù della mia passione verso il settore agricolo e verso le attuali e future tecnologie che lo supportano.

Desidero ringraziare la mia famiglia, i miei genitori ed i nonni che mi hanno supportato ed incoraggiato ad intraprendere questo percorso universitario, aiutandomi nei momenti di maggior difficoltà e condividendo con me i vari traguardi raggiunti nel corso di questi tre anni.

Grazie alla mia ragazza Cristina, per esserci stata sempre, credendo in me e nelle mie passioni più grandi e condividendo momenti di ansia ma anche di felicità prima e dopo le varie prove affrontate.

Grazie ai miei fratelli Manuel e Margherita, per il loro supporto e la loro vicinanza nei momenti di difficoltà.

Grazie ai miei compagni di corso, per aver condiviso insieme questo percorso.

Inoltre desidero ringraziare anche il mio tutor aziendale Filippo, in primis per la passione che mi ha trasmesso riguardo il vertical farming, ma anche per il supporto e i consigli che mi ha dato in azienda durante lo svolgimento dell'esperimento.

Infine un grande ringraziamento al professor. Luigi Ledda e alla professoressa Paola A. Deligios per avermi seguito durante lo svolgimento di questa prova sperimentale.