



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI RISORSE NATURALI E  
AMBIENTE

Corso di Laurea Triennale in Scienze e Tecnologie Agrarie

# **Tecniche di coltivazione idroponica e convenzionali a confronto: impatti e produttività**

Relatore: Prof. Carlo Nicoletto

Laureando: Andrea Giacomelli  
Matricola n. 2012751

ANNO ACCADEMICO 2023/2024



## Sommario

RIASSUNTO	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUZIONE	6
1.1 IL CONTESTO AGRICOLO ATTUALE	10
2. TECNICHE DI COLTIVAZIONE FUORI-SUOLO	12
2.1 SISTEMA DFT	16
2.2 SISTEMA NFT	17
2.3 AEROPONICA	18
2.4 VERTICAL FARMING	19
3. INPUT PRODUTTIVI E IMPATTI DELLA COLTIVAZIONE TRADIZIONALE E IDROPONICA	20
3.1 IL SUOLO	20
3.2 L'ACQUA	23
3.3 LA NUTRIZIONE VEGETALE NELLA COLTIVAZIONE TRADIZIONALE E IDROPONICA	26
3.3.1 LA FERTILIZZAZIONE NELLA COLTIVAZIONE TRADIZIONALE	26
3.3.2 LA SOLUZIONE NUTRITIVA IN IDROPONICA	27
3.4 L'ENERGIA	29
3.5 SOSTENIBILITA AMBIENTALE SOCIALE ECONOMICA DEI SISTEMI IDROPONICI	32
3.5.1 SOSTENIBILITA AMBIENTALE	32
3.5.2 SOSTENIBILITA SOCIALE	36
3.5.3 SOSTENIBILITA ECONOMICA	37
4. CONFRONTO TRA COLTIVAZIONE TRADIZIONALE E IDROPONICA DELLA LATTUGA	40
4.1 LA LATTUGA COME COLTURA MODELLO	40
4.2 PRODUTTIVITA DELLA LATTUGA	41
4.3 PRODUTTIVITA DELL'ACQUA	46
4.4 IL CONSUMO ENERGETICO	48
4.5 CONVENIENZA ECONOMICA	49
5 CONCLUSIONI	53
BIBLIOGRAFIA	55



## RIASSUNTO

Negli ultimi decenni diverse difficoltà hanno messo a dura prova l'agricoltura tradizionale. A partire dai cambiamenti climatici, passando attraverso la crescita della popolazione mondiale e la continua urbanizzazione, per arrivare ai sempre più numerosi ed ubiquitari insetti/agenti patogeni che minacciano le produzioni agrarie. Negli anni l'agricoltura intensiva ha causato diversi impatti negativi sull'ambiente, come il degrado dei suoli agrari, che si sono impoveriti anche in termini di fertilità, l'inquinamento dei corpi idrici e la perdita di biodiversità degli ecosistemi agrari.

Tra le possibili soluzioni per far fronte a queste difficoltà si è diffusa la tecnica di coltivazione fuori suolo. Questo sistema pone l'agricoltura tradizionale di fronte a un cambiamento radicale, in quanto svincola la crescita delle piante dal sistema suolo.

In questo elaborato di tesi l'attenzione è stata posta sui sistemi di coltivazione fuori-suolo idroponici, che non sostituiscono il suolo con altri substrati di coltivazione, ma utilizzano l'acqua come mezzo per apportare gli elementi nutritivi alle piante e per sostenerne la vita.

La coltivazione idroponica pertanto se confrontata con la coltivazione tradizionale permette di ottenere rese per unità di superficie più elevate con un consumo idrico minore. Ciò significa che suolo, acqua, e input produttivi sono utilizzati con una maggiore efficienza.

Tra i tanti vantaggi però la coltivazione idroponica presenta anche dei limiti. Il fatto di sostituire il suolo con l'acqua si traduce in consumi energetici. Di particolare rilevanza è il fabbisogno di energia elettrica necessaria al funzionamento delle pompe per il ricircolo della soluzione nutritiva e di tutte le apparecchiature tecnologiche necessarie al funzionamento di un sistema di questo tipo. La generazione di corrente elettrica in molti casi è oggi ancora associata ai combustibili fossili e il suo utilizzo potrebbe comportare un elevato impatto ambientale. Questo lavoro di tesi ha pertanto cercato di capire quali possano essere gli impatti ambientali che ha la coltivazione idroponica. Questi sono poi stati confrontati con quelli della coltivazione tradizionale.

Il confronto è stato effettuato utilizzando la lattuga come coltura modello e sono stati confrontati i parametri di produttività, consumo idrico ed energetico. È stato anche considerato un confronto su quella che è la convenienza economica dei due sistemi di coltivazione unitamente ad una breve analisi sulla sostenibilità ambientale, sociale ed economica dei sistemi idroponici.



## **ABSTRACT**

In recent decades, various challenges have severely tested traditional agriculture. These include climate change, the growth of the global population, continuous urbanization, and the increasing prevalence and ubiquity of pests and pathogens threatening agricultural production. Over the years, intensive agriculture has caused several negative environmental impacts, such as soil degradation, loss of soil fertility, water pollution, and a decline in the biodiversity of agricultural ecosystems.

One of the potential solutions to these challenges is the adoption of soilless cultivation techniques. This system represents a radical shift for traditional agriculture, as it decouples plant growth from the soil system. This thesis focuses on hydroponic soilless cultivation systems, which do not replace the soil with other growing substrates but instead use water as a medium to deliver nutrients and support plant life.

Compared to traditional cultivation, hydroponic farming allows for higher yields per unit area with lower water consumption. This means that soil, water, and productive inputs are used more efficiently. However, hydroponic cultivation also has its limitations. Replacing soil with water translates into higher energy consumption. Notably, there is a significant demand for electrical energy to operate the pumps for nutrient solution recirculation and all the technological equipment required for such a system. In many cases, the generation of electricity is still associated with fossil fuels, and its use could have a substantial environmental impact. Therefore, this thesis aims to understand the environmental impacts of hydroponic cultivation and compare them to those of traditional cultivation. The comparison was conducted using lettuce as a model crop, evaluating parameters such as productivity, water consumption, and energy consumption. Additionally, an economic viability comparison of the two cultivation systems was performed, along with a brief analysis of the environmental, social, and economic sustainability of hydroponic systems.





# 1. INTRODUZIONE

Con la rivoluzione verde avvenuta tra il 1940 e il 1970 il modo di fare agricoltura è cambiato, con rese unitarie che sono più che raddoppiate in certi casi e con esse è aumentata anche la qualità dei prodotti agricoli coltivati. Questo ha permesso di produrre cibo di qualità in quantità elevate, il che si è tradotto in una disponibilità di prodotti alimentari a prezzi accessibili dalla maggior parte della popolazione mondiale.

È infatti altresì vero che il numero di persone che soffrono la fame a livello mondiale è diminuito grazie alla rivoluzione verde. Tuttavia per arrivare a questo punto, secondo i dati della FAO, tra il 1960 e il 2015 la produzione agricola è aumentata del 300%. Questo aumento di produzione è stato reso possibile dall'impiego di specie vegetali geneticamente selezionate, dal miglioramento delle tecniche agronomiche con l'uso di fertilizzanti chimici e prodotti fitosanitari, l'aver aumentato la superficie utilizzabile per la coltivazione bonificando diverse aree e l'aver sfruttato riserve di acqua dolce per l'irrigazione (Chausali e Saxena, 2021).

Secondo la FAO oltre 1,6 miliardi di ettari di terra a livello mondiale vengono utilizzati per la produzione vegetale e la superficie globale destinata alla coltivazione negli ultimi trent'anni è aumentata di 5 milioni di ettari ogni anno. Tale incremento contribuisce alla deforestazione, al degrado del suolo associato e all'emissione di gas a effetto serra (GHG) (Casey et al., 2022).

Questo tipo di agricoltura definito intensivo per massimizzare l'efficienza produttiva, fa un uso talvolta smoderato di prodotti agrochimici. Questi prodotti sono insetticidi, acaricidi, fungicidi, erbicidi, fertilizzanti e agrofarmaci in generale (Chausali e Saxena, 2021).

L'impiego di questi input porta a conseguenze ambientali negative in quanto va ad inquinare il suolo che di conseguenza si degrada e inquinano anche le riserve idriche sotterranee. Queste sostanze possono inoltre disperdersi con l'aria e possono essere potenzialmente pericolose per la salute umana (Barbosa et al., 2015; Chausali e Saxena, 2021).

L'agricoltura tradizionale o intensiva è definita come la pratica di coltivazione nel terreno, all'aperto e che spesso fa uso di irrigazione e applicazione attiva di nutrienti (Fussy e Papenbrock, 2022).

Questo tipo di agricoltura, così come qualsiasi altra attività umana, ha un impatto sugli ecosistemi naturali che vengono alterati nel momento in cui si vanno a creare le condizioni ottimali per la crescita delle colture. Il suolo nell'agricoltura intensiva viene usato in continuazione con conseguente perdita di diversi servizi agro-ecosistemici e perdita di biodiversità di questi (Huy et al., 2020). La coltivazione basata sul suolo è oggi minacciata in quanto i terreni sono sempre meno fertili a causa della perdita di microrganismi benefici, dello continuo sfruttamento, degli effetti del maltempo e della

cattiva gestione delle risorse idriche con l'esaurimento delle riserve idriche sotterranee (Huy et al., 2020).

Il consumo d'acqua è un altro punto critico dell'agricoltura intensiva, secondo alcune stime il settore agricolo consuma il 70% dell'acqua che viene prelevata da falde acquifere e corpi idrici superficiali. L'agricoltura è inoltre ritenuta responsabile del 13,5% delle emissioni globali di gas a effetto serra, che sono principalmente anidride carbonica, metano e protossido d'azoto. Queste emissioni sono in parte di origine naturale e in parte sono emessi dalle attività umane (Pomoni et al., 2023). I gas con effetto serra sono così chiamati perché si concentrano in atmosfera e sono responsabili del suo riscaldamento. Il risultato è che la temperatura media della superficie terrestre nel periodo 2011-2020 è risultata essere di circa 1,1°C maggiore rispetto a quella osservata tra il 1850 e il 1990 (Pomoni et al., 2023). Le attività umane utilizzano materie prime, che sono generalmente scarse e ci vengono fornite dagli ecosistemi del pianeta terra. Questi ultimi sono in grado di rigenerarsi e questa proprietà viene identificata con il termine biocapacità. La biocapacità può essere vista come ciò che il pianeta ci offre in termini di materie prime naturali ed è la moneta base di tutti i sistemi viventi presenti sulla terra (Fussy e Papenbrock, 2022).

L'impronta ecologica invece misura oltre alla biocapacità disponibile, ovvero l'offerta, anche la domanda che tutti gli esseri umani determinano attraverso le loro attività.

I progressi tecnologici e la gestione del territorio hanno incrementato di circa il 28% la biocapacità globale negli ultimi 60 anni. Tuttavia questo dato potrebbe essere sovrastimato dal momento che le statistiche delle Nazioni Unite non includevano perdite come l'erosione del suolo, l'esaurimento delle acque sotterranee e la deforestazione.

In ogni caso questo aumento non è stato così marcato come l'incremento della domanda di materie prime da parte dell'uomo. L'impronta ecologica umana stimata utilizzando le statistiche delle Nazioni Unite difatti è aumentata del 173% nello stesso periodo e ora supera del 56% la biocapacità del pianeta. Questo significa che l'uomo con le sue attività consuma 1.56 volte in più rispetto a quello che la terra è in grado di offrire (Fussy e Papenbrock, 2022).

Il cambiamento climatico inoltre accentua il problema in quanto la produzione acquatica è minacciata da disastri naturali e dall'incremento del livello medio del mare. La produzione vegetale è invece minacciata dalla scarsità di acqua e suolo, dalla desertificazione e salinizzazione dei suoli agrari (Fussy e Papenbrock, 2022).

Anche l'incremento della produzione alimentare ha portato a un maggiore sfruttamento di risorse limitate e non rinnovabili, se non a tassi molto lenti. L'agricoltura convenzionale difatti prevede un elevato impiego di input produttivi per poter massimizzare la resa garantendo al contempo l'ottenimento di prodotti di qualità (Chausali e Saxena, 2021).

Attualmente il tema di quanto ogni attività umana incida sull'emissione di gas a effetto serra e di conseguenza sul cambiamento climatico è molto sentito e studiato. Anche la produzione di cibo sulla base di quanto detto finora ha un ruolo nella liberazione di gas climalteranti e sul depauperamento delle risorse naturali.

Tuttavia la produzione alimentare è indispensabile per la vita e lo sviluppo umano. Già nel 1996 difatti il World Food Summit (WFS) ha deciso che tutte le persone nel mondo dovessero sperimentare la sicurezza alimentare. Ciò significa che tutti devono avere accesso a cibo adeguato, sicuro e nutriente, che gli permetta di soddisfare i propri bisogni nutrizionali permettendogli di svolgere una vita sana e attiva (Hassanien et al., 2016).

Per garantire la sicurezza alimentare, dovrebbero essere soddisfatte queste quattro variabili secondo la FAO (Hassanien et al., 2016):

- 1) disponibilità di quantità sufficienti di cibo di qualità adeguata, fornito attraverso la produzione nazionale o le importazioni (Disponibilità);
- 2) accesso da parte degli individui a risorse adeguate per acquistare alimenti adeguati a una dieta nutriente (Accesso);
- 3) utilizzo del cibo attraverso una dieta adeguata, acqua pulita, servizi igienico-sanitari e assistenza sanitaria per raggiungere uno stato di benessere nutrizionale in cui tutti i bisogni fisiologici sono soddisfatti (Utilizzo);
- 4) una situazione stabile che permetta a una popolazione, una famiglia o un individuo di avere accesso a cibo adeguato in ogni momento (Stabilità).

Nel 2015 l'assemblea generale dell'ONU (Organizzazione delle Nazioni Unite) ha adottato l'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile, un programma per le persone, il pianeta e la prosperità. Si articola in diciassette obiettivi per raggiungere uno sviluppo sostenibile (SDG) al 2030.

La sicurezza alimentare svolge un ruolo fondamentale nel sostenere l'Agenda 2030. In particolar modo per quanto riguarda l'Obiettivo 2 "fame zero", che prevede di porre fine alla fame, raggiungere la sicurezza alimentare, migliorare la nutrizione e promuovere un'agricoltura sostenibile entro il 2030 (Chen et al., 2023). Gli obiettivi dell'Agenda 2030 devono tuttavia scontrarsi con la realtà. Studi recenti difatti riportano che diverse persone nel mondo soffrono ancora la fame e vivono condizioni di crisi alimentare.

La FAO ha valutato lo stato della sicurezza alimentare nel 2020 e ha dimostrato che la fame colpisce ancora il 21,0% della popolazione in Africa, il 9,0% in Asia e il 9,1% in America Latina e nei Caraibi. Ha inoltre evidenziato come nel 2020 tra le 720 e le 811 milioni di persone a livello mondiale hanno sofferto la fame, ovvero tra le 118 e i 161 milioni di persone in più rispetto al 2019.

Questo incremento è conseguenza diretta dell'aumento della popolazione a livello globale. (Taghizadeh, 2021) riporta che la popolazione mondiale negli ultimi 150 anni è cresciuta di 8,7 miliardi di individui, ed entro il 2050 è prevista superare i 9 miliardi. Prendendo in considerazione tutti questi fattori si prevede che il numero di persone che soffrirà la fame in futuro sarà sempre maggiore e che per assicurare la sicurezza alimentare la produzione di cibo dovrà mantenere il passo con la crescita della popolazione. I ricercatori stimano che la produzione agricola dovrà aumentare del 70% rispetto ai primi anni del XXI secolo per soddisfare la domanda alimentare di una popolazione mondiale sempre più numerosa e più ricca entro il 2050 (Taghizadeh, 2021).

Al netto di tutti i problemi attuali però riuscire ad incrementare ulteriormente la produzione agricola potrebbe non essere così facile. Inoltre va anche considerato che l'agricoltura soffre a causa dei cambiamenti climatici. Periodi di siccità e di piovosità prolungati rendono irregolare la disponibilità idrica, mentre l'aumento della temperatura porta a inverni sempre più miti e all'intensificazione degli eventi climatici estremi.

Tutto ciò fa capire quanto la produzione alimentare così come la intendiamo oggi sia sempre più a rischio.

Altri studi prevedono anche che circa il 68% della popolazione mondiale vivrà all'interno di aree urbane entro il 2050. Questo potrebbe essere causa di disordini per quanto riguarda la catena di approvvigionamento alimentare in quanto la produzione agricola ha bisogno di grandi spazi e deve essere praticata alle periferie e nelle campagne. Le città saranno pertanto sempre più dipendenti e distanti dai centri di produzione alimentare (Taghizadeh, 2021).

Per tutti questi motivi è oggi fondamentale lo sviluppo di tecnologie che permettano di ottimizzare la resa delle coltivazioni attraverso un uso razionale dell'acqua e delle risorse della terra (Fussy & Papenbrock, 2022).

Queste tecniche dovrebbero anche permettere di produrre cibo in modo sostenibile, andando a ridurre l'impatto sull'ambiente e sulla salute delle persone.

Un sistema di coltivazione ideale dovrebbe produrre cibo di ottima qualità e in quantità elevate. La produzione dovrebbe poter avvenire quanto più vicino al consumatore finale soprattutto per prodotti come ortaggi a foglia, così da mantenere la freschezza dei prodotti e creare un rapporto tra produttore e consumatore. Verrebbe così limitato anche l'impatto ambientale della catena di trasporto.

## 1.1 IL CONTESTO AGRICOLO ATTUALE

Attualmente il settore agricolo critica molto gli obiettivi della strategia farm to fork del green deal europeo, che prevedono di ridurre del 50% l'uso di prodotti fitosanitari, di almeno il 20% l'uso di fertilizzanti e di convertire almeno il 25% dei terreni agricoli alla coltivazione biologica entro il 2030. Per quanto questi obiettivi possano mettere in difficoltà l'agricoltura convenzionale diversi studi hanno comunque dimostrato come l'agricoltura intensiva sia causa di squilibri per gli ecosistemi naturali. Tali squilibri sono causati dall'apporto di sostanze chimiche di sintesi che vanno a deteriorare la fertilità fisica chimica e biologica del suolo agrario. Il terreno inoltre subisce una serie di processi di degradazione tra i quali possono essere citati erosione, perdita di sostanza organica, contaminazione locale o diffusa, impermeabilizzazione, compattazione, perdita di biodiversità e salinizzazione (Wang et al., 2023).

Tutti questi fenomeni combinati insieme possono portare a condizioni climatiche aride o sub-aride che determinano la desertificazione (Maestre-Valero et al., 2018).

Un'eccessiva mineralizzazione della sostanza organica oltre a essere causa di desertificazione è anche causa dell'emissione di gas a effetto serra dal momento che la sua degradazione porta alla liberazione di acqua e anidride carbonica. Per ridurre le emissioni di gas climalteranti sarebbe pertanto opportuno conservare gli stock di carbonio presenti nel suolo (Chausali e Saxena, 2021).

Per cercare di mitigare l'impatto dell'agricoltura sul cambiamento climatico si dovrebbero adottare tecniche di coltivazione che rispettino quanto più possibile quelli che sono gli equilibri naturali dell'agroecosistema. Si dovrebbe pertanto limitare l'utilizzo di input chimici e apportare per quanto possibile sostanze di origine naturale. Questo però potrebbe determinare una diminuzione della resa. Cosa che non è accettabile se si considera quanto detto precedentemente ovvero che per soddisfare la richiesta alimentare della popolazione al 2050 la produzione totale di cibo dovrebbe aumentare di circa il 70% a livello mondiale.

Considerando che i terreni arabili sono un bene limitato per poter raggiungere questo obiettivo bisognerebbe intensificare ulteriormente la coltivazione e aumentare la superficie servita da irrigazione. Tuttavia questa soluzione porterebbe ad aumentare la già elevata pressione sulle fonti idriche nelle regioni aride o semi-aride (Maestre-Valero et al., 2018). Negli ultimi anni molto si è fatto per cercare di rendere l'agricoltura più sostenibile e produttiva e che possa allo stesso tempo fornire diversi servizi, sia a livello ambientale per tutelare gli ecosistemi e sia a livello sociale.

L'UNBC (University of Northern British Columbia) ha definito la sostenibilità come "la capacità di soddisfare le esigenze del presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare le loro" (Taghizadeh, 2021).

I progressi a oggi raggiunti dal settore agricolo per rendere la produzione sostenibile, si basano sulla conoscenza dell'ecologia dei parassiti e sul controllo dei parassiti da parte dell'agroecosistema così da poter ridurre l'utilizzo di prodotti chimici (Barrière et al., 2014).

Per controllare gli agenti patogeni oppure gli insetti che possono causare danni alle coltivazioni con conseguente perdita di resa, in Europa è sempre più usata quella che viene definita lotta integrata. Questo tipo di controllo si basa su quattro pilastri fondamentali che prevedono il riconoscimento e monitoraggio degli organismi potenzialmente dannosi per le coltivazioni, applicazione del controllo biologico dove possibile, utilizzo di tutte le biotecniche disponibili (mezzi agronomici, fisici, colturali e meccanici), e infine applicare solo al superamento di determinate soglie di danno o numerosità degli insetti i prodotti chimici, che devono essere il più selettivi possibile.

Questo tipo di protezione delle colture se ben applicato permette già di ridurre l'uso di sostanze chimiche (Barrière et al., 2014).

D'altra parte anche la coltivazione biologica ha avuto un notevole incremento negli ultimi anni, sostenuta sia dalla richiesta da parte del mercato di prodotti biologici, sia perché favorita dalle politiche agricole Comunitarie in Europa (Barrière et al., 2014)..

Secondo il Programma Nazionale Biologico (NOP) del Dipartimento dell'agricoltura (USDA) l'agricoltura biologica può essere definita come un sistema ecologico di gestione della produzione che promuove e migliora i cicli biologici e l'attività biologica del suolo favorendo la biodiversità (Chausali & Saxena, 2021).

L'obiettivo di questo approccio di coltivazione è produrre alimenti con energia e processi naturali (Chausali & Saxena, 2021). I fondamenti principali dell'agricoltura biologica sono usare in modo responsabile l'energia e le risorse naturali, conservare la biodiversità, conservare gli equilibri ecologici regionali, migliorare la qualità del suolo e mantenere la qualità delle acque.

Va comunque tenuto a mente che oltre ad occuparsi della gestione dell'ambiente l'attività agricola deve anche risolvere i problemi legati all'insicurezza alimentare e fornire cibo di alta qualità in quantità elevate (S. Sharma et al., 2023).

Il tutto considerando anche che a causa dell'aumento della popolazione e della crescente industrializzazione e urbanizzazione, la terra disponibile per la coltivazione si sta riducendo a un ritmo allarmante. Nutrire una popolazione così numerosa diventerà sempre più impegnativo nei prossimi anni (S. Sharma et al., 2023).

Per questo motivo i sistemi di coltivazione fuori suolo hanno preso sempre più campo negli ultimi anni e sono stati studiati come possibile alternativa per produrre cibo di qualità, in condizioni di scarsità idrica e disponibilità di terreni poco adatti alla coltivazione (Massa et al., 2020).

L'affermarsi di questi sistemi nei paesi in via di sviluppo potrebbe fare la differenza in quanto permettono di coltivare diverse specie vegetali, in particolar modo colture orticole e frutta all'interno delle città (Casey et al., 2022).

Questa tecnica di coltivazione è ancora nella sua fase iniziale nei paesi in via di sviluppo e richiede ricerche su vari aspetti prima di poter essere adottata su vasta scala per la produzione agricola.

## **2. TECNICHE DI COLTIVAZIONE FUORI-SUOLO**

I sistemi di coltivazione fuori-suolo sono stati introdotti e sviluppati negli ultimi 30-40 anni (Savvas & Gruda, 2018), per superare i problemi delle malattie legate alla presenza di agenti patogeni nel terreno (Gonnella, M., & Renna, M.).

Questi sistemi di coltivazione sono stati primariamente studiati per la loro convenienza economica, mentre in seguito hanno assunto una certa importanza come strategia potenzialmente utile per ridurre l'impatto ambientale dell'agricoltura (Gonnella, M., & Renna, M.).

Il termine "coltivazione senza suolo" si riferisce in modo generale a qualsiasi metodo di coltivazione che non utilizza il suolo come mezzo di radicazione. Può in alternativa servirsi di altri mezzi, siano essi liquidi o solidi, organici o minerali (Majid et al., 2021).

I sistemi di coltivazione fuori-suolo contribuiscono a limitare l'utilizzo di fertilizzanti e pesticidi. Permettono così di ridurre il rilascio di inquinanti che andrebbero a contaminare il suolo e l'acqua, permettendo al contempo di ottenere prodotti di alta qualità e valore nutrizionale elevato (Massa et al., 2020).

La coltivazione fuori-suolo avviene principalmente sotto serra o comunque in ambiente chiuso, il che permette di modificare le condizioni ambientali e adattarle alle necessità della specie coltivata. Per questo motivo si parla di coltivazione in ambiente controllato (S. Sharma et al., 2023).

La coltivazione fuori-suolo ha preso sempre più campo negli ultimi anni tanto è vero che le serre di nuova costruzione utilizzano principalmente sistemi di coltivazione fuori-suolo (Fontana & Nicola, 2009).

Questi sistemi sono favoriti in quanto permettono di ottenere rese elevate e prodotti con standard qualitativi elevati. Permettono inoltre di uniformare la produzione, di ridurre i costi e l'impatto ambientale. I prodotti ottenuti con la coltivazione fuori-suolo sono puliti e richiedono molta meno acqua rispetto a quelli coltivati a terra per il lavaggio nell'industria della verdura fresca (Fontana & Nicola, 2009).

I sistemi di coltivazione fuori-suolo sono particolarmente adatti alla coltivazione di piccoli frutti e ortaggi. Queste coltivazioni infatti presentano fabbisogni idrici e nutrizionali importanti e necessitano di condizioni climatiche il quanto più possibile stabili e vicine alle loro necessità.

I sistemi di coltivazione che non prevedono l'utilizzo del suolo come mezzo di crescita si possono suddividere in due principali categorie che sono i sistemi aperti o chiusi (Elkazzaz, 2017).

Nei sistemi chiusi la soluzione nutritiva viene utilizzata per più cicli di irrigazione. La soluzione nutritiva in eccesso viene difatti recuperata, riciclata e reimpressa in circolazione. Per questo motivo i parametri della soluzione nutriente devono essere costantemente monitorati e mantenuti entro certi valori prefissati (Elkazzaz, 2017).

Il fatto di riciclare la soluzione nutritiva contribuisce a ridurre il rilascio nell'ambiente di nitrati e fosfati principalmente, che andrebbero ad accumularsi nelle riserve idriche superficiali e sotterranee (Fussy & Papenbrock, 2022).

Nel caso in cui venga adottato un sistema di coltivazione fuori-suolo chiuso è opportuno che la soluzione nutriente drenata sia filtrata e disinfettata prima di essere riciclata e rimessa in circolo, per evitare la diffusione di agenti patogeni.

Tuttavia spesso è la disinfezione chimica la modalità più economica per sanificare la soluzione, e di conseguenza è anche la tecnica più utilizzata, soprattutto nei sistemi che riciclano grandi volumi di soluzione nutritiva (Savvas & Gruda, 2018).

Nei sistemi aperti invece la soluzione nutritiva è creata ex-novo appositamente per ogni ciclo di irrigazione. La soluzione solitamente viene trasportata alle piante attraverso delle tubazioni che terminano con dei gocciolatori in prossimità della zona radicale (Elkazzaz, 2017).

Nei sistemi aperti deve essere mantenuto un adeguato deflusso superficiale affinché ci sia sempre la giusta concentrazione di nutrienti e l'apparato radicale delle piante sia costantemente idratato.

I sistemi di coltivazione fuori suolo possono inoltre essere distinti a seconda che essi sostituiscano il terreno con substrati liquidi o solidi (Fussy & Papenbrock, 2022).

I sistemi che nella tecnica di coltivazione prevedono l'utilizzo di un mezzo di crescita solido, che sia di matrice organica o minerale sono chiamati a mezzo solido. Negli anni sono stati ricercati mezzi di coltivazione con proprietà fisiche, idrauliche e chimiche ottimali. Alcuni esempi sono la lana di roccia, la fibra di cocco, la perlite o la torba (Savvas & Gruda, 2018).

L'utilizzo di substrati solidi è da evitare nei sistemi chiusi dal momento che la loro presenza e la loro parziale disgregazione potrebbe dare problemi nel ricircolo della soluzione nutritiva (Fussy & Papenbrock, 2022).

I sistemi che come mezzo di crescita utilizzano un mezzo liquido, ovvero la soluzione nutritiva sono per l'appunto definiti a mezzo liquido.



In quest'ultima categoria rientrano quelli che in letteratura vengono solitamente chiamati sistemi idroponici e che includono ad esempio la tecnica DFT, NFT e aeroponica (Savvas & Gruda, 2018).

Il termine idroponica è più specifico rispetto al termine "coltivazione fuori-suolo" e indica i sistemi che non utilizzano alcun mezzo solido per la radicazione. In questo caso è la soluzione nutritiva l'unico mezzo che sostiene la vita delle piante coltivate.

Idroponica difatti deriva dalle parole greche *hýdor* e *pónos* che significano rispettivamente acqua e lavoro, ovvero lavoro dell'acqua. Il termine è stato introdotto dal professore William Gericke nei primi degli anni 30.

Gericke affermava che l'idroponica è un ottimo sistema di coltivazione non solo per i paesi che hanno poca terra fertile a disposizione, ma anche per i paesi che oltre ad avere a disposizione molta terra arabile presentano una densità di popolazione elevata (Tripathi et al., 2022). Sharma et al., (2018) riporta che anche con questo sistema sono gli ortaggi verdi a foglia come lattuga, spinaci, prezzemolo, sedano, ecc.. che possono essere coltivati facilmente e con successo.

Nella coltivazione idroponica tutti i nutrienti essenziali per la vita delle piante, sono forniti direttamente all'apparato radicale, sotto forma di elementi minerali disciolti in acqua. La soluzione prende il nome di soluzione nutritiva (Sharma et al., 2023).

Per il corretto funzionamento di un sistema idroponico, è pertanto fondamentale che ci sia una rigorosa gestione nell'apporto dei nutrienti (Kumari et al., 2018).

Anche i parametri della soluzione nutritiva come pH, temperatura e conducibilità elettrica (EC), devono essere attentamente regolati. Inoltre il corretto bilanciamento di acqua, ossigeno e nutrienti, e la sostituzione quando necessario della soluzione nutritiva faranno la differenza tra il successo o il fallimento della coltivazione idroponica (Kumari et al., 2018).

Anche la quantità di CO<sub>2</sub> e l'umidità relativa presenti nell'ambiente di coltivazione sono importanti, al fine di massimizzare la resa e la qualità della produzione (Elkazzaz, 2017).

La coltivazione idroponica si svolge principalmente in serra ed è molto rispettosa nei confronti dell'ambiente in quanto permette di ridurre l'utilizzo di prodotti fitosanitari, aiuta ad affrontare le sfide dei cambiamenti climatici e utilizza in modo molto efficiente le risorse (Tripathi et al., 2022). Inoltre questo tipo di agricoltura non va né a impoverire il suolo né a degradarlo.

I sistemi idroponici utilizzano sostanzialmente meno acqua rispetto alla coltivazione su suolo, dal momento che le radici delle piante sono costantemente idratate e nutrite in quanto sono sommerse o attraversate dalla soluzione nutritiva. La coltivazione con metodi idroponici è una tecnica nota nei paesi sviluppati e la sua applicazione sta aumentando in tutto il mondo ed essendo svolta in ambiente controllato garantisce cicli di coltivazione più brevi che permettono di completare più cicli durante l'anno.

L'industrializzazione e l'automazione offerte dai sistemi di coltivazione idroponica permettono di aumentare la produttività delle coltivazioni, in quanto vengono create le condizioni ottimali per massimizzare l'assorbimento da parte delle piante coltivate dei nutrienti di cui hanno bisogno.

I nutrienti sono forniti per soddisfare con precisione quelle che sono le esigenze di ogni coltura in un determinato stadio fenologico, in termini di qualità e quantità (Massa et al., 2020).

L'obiettivo principale di questa tecnologia di coltivazione è eliminare i problemi associati al suolo in serra che come già visto comprendono la presenza di malattie, la scarsa fertilità, la salinità, ecc... Inoltre, il passaggio in ambiente controllato permette di ridurre l'applicazione di prodotti fitosanitari e di altre sostanze chimiche tossiche, che sono invece necessarie nelle coltivazioni svolte sul suolo per disinfettarlo e controllare gli agenti patogeni (Fussy e Papenbrock, 2022).

Alla luce di tutto ciò l'adozione della coltivazione idroponica può essere particolarmente utile negli ambienti dove diversi problemi ostacolano la coltivazione tradizionale. Tra questi rientrano stress ambientale, carenza di suolo fertile, carenza o disponibilità idrica irregolare (Shtaya e Qubbaj, 2022). Le colture che crescono in ambiente controllato non sono influenzate dal cambiamento climatico e possono essere coltivate tutto l'anno indipendentemente dal fatto che sia o meno la stagione di crescita adeguata (Sharma et al., 2018).

I sistemi idroponici commerciali sono gestiti automaticamente e questo dovrebbe permettere di ridurre l'impiego di manodopera, in quanto non sono necessarie diverse pratiche agronomiche tradizionali come la lavorazione del terreno, irrorazione (la crescita delle malerbe è praticamente impossibile mentre i parassiti possono essere facilmente esclusi) (Sharma et al., 2018).

Nonostante i diversi vantaggi che la coltivazione fuori-suolo presenta ci sono anche alcune limitazioni significative. Le conoscenze tecniche necessarie e costi per l'investimento iniziale elevati sono necessari per la realizzazione di impianti che possano fornire una produzione su scala commerciale. Nonostante l'assenza del terreno le piante in un sistema idroponico condividono esattamente la stessa soluzione nutriente e le malattie trasmesse dall'acqua possono facilmente diffondersi da una pianta all'altra. La stagione calda e l'ossigenazione limitata possono limitare la produzione e causare perdite di resa. Infine alimentazione elettrica e talvolta anche illuminazione artificiale sono necessarie perché il sistema possa operare in indoor farming.

I sistemi idroponici sostituiscono l'energia necessaria alle lavorazioni del suolo con l'elettricità, per questo motivo sono stati definiti come sistemi ad alta intensità energetica. È necessaria un'attenta valutazione per capire quale ruolo possano svolgere i sistemi idroponici nel rendere più sostenibile dal punto di vista ambientale il sistema alimentare (Casey et al., 2022).

In questo studio verranno principalmente analizzati i sistemi di coltivazione fuori-suolo idroponici, in particolare NFT, DFT e aeroponica.

## 2.1 SISTEMA DFT

La tecnica di coltivazione fuori suolo DFT (Deep Water Culture) è un sistema di coltivazione che rientra tra i sistemi idroponici. La tecnica DFT è il sistema di più semplice costruzione e utilizzo. Questo impianto può facilmente essere sviluppato utilizzando un serbatoio che abbia una buona capacità di tenuta d'acqua. Al di sopra del serbatoio sono poi posti dei vassoi forati che sostengono le piante (Wang et al., 2023).

I vassoi possono essere direttamente in contatto con la soluzione nutritiva e quindi galleggiare su questa, oppure essere leggermente sollevati in modo da permettere alle radici di assorbire ossigeno, dallo spazio che intercorre tra il vassoio e la soluzione nutritiva (Massa et al., 2020).

Il vassoio divide la parte epigea da quella ipogea della pianta, con la chioma che si trova al di sopra mentre le radici sotto sono più o meno immerse nella soluzione nutritiva (Sharma et al., 2023).

Se il pannello è posto a diretto contatto con la soluzione l'ossigeno viene immesso direttamente nel serbatoio da una pompa che ricircola la soluzione e la fa passare attraverso una pietra di filtrazione per mantenere un'adeguata concentrazione di ossigeno disciolto in essa (Sharma et al., 2023).

In questo tipo di sistema è obbligatorio monitorare la concentrazione dell'ossigeno e dei nutrienti, la salinità e il pH poiché alghe e muffe possono svilupparsi e diffondersi rapidamente nel serbatoio.

Il sistema DFT fornisce un ambiente nutritivo generalmente costante all'apparato radicale, il che non rende necessaria un'analisi continua dello stato della soluzione nutritiva (Fussy e Papenbrock, 2022).

Questo è reso possibile dall'elevata quantità di acqua presente nel serbatoio che garantisce un certo potere tampone, tanto che può essere paragonato a quello del suolo (Massa et al., 2020).

Inoltre anche la temperatura e la concentrazione della soluzione nutritiva difficilmente subiscono brusche variazioni (Tripathi et al., 2022). Questo sistema può essere facilmente automatizzato in modo tale che la soluzione nutritiva venga rifornita degli elementi minerali nel momento in cui la loro concentrazione scende al di sotto di un valore soglia (Molin e Martin, n.d.).

Diversi ortaggi a foglia possono essere coltivati con questo sistema e diventa facile gestire la coltivazione soprattutto per le specie che hanno un ciclo di crescita relativamente breve (Molin e Martin, n.d.). Ad esempio in impianti professionali per la coltivazione della lattuga i vassoi con le piantine sono immessi da un lato della vasca e man mano che ne vengono aggiunti di nuovi questi sono spinti sempre più verso l'estremità opposta, dove dovrebbero arrivare quando i cespi di lattuga sono pronti per essere raccolti e commercializzati.

Se l'impianto è ben progettato e gestito quando un vassoio contenente cespi di lattuga pronti per la raccolta viene rimosso da un'estremità della vasca, nell'estremità opposta si libera lo spazio per accogliere un nuovo vassoio di piantine (Both, n.d.).

## **2.2 SISTEMA NFT**

Il sistema idroponico NFT (Nutrient Film Technique o tecnica del film nutriente) è stato sviluppato a metà degli anni 60 in Inghilterra dal Dr. Alen Cooper per superare i limiti del sistema a flusso e riflusso (Sharma et al., 2018).

La struttura principale di questo sistema di coltivazione si basa su canali di crescita o tubi forati, i quali sono disposti parallelamente al suolo e hanno una determinata pendenza dall'inizio dove viene introdotta la soluzione nutritiva, alla fine, dove questa arriva grazie alla gravità.

In questa tecnica di coltivazione la soluzione nutriente circola continuamente attraverso i canali di crescita, per questo viene anche chiamato "sistema circolare a flusso continuo" (Fussy & Papenbrock, 2022).

La soluzione nutritiva viene pompata dal serbatoio fino alla sommità dei canali di crescita. Poi, una volta che si trova all'interno del canale, scorre fino all'estremità opposta, che si trova a un'altezza minore. La soluzione scorre così attraverso gli apparati radicali delle piante che sono disposte lungo il canale. Una volta arrivata all'estremità inferiore del canale di crescita la soluzione nutritiva in eccesso viene scaricata e riportata al serbatoio principale così da poter essere rigenerata e rimessa in circolo (Tripathi et al., 2022).

Il continuo pompaggio della soluzione fa sì che questa sia costantemente ossigenata (Elkazzaz, 2017). Inoltre la profondità del canale di crescita limitata e di conseguenza il flusso della soluzione nutritiva poco profondo permettono alle radici di galleggiare rimanendo così in parte esposte all'aria e potendo così assorbire ossigeno (Sharma et al., 2023).

Il sistema NFT è generalmente chiuso e le radici sono così facilmente esposte allo sviluppo di infezioni fungine in quanto sono costantemente immerse in acqua e nutrienti (Sharma et al., 2018).

Tuttavia questi sistemi possono essere anche aperti, ciò significa che l'acqua e gli elementi nutritivi disciolti vengono scaricati dopo ogni singolo ciclo di fertirrigazione. In questo caso si ricorre spesso all'utilizzo di un substrato di crescita per trattenere la soluzione nutritiva. La tecnica NFT a ciclo aperto rende più difficile lo sviluppo di malattie, però se non viene gestita bene c'è il rischio che i nutrienti che non sono assorbiti vengano rilasciati nell'ambiente (Elkazzaz, 2017).

Dei diversi sistemi idroponici l’NFT a ciclo chiuso ha il vantaggio di essere tra quelli più efficienti per quanto riguarda l’utilizzo dell’acqua (Shtaya e Qubbaj, 2022).

Per evitare danni irreversibili alla coltivazione nel caso il sistema sia chiuso e non faccia uso di substrati per la crescita è fondamentale che il flusso della soluzione nutritiva non venga mai interrotto, e che siano presenti sistemi d’allarme nel caso si verifichino dei guasti (Taghizadeh, 2021).

I canali dove circola la soluzione nutritiva devono essere quanto più possibile riparati dalla radiazione solare per evitare la crescita di alghe, per questo sono generalmente chiusi (Sharma et al., 2023).

In questo sistema, molti ortaggi a foglia verde possono essere facilmente coltivati. È infatti il sistema più utilizzato per la coltivazione di lattuga (Sharma et al., 2018).

## **2.3 AEROPONICA**

Aeroponica è un sistema di coltivazione che rientra tra quelli idroponici, con la differenza che la soluzione nutritiva viene nebulizzata in gocce microscopiche (fog o aerosol) e viene spruzzata direttamente sull’apparato radicale. È un sistema chiuso che non utilizza mezzi di crescita e non richiede il ricircolo di grandi volumi d’acqua (Fussy e Papenbrock, 2022).

Questo sistema si compone di pannelli forati dove vengono inserite le piantine. Il pannello sostiene la pianta in prossimità del colletto. I pannelli possono essere posti sopra una vasca o camera chiusa assumendo così anche la funzione di coperchio (Barla et al., 2020).

L’apparato radicale è sospeso nel vuoto internamente alla camera, mentre la parte epigea della pianta sta sopra, all’aperto e non viene a contatto con la soluzione nutritiva.

All’interno della camera, che è sigillata per evitare la crescita delle alghe, sono presenti degli ugelli i quali vengono attraversati dalla soluzione nutritiva in pressione che viene così nebulizzata e le goccioline vengono distribuite sulle radici che sono costantemente mantenute in condizioni di umidità elevata, ma hanno comunque a disposizione una grande quantità di ossigeno (Huy et al., 2020).

La camera al contempo funge anche da serbatoio per la raccolta della soluzione nutritiva in eccesso che non viene assorbita dall’apparato radicale, anche perché l’umidità relativa è del 100% (Elkazzaz, 2017).

Una variazione di questo sistema può essere realizzata disponendo i pannelli in modo obliquo, a coppie, come a formare una V rovesciata, in modo tale da ottimizzare l’uso della superficie a disposizione. Nel mezzo, tra i due pannelli, ci sono sempre gli ugelli che nebulizzano la soluzione nutritiva e irrorano l’apparato radicale (Barla et al., 2020).

L’irrorazione delle radici con la soluzione nutritiva non avviene in modo continuo, ma solitamente la pompa funziona per qualche secondo a intervalli di pochi minuti in quanto le radici sono esposte

all'aria e si asciugano molto velocemente (Elkazzaz, 2017). Questo tipo di coltivazione è considerato il sistema di coltivazione fuori-suolo che fa il maggiore impiego di tecnologie (Elkazzaz, 2017) e può portare a ridurre il consumo di acqua fino al 98%, l'uso di fertilizzanti del 60% e l'utilizzo di pesticidi del 100% rispetto alla coltivazione convenzionale basata sul suolo (Barla et al., 2020). Il risparmio idrico è favorito da un'efficienza d'uso dell'acqua che si avvicina al 100% in quanto la soluzione nutritiva viene completamente riciclata e inoltre non vi sono perdite dovute all'evaporazione.

L'ottimizzazione delle rese per unità di superficie viene favorita da una densità d'impianto elevata che permette inoltre di ottimizzare l'utilizzo degli input (Barla et al., 2020). Va anche considerato che l'elevato impiego di tecnologia per far funzionare questo sistema lo rende al contempo costoso, sia nella realizzazione che nella gestione (Huy et al., 2020).

## **2.4 VERTICAL FARMING**

L'agricoltura verticale o vertical farming è un modello di coltivazione che non essendo basato sul suolo può svilupparsi in verticale, a differenza dell'agricoltura convenzionale che è obbligata a estendersi in orizzontale (Fussy e Papenbrock, 2022). Questo sistema fa uso dell'idroponica per far crescere le colture su scaffali con diversi ripiani, ottenendo una superficie coltivabile che può essere diverse volte (in base al numero di ripiani) superiore rispetto alla superficie su cui lo scaffale poggia, che è limitata (Tripathi et al., 2022).

L'agricoltura verticale si svolge solitamente in luoghi chiusi come possono essere dei container, edifici, scantinati o magazzini, anche dismessi. Questa flessibilità la rende facilmente posizionabile ad esempio nelle città, o comunque in luoghi dove lo spazio per la coltivazione è limitato garantendo allo stesso tempo una produzione che può essere definita industriale (Casey et al., 2022).

Questi sistemi sono in particolar modo utilizzati per produrre frutta e ortaggi freschi in prossimità del luogo di commercializzazione. Viene così eliminata la catena di trasporto che divide il produttore dal consumatore (Pomoni et al., 2023).

Questo tipo di coltivazione, essendo svolto in ambiente chiuso, utilizza principalmente l'illuminazione artificiale per permettere ai vegetali di fare fotosintesi (Molin e Martin, n.d.).

Tale necessità, nonostante oggi l'illuminazione sia principalmente generata da led, si traduce in un considerevole consumo energetico. Inoltre è fondamentale una adeguata ventilazione, immissione di CO<sub>2</sub> e il mantenimento dei parametri ambientali interni, tutte operazioni che richiedono energia elettrica (Molin e Martin, n.d.).

Tuttavia essendo necessaria l'illuminazione artificiale questa tecnologia ben si adatta ai luoghi dove le ore di luce durante il giorno sono limitate, come ad esempio nelle regioni del Nord Europa (Barrière

et al., 2014). Altri sistemi verticali invece utilizzano l'illuminazione naturale per la coltivazione, anche se questo non rende possibile creare sistemi d'impianto particolarmente fitti (Song et al., 2022). In questi sistemi è meglio coltivare specie che non abbiano bisogno di un'intensità luminosa troppo elevata così da contenere i consumi energetici utilizzando lampade a led che hanno anche il vantaggio di emettere quantità limitate di calore radiante, caratteristica che le rende adatte a essere posizionate in prossimità delle foglie (Barrière et al., 2014). L'elevata richiesta energetica potrebbe rendere questi sistemi meno sostenibili da un punto di vista economico e ambientale rispetto alla coltivazione del suolo. È pertanto fondamentale che l'energia elettrica per alimentare questo sistema derivi da fonti rinnovabili ed economicamente sostenibili (Casey et al., 2022). La produzione in luoghi chiusi oltre a permettere di creare le condizioni ambientali ideali, tiene a distanza insetti ed eventuali agenti patogeni che potrebbero attaccare la coltura in crescita. Permettono così di limitare l'utilizzo di prodotti fitosanitari (Barrière et al., 2014). La coltivazione verticale è ideale per la coltivazione di specie a taglia bassa come ortaggi a foglia quali insalate ed erbe, in modo che lo spazio tra i vari ripiani (che mediamente è 40cm) degli scaffali sia limitato aumentando così la superficie coltivabile. Sempre (Barrière et al., 2014) afferma che per avviare questo tipo di sistema i costi iniziali di realizzazione sono nettamente elevati in confronto anche ad altri sistemi idroponici. I costi potrebbero però essere velocemente coperti dalle rese potenzialmente elevate.

### **3. INPUT PRODUTTIVI E IMPATTI DELLA COLTIVAZIONE TRADIZIONALE E IDROPONICA**

#### **3.1 IL SUOLO**

Ad oggi circa il 98,8% della produzione alimentare a livello mondiale dipende dal suolo (Taghizadeh, 2021), infatti si stima che circa il 38,6% delle terre emerse e libere dal ghiaccio siano utilizzate per attività agricole (Lages Barbosa et al., 2015).

I terreni coltivabili o arabili sono di per sé una risorsa limitata, tuttavia la superficie coltivabile negli ultimi anni è aumentata e ha preso il posto di zone paludose e foreste (Taghizadeh, 2021).

Nonostante le attività antropiche per aumentare la superficie coltivabile, la quantità di terra disponibile pro capite sarà sempre meno in futuro, a causa della crescita demografica e della competizione per l'uso del suolo tra i diversi settori.

Taghizadeh (2021) riporta che nel 1960 con 3 miliardi di abitanti nel mondo, la terra disponibile pro capite era di 0,5 ha/persona, mentre nel 2050 sarà di circa 0,16 ha/persona.

In controtendenza a quanto successo nel resto del mondo in Europa la superficie destinata all'agricoltura è diminuita a partire dal 1950. Una parte è stata utilizzata anche per il rimboschimento, nonostante l'aumento della domanda alimentare e della competizione per l'utilizzo dei terreni, ad esempio per la produzione di bioenergie o per l'urbanizzazione (Taghizadeh, 2021).

Questa inversione di tendenza è stata resa possibile dall'adozione di un'agricoltura di tipo intensivo (Pomoni et al., 2023).

Solo nei decenni successivi ci si è resi conto che i metodi agricoli convenzionali ad alto uso di input sono andati a influenzare la fertilità dei suoli, oltre ad aver comportato gravi rischi per la salute umana e l'ambiente (Chausali e Saxena, 2021).

Alcuni studi prevedono che nonostante in un primo periodo ci sia stato un aumento delle rese, la produttività alimentare globale potrebbe ridursi del 12% entro il 2040 (Taghizadeh, 2021), come conseguenza del degrado, erosione, salinizzazione e contaminazione dei suoli agrari (Chausali e Saxena, 2021). L'agricoltura intensiva negli anni ha modificato le tecniche di coltivazione, oltre che con la meccanizzazione e l'utilizzo di sementi geneticamente selezionate (Lages Barbosa et al., 2015), ha permesso di sfruttare in continuazione il suolo grazie all'apporto di input esterni di sintesi quali fertilizzanti, erbicidi, fungicidi e insetticidi causandone il peggioramento delle proprietà fisiche, chimiche e biologiche (Chausali e Saxena, 2021).

Il suolo di per sé fornisce vari servizi ecosistemici i cui benefici possono essere diretti o indiretti. Contribuisce inoltre al benessere umano offrendo servizi come l'approvvigionamento di cibo (mangimi, fibre e acqua dolce); la regolazione del territorio (attraverso il controllo delle inondazioni, delle malattie e regola il clima); servizi di supporto (alla formazione del suolo, il ciclo dell'acqua e dei nutrienti, produzione di ossigeno atmosferico, e la fornitura di habitat); e servizi socio-culturali (offrendo luoghi a uso ricreativo) (Stavi et al., 2016).

Diversi di questi servizi sono venuti meno con l'intensificazione agricola e sono stati sostituiti da pratiche agronomiche e dall'utilizzo degli input esterni. Ad esempio il riciclaggio dei nutrienti è stato rimpiazzato dall'utilizzo di fertilizzanti, mentre l'aratura ha lo scopo di ossigenare il terreno (Barrière et al., 2014). Anche attività antropiche come la deforestazione e la bonifica delle paludi hanno portato all'eliminazione di servizi ecosistemici fondamentali per la vita.

Le zone umide trattengono l'acqua durante le forti precipitazioni e la rilasciano nei periodi secchi, purificandola da eventuali contaminanti presenti. Le foreste invece proteggono il suolo dall'erosione. In generale comunque la trasformazione degli habitat naturali e degli ecosistemi in terreni agricoli intensifica il ritmo della perdita di biodiversità (Taghizadeh, 2021).

Un altro aspetto negativo che si è verificato con l'avvento dell'agricoltura intensiva è sicuramente la riduzione del contenuto di sostanza organica dei suoli agrari. La sua perdita è associata all'utilizzo di



fertilizzanti sintetici che vanno a intaccare il normale svolgimento delle attività microbiche (Chausali e Saxena, 2021).

La sostanza organica è la risorsa energetica principale della catena alimentare del sottosuolo. Viene degradata e mineralizzata così da fornire gli elementi minerali alle piante (Pamminger et al., 2022).

Le attività agronomiche e la distribuzione di sostanze di sintesi possono creare degli squilibri nella catena alimentare del suolo in quanto vanno a disturbare i predatori. Vengono così interrotti gli alti livelli trofici della catena alimentare.

La conseguenza di tale alterazione è che gli ecosistemi agrari a gestione intensiva sono diventati fortemente dipendenti dalle pratiche compensative (Barrière et al., 2014). Nella coltivazione fuori suolo il terreno perde le funzionalità che gli sono normalmente attribuite nell'agricoltura tradizionale. Secondo (Stavi et al., 2016) tra le varie definizioni delle funzioni del suolo si annovera quella di essere l'ambiente adatto a sostenere la vita delle piante, e di molti organismi e microorganismi.

Nei sistemi idroponici il terreno viene sostituito dalla soluzione nutritiva e l'apporto dei nutrienti all'apparato radicale delle piante in crescita avviene attraverso l'acqua che è il mezzo con cui questi vengono trasportati (Pomoni et al., 2023).

La coltivazione idroponica è definita come un sistema di produzione avanzato che promuove la coltivazione di diverse colture su larga scala e in assenza di suolo. Le rese per unità di superficie sono inoltre significativamente più elevate rispetto alla coltivazione su suolo in quanto si può sviluppare verticalmente su più piani (Pomoni et al., 2023).

L'assenza di terreno permette alle colture di rimanere pulite durante il ciclo di crescita, in quanto non sono a contatto con il terreno. Viene così ridotta la necessità di lavaggio.

Allo stesso tempo questo sistema di coltivazione permette di limitare il rischio di contaminazione dei prodotti alimentari con agenti patogeni eventualmente presenti nel suolo (Pomoni et al., 2023).

La coltivazione idroponica necessita di un'area minore rispetto ai sistemi tradizionali per la produzione vegetale. Tale caratteristica si traduce in un utilizzo più efficiente del suolo che come detto in precedenza è una risorsa limitata e fragile (Lages Barbosa et al., 2015).

Sulla base di quanto detto i sistemi di coltivazione idroponici risultano essere indipendenti dalla fertilità e dalle malattie trasmesse dal suolo (Michelon et al., 2020), che essendo un substrato naturale è eterogeneo e tende a degradarsi (Savvas e Gruda, 2018).

Le funzioni del suolo nei sistemi idroponici come già detto sono sostituite dall'acqua che deve essere messa in circolo nel sistema per poter arrivare alle radici delle piante in crescita. Per queste operazioni vengono utilizzate diverse pompe e apparecchiature che per il loro funzionamento necessitano di energia elettrica.

L'elettricità diventa allora il prezzo da pagare per poter rimpiazzare le funzioni dell'ecosistema del suolo, come il riciclaggio dell'acqua e dei nutrienti (Barla et al., 2020).

L'utilizzo di energia elettrica è tuttavia direttamente associato all'emissione di CO<sub>2</sub> (Barla et al., 2020).

Va poi considerato che la coltivazione fuori-suolo avviene praticamente sempre all'interno di strutture protette, come serre, capannoni o edifici, che per la loro costruzione richiedono la disponibilità di ampie superfici comportando impatti ambientali che non possono essere trascurati (Fussy e Papenbrock, 2022). Tuttavia queste infrastrutture possono essere realizzate anche su terreni non fertili o comunque non adatti alla crescita di determinate specie (Lages Barbosa et al., 2015).

Nonostante questi punti a sfavore per via dei diversi motivi visti fino a ora la coltivazione idroponica viene associata a una riduzione nell'utilizzo di fertilizzanti e prodotti fitosanitari. Di conseguenza vengono ridotte anche le emissioni di inquinanti nell'ambiente e la contaminazione di suolo e acqua che ne deriva (Lages Barbosa et al., 2015). Inoltre i sistemi idroponici permettono di ottenere rese elevate, ciò significa che con molta meno terra si possono produrre grandi quantità di alimenti (Casey et al., 2022). In alcuni casi studio è stato dimostrato che con i sistemi idroponici si può ottenere la medesima quantità di produzione utilizzando solo 1/5 della superficie rispetto alla coltivazione convenzionale basata sul suolo, in quanto, permettono di aumentare sensibilmente la densità d'impianto (Fussy e Papenbrock, 2022).

Produrre di più con meno superficie vorrebbe dire che terreni agrari possono essere risparmiati dalla coltivazione e potrebbero essere utilizzati per altri scopi, come lo stoccaggio di CO<sub>2</sub>, la silvicoltura o la produzione di bioenergie (Tabaglio et al., 2020).

Va comunque ricordato che i sistemi idroponici sono utilizzati soprattutto per la coltivazione di colture orticole e frutticole che attualmente occupano una superficie limitata a livello globale rispetto ad altre colture come possono essere quelle cerealicole.

A questo punto l'adozione della coltivazione idroponica potrebbe comportare un risparmio di terra limitato (Casey et al., 2022).

## **3.2 L'ACQUA**

Ad oggi molti paesi la cui popolazione è numerosa e in continua crescita non hanno accesso all'acqua pulita e tantomeno a quella potabile per scopi igienico-sanitari, come riportato dalle Nazioni Unite. E in futuro la situazione non è prevista migliorare, anzi, secondo l'ONU entro il 2025 il 40% della popolazione mondiale vivrà in regioni dove l'approvvigionamento idrico sarà carente (Pomoni et al., 2023).

L'aumento della popolazione e lo spostamento nelle città ha fatto sì che le riserve di acqua dolce siano state eccessivamente sfruttate con conseguente riduzione nella disponibilità. Allo stesso tempo sono stati generati enormi volumi di acque reflue (Pomoni et al., 2023). Il risultato è che oggi oltre 2 miliardi di persone in 43 paesi vivono in condizioni di elevata carenza idrica (Casey et al., 2022).

Inoltre è noto come diversi paesi asiatici, centroamericani, africani e mediterranei si stiano avvicinando alla scarsità idrica o stiano già vivendo in condizioni di stress idrico (Casey et al., 2022).

Nelle classifiche il settore agricolo è considerato il principale utilizzatore di acqua, seguito dal settore industriale che si trova al secondo posto, mentre al terzo posto si trova l'uso domestico e ricreativo.

Il settore primario utilizza il 70% dei 184 km<sup>3</sup> di acqua dolce che vengono prelevati ogni anno e la impiega principalmente per l'irrigazione (Casey et al., 2022), pratica agronomica che risulta essere fondamentale per ottenere una buona produzione in termini di resa e qualità.

Le statistiche riportano che tra il 30% e il 40% del cibo prodotto a livello mondiale proviene da aree irrigate che rappresentano solo il 17% della superficie globale destinata all'agricoltura (Pomoni et al., 2023). I terreni che dispongono di irrigazione sono previsti aumentare in futuro, dovrebbero difatti raggiungere i 337 milioni di ettari nel 2050 rispetto ai circa 325 milioni di ettari del 2013 (Taghizadeh, 2021).

Le risorse idriche a livello mondiale, così come nella regione mediterranea sono distribuite in modo irregolare nel tempo e nello spazio. Nella regione del Mediterraneo in particolare si prevede che il cambiamento climatico avrà un forte impatto sulla già limitata disponibilità idrica, soprattutto nei periodi siccitosi (Massa et al., 2020).

Un peggioramento nella disponibilità idrica in questa regione significherebbe mettere a rischio circa l'11% delle coltivazioni attuali (Casey et al., 2022).

Per questo motivo l'ottimizzazione nell'uso dell'acqua di irrigazione è fondamentale per poter rendere l'agricoltura virtuosa nel futuro. L'acqua che viene utilizzata deve pertanto essere utilizzata al massimo delle sue possibilità, cercando di evitare qualsiasi spreco (Massa et al., 2020). Ad esempio nella coltivazione basata sul suolo una parte dell'acqua di irrigazione viene persa per percolazione profonda negli strati del suolo dove non è presente l'apparato radicale, mentre un'altra quota viene persa per evaporazione (Sharma et al., 2018).

La quantità di acqua che non viene assorbita dalle piante e che quindi viene persa dipende dalle tecniche adottate per l'irrigazione.

Nell'agricoltura tradizionale l'efficienza di utilizzo dell'acqua di irrigazione varia dal 50% all'80%, a seconda della tecnica di irrigazione usata, e cioè per infiltrazione laterale (scorrimento) oppure a pioggia rispettivamente.

L'irrigazione a goccia con manichetta invece può permettere di raggiungere un'efficienza del 90%. Ciò significa che se con l'irrigazione vengono apportati 10L d'acqua 9L vengono assorbiti dalle piante (Massa et al., 2020). Gli stessi autori riportano che la coltivazione idroponica potrebbe essere una buona soluzione per avvicinarsi a raggiungere un'efficienza teorica nell'utilizzo dell'acqua del 100%.

I risultati di diversi studi, condotti da (Casey et al., 2022) dimostrano come i sistemi idroponici abbiano un fabbisogno idrico diretto inferiore rispetto alla coltivazione su suolo a parità di produzione. Sharma et al. (2018) invece riporta che è possibile coltivare efficacemente verdure di alto valore e di buona qualità con sistemi idroponici utilizzando tra il 70% e il 90% di acqua in meno, a seconda della tecnologia adottata, rispetto alla produzione tradizionale basata sul suolo.

Secondo (Lages Barbosa et al., 2015) invece il consumo di acqua nelle coltivazioni idroponiche è sette volte inferiore rispetto alle colture coltivate su suolo in serra, mentre è quattro volte inferiore rispetto alla coltivazione in pieno campo. Nonostante ne servano quantità inferiori l'acqua è comunque uno degli elementi principali necessari affinché le colture possano essere coltivate in idroponica (Elkazzaz, 2017).

In particolar modo per poter realizzare la coltivazione con un sistema idroponico è fondamentale avere a disposizione acqua fresca, pulita e di qualità (Pomoni et al., 2023). Queste necessità nascono in quanto come visto nel capitolo 3.1 l'acqua sostituisce il suolo come mezzo per sostenere la crescita delle piante. L'acqua nel sistema idroponico non viene sprecata. Questo è vero in particolare per i sistemi chiusi dove dopo ogni ciclo di irrigazione la soluzione nutritiva in eccesso viene recuperata, filtrata, rifornita degli elementi nutritivi necessari e reimpressa in circolazione (Sharma et al., 2018). Anche la soluzione nutritiva di scarto dei sistemi aperti può essere riutilizzata, ad esempio per l'irrigazione di altre coltivazioni idroponiche o anche in campo aperto (Sharma et al., 2018).

Tuttavia (Lages Barbosa et al., 2015) specifica che il volume d'acqua assorbito da una singola pianta durante il ciclo di crescita non varia a seconda che questa sia stata coltivata in sistemi idroponici o tradizionali, e nel caso in cui ci sia una differenza questa è minima. Ciò che fa la differenza tra le due tecniche di coltivazione è l'efficienza con cui l'acqua di irrigazione viene utilizzata.

Nella coltivazione idroponica la maggior parte dell'acqua che viene apportata alla coltura in crescita viene assorbita e va a determinare evapotraspirazione (Lages Barbosa et al., 2015), a differenza di quanto visto prima per la coltivazione tradizionale.

Questa caratteristica prende il nome di "produttività dell'acqua" (WP). È determinata dal rapporto tra la resa per unità di superficie ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) e il consumo di acqua cumulato durante l'intero ciclo di crescita per l'unità di superficie ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ ). L'unità di misura per la WP risulta in  $[\text{kg prodotto}/\text{m}^3 \text{ di acqua}]$  (Wang et al., 2023).

Maggiore è la resa delle colture per unità di acqua apportata e maggiore è la WP. Solitamente i sistemi di coltivazione fuori suolo hanno una WP maggiore rispetto alla coltivazione tradizionale (Wang et al., 2023).

Queste caratteristiche rendono i sistemi idroponici adatti a ridurre la pressione sulle risorse idriche nelle regioni aride o semi-aride, dove la disponibilità idrica è limitata. Potrebbero comunque rendersi utili anche nell'ottica di ridurre il consumo d'acqua in generale, associato alla produzione vegetale (Taghizadeh, 2021). Tuttavia solo una piccola parte dell'acqua prelevata dall'agricoltura viene impiegata per la produzione orticola (Tabaglio et al., 2020), anche se queste colture sono fortemente dipendenti dalla disponibilità di acqua per l'irrigazione (Casey et al., 2022).

### **3.3 LA NUTRIZIONE VEGETALE NELLA COLTIVAZIONE TRADIZIONALE E IDROPONICA**

#### **3.3.1 LA FERTILIZZAZIONE NELLA COLTIVAZIONE TRADIZIONALE**

Il terreno adatto alla coltivazione è fertile in quanto ricco di elementi nutritivi necessari allo sviluppo delle specie vegetali. Tuttavia non sempre gli elementi si trovano nella forma che le piante sono in grado di assimilare. In questo caso entrano in gioco i vari microorganismi che vivono nel suolo e che entrando in simbiosi con il vegetale gli possono fornire elementi nella forma desiderata, mentre il vegetale fornisce ai microorganismi i fotosintati.

Nella coltivazione tradizionale i residui colturali che restano in campo vengono attaccati e degradati dagli insetti terricoli e dai microorganismi come funghi e batteri. La decomposizione della sostanza organica è un parametro funzionale chiave per la catena alimentare del suolo e indica la capacità del suolo di riciclare e migliorare la biodisponibilità dei nutrienti per supportare servizi ecosistemici come la produzione di biomassa (Elkazzaz, 2017). Nella coltivazione del suolo i tre macro elementi, ovvero che sono assorbiti in quantità maggiori rispetto agli altri, sono N (azoto), P (fosforo) e K (potassio). Di tutti gli altri microelementi difficilmente si evidenziano carenze, mentre per questi tre spesso si manifestano carenze.

L'azoto è il macro elemento che stimola la risposta produttiva più marcata fra i tre e che viene assorbito in quantità maggiori. Prendendo come esempio il suo ciclo questo elemento può essere già presente nel terreno, derivare dalla mineralizzazione della sostanza organica, essere fornito con i fertilizzanti, derivare da fissazione simbiotica oppure da fissazione atmosferica. Nella coltivazione tradizionale per migliorare la fertilità chimica e biologica del suolo in modo tale da massimizzare la resa vengono apportati input esterni che possono essere:

- concimi, sono prodotti la cui funzione principale è fornire elementi nutritivi alle piante, sono pertanto di origine minerale;
- ammendanti sono i materiali da aggiungere al suolo in situ, principalmente per conservarne o migliorarne le caratteristiche fisiche e/o chimiche e/o l'attività biologica;
- correttivi, sono i materiali da aggiungere al suolo in situ principalmente per modificare e migliorare proprietà chimiche anomale;

I fertilizzanti organici sono materiali organici di varia natura e provenienza impiegati allo scopo di apportare sostanza organica al suolo e migliorarne fertilità fisica, chimica e biologica. In base all'origine sono classificabili in matrici di origine animale, vegetale o mista.

La concimazione può essere definita di fondo se effettuata prima della preparazione del letto di semina o di copertura se effettuata con coltura in atto.

Nella coltivazione su suolo si può applicare anche la fertirrigazione. Tale pratica è possibile se la coltura è irrigata con ala gocciolante, in quanto è l'unica tecnologia di irrigazione che lo permette.

Con la fertirrigazione gli elementi nutritivi sono disciolti in acqua e distribuiti con questa. L'efficienza di utilizzazione è pertanto elevata in quanto difficilmente ci sono perdite per dilavamento.

### **3.3.2 LA SOLUZIONE NUTRITIVA IN IDROPONICA**

Nella coltivazione idroponica tutti i processi di ricircolo dei nutrienti che avvengono nel suolo non sono possibili. Di conseguenza anche le varie fonti di azoto che sono disponibili per una coltura coltivata su suolo come visto nel capitolo 3.3.1 non sono disponibili per una coltura coltivata con sistema idroponico. Prendendo sempre come esempio l'azoto questo deve essere distribuito nella sua forma nitrica affinché i vegetali coltivati in idroponica possano utilizzarlo (Elkazzaz, 2017).

Nel caso della coltivazione idroponica i nutrienti essenziali vengono forniti alle piante sotto forma di soluzione nutritiva, che consiste in una soluzione di acqua e sali fertilizzanti disciolti (Kumari et al., 2018). La concimazione con fertilizzanti minerali è pertanto l'unica strada percorribile.

La fertilizzazione avviene sotto forma di fertirrigazione. Per questa ragione l'efficienza di utilizzo dei nutrienti nel sistema idroponico è molto maggiore rispetto all'agricoltura tradizionale (Sharma et al., 2023). Il successo o il fallimento di una coltivazione idroponica dipende dal fatto che la soluzione nutriente distribuita sia equilibrata e appropriata alla fase di crescita di una determinata coltura. La soluzione deve inoltre contenere tutti e tredici gli elementi nutritivi necessari alla crescita e sviluppo dei vegetali (Elkazzaz, 2017).

Quando si gestiscono sistemi idroponici bisogna tenere in considerazione che l'acqua proveniente dalle falde, dalle dighe o dai fiumi può contenere impurità tra cui solidi disciolti e agenti patogeni che possono influenzare le condizioni di crescita delle piante e di conseguenza la resa (Barrière et al., 2014).

Mentre alcuni di questi elementi possono essere utili alle colture coltivate, altri devono essere minimizzati o addirittura eliminati (Sharma et al., 2018).

In particolar modo nelle regioni dell'Europa meridionale, i sistemi chiusi sono soggetti alla progressiva salinizzazione della soluzione nutritiva ricircolante, a causa dell'utilizzo di acqua salata che è spesso disponibile nelle zone costiere del mediterraneo e alla progressiva concentrazione dei sali fertilizzanti (Gonnella e Renna, n.d.). Tuttavia Wang et al. (2023) riportano come i sistemi di coltivazione fuori-suolo rispetto a quelli del suolo potrebbero risentire meno, in termini di resa, dell'utilizzo di acqua contenente elevate concentrazioni di sale durante il ciclo produttivo.

La qualità dell'acqua influenza il numero di cicli di irrigazione che la soluzione nutritiva può svolgere prima di dover essere sostituita in un sistema chiuso (Massa et al., 2020). La gestione e relativo controllo dei parametri della soluzione nutritiva è fondamentale per il successo o il fallimento di una coltivazione idroponica.

In particolare, di fondamentale importanza sono i parametri di pH, temperatura e conducibilità elettrica (EC) che devono essere adatti alla specie coltivata e allo stadio fenologico in cui questa si trova per assicurare il massimo assorbimento di nutrienti (Kumari et al., 2018).

La temperatura della soluzione influenza la velocità del ciclo di coltivazione (Elkazzaz, 2017). Per questo motivo negli anni sono state create soluzioni nutritive la cui composizione soddisfa quanto più possibile le esigenze nutrizionali di ogni specie e cultivar coltivata (Savvas, 2002).

La composizione della soluzione nutritiva deve inoltre tenere in considerazione delle caratteristiche dell'acqua utilizzata per la sua preparazione e adattarsi di conseguenza (Savvas e Gruda, 2018).

Nonostante nei sistemi idroponici venga eliminato il suolo vi è comunque il rischio che agenti patogeni si sviluppino nel sistema. In particolar modo nei sistemi chiusi l'eventuale diffusione dei patogeni a tutta la coltivazione potrebbe rapidamente avvenire attraverso il ricircolo della soluzione nutriente (Elkazzaz, 2017).

Per questo motivo nonostante la coltivazione idroponica possa contribuire a ridurre l'uso di prodotti fitosanitari deve comunque ricorrere a tecniche per sanificare la soluzione nutritiva prima del suo riutilizzo cercando di evitare il propagarsi di eventuali agenti patogeni (Savvas e Gruda, 2018).

Tra le principali tecniche chimiche, meccaniche e fisiche oggi utilizzate ci sono i raggi ultravioletti (UV), la filtrazione a sabbia o a membrana, l'elettrolisi dell'acqua, il perossido di idrogeno e la clorazione (Elkazzaz, 2017; Savvas e Gruda, 2018).

Tra queste la disinfezione chimica risulta essere il metodo più economico per sanificare la soluzione nei sistemi DFT e NFT, dove ci sono grandi volumi che devono essere trattati (Savvas, 2002). In altri sistemi che invece utilizzano minori quantità d'acqua come l'aeroponica è più facile trattare la soluzione. Ad esempio, in uno studio condotto con un sistema aeroponico (Barla et al., 2020), la soluzione nutritiva veniva igienizzata quotidianamente con perossido di idrogeno.

Nei sistemi idroponici l'irrigazione avviene principalmente direttamente sull'apparato radicale, di conseguenza la parte aerea della pianta risulta essere sempre asciutta. Questo rende difficile il verificarsi di attacchi fungini che sono invece favoriti dall'ambiente umido (Savvas e Gruda, 2018).

### **3.4 L'ENERGIA**

Come riportato da Pomoni et al. (2023) il 30% dell'energia prodotta da combustibili fossili a livello globale viene utilizzata dalle catene di approvvigionamento alimentare che di conseguenza contribuiscono con una quota compresa tra il 19% e il 29% alle emissioni annuali totali di CO<sub>2</sub>.

La CO<sub>2</sub> rientra tra i cosiddetti gas a effetto serra, identificati come i responsabili dei cambiamenti climatici e principalmente del riscaldamento globale oltre che dell'inquinamento di acqua, suolo e aria. Gli stessi autori riportano anche che l'agricoltura è responsabile con una quota compresa tra il 50 e il 60 % delle emissioni antropogeniche globali di N<sub>2</sub>O (protossido di azoto) e CH<sub>4</sub> (metano). Tali sostanze sono emesse rispettivamente principalmente dal suolo in seguito alle lavorazioni e dagli allevamenti intensivi, in particolare da animali ruminanti.

Per ridurre l'impatto che il settore primario ha sull'ambiente può essere utile anche una gestione adeguata dei consumi energetici, cercando di ridurli e migliorandone l'efficienza di utilizzazione.

Questi passaggi sono fondamentali anche nell'ottica di garantire uno sviluppo sostenibile come previsto dall'obiettivo dodicesimo dell'agenda 2030.

Nella coltivazione tradizionale basata sul suolo la principale fonte di energia deriva da combustibili fossili. In particolar modo è il diesel a farla da padrone in quanto è il tipo di combustibile più comunemente utilizzato per l'alimentazione di trattori agricoli o qualsiasi altra macchina operatrice a motore endotermico (Song et al., 2022). Nella coltivazione idroponica, invece, la forma di energia maggiormente utilizzata è la corrente elettrica che serve prima di tutto per il funzionamento delle pompe che si occupano del ricircolo della soluzione nutritiva (Song et al., 2022).

In secondo luogo dal momento che la coltivazione idroponica si svolge solitamente in ambiente controllato l'elettricità è fondamentale per il funzionamento della maggior parte delle apparecchiature necessarie alla creazione e mantenimento del microclima adatto alla coltivazione (Lages Barbosa et al., 2015).



I sistemi principalmente utilizzati per il controllo ambientale riguardano riscaldamento e raffreddamento, ventilazione e nebulizzazione, l'azionamento di meccanismi di ombreggiatura, l'illuminazione artificiale e anche sistemi per l'arricchimento di CO<sub>2</sub> (Fussy e Papenbrock, 2022).

La coltivazione idroponica ha anche la necessità di infrastrutture e attrezzature (come serre, strutture per sostenere le coltivazioni, canali per l'NFT, vasche per il DFT) la cui realizzazione, mantenimento e smantellamento a fine vita sono indissolubilmente legate a consumi energetici (Fussy e Papenbrock, 2022). Questo dispendio energetico non è invece necessario per coltivare in modo tradizionale in campo aperto in quanto non sono necessarie infrastrutture particolari. Vengono comunque utilizzate attrezzature che invece non sono necessarie in idroponica (mezzi pesanti). Nella coltivazione su suolo l'energia è necessaria solo per le attività di lavorazione del terreno, protezione delle colture e irrigazione (Fussy e Papenbrock, 2022).

Va anche considerato che le strutture per la coltivazione fuori-suolo sono concepite per avere una durata di almeno dieci anni, caratteristica che permette di ridistribuire in un lasso di tempo abbastanza elevato gli input energetici necessari per la loro costruzione.

Se inoltre il consumo energetico necessario alla realizzazione delle infrastrutture viene rapportato alla produzione ottenibile nel decennio il valore che si ottiene risulta essere molto basso (Huy et al., 2020). Diversi studi riportano che i sistemi idroponici in ambiente controllato sono più efficienti per quanto riguarda l'utilizzo delle risorse come acqua, suolo e nutrienti rispetto alla coltivazione tradizionale. Gli stessi però concordano anche sul fatto che il consumo energetico è un punto potenzialmente critico per questo tipo di coltivazione e che deve essere approfondito in modo tale da avere un'idea chiara dell'impatto ambientale che tali sistemi possono avere (Casey et al., 2022).

Anche perché come riporta (Fussy e Papenbrock, 2022) affinché l'adozione di queste tecnologie di coltivazione possa avere un senso, il consumo energetico per unità di prodotto deve essere inferiore rispetto a quello della coltivazione tradizionale.

Questo come conseguenza del fatto che il consumo di energia è direttamente associato all'emissione di gas a effetto serra (Tripathi et al., 2022), dal momento che la generazione della corrente elettrica è oggi ancora fortemente dipendente dai combustibili fossili (Fussy e Papenbrock, 2022).

I risultati di uno studio effettuato da (Lages Barbosa et al., 2015) sulla coltivazione della lattuga in Arizona hanno dimostrato che la coltivazione idroponica ha richiesto 82 volte più energia per chilogrammo prodotto rispetto alla coltivazione convenzionale.

Va comunque specificato che in questo caso il consumo energetico più importante è stato determinato dal sistema di riscaldamento/raffreddamento dell'ambiente serra, seguito dall'illuminazione artificiale. Le pompe che mettevano in circolo la soluzione nutritiva hanno determinato la voce di consumo energetico minore.

(Pomoni et al., 2023) riporta che nelle zone dell'Europa settentrionale la richiesta energetica per il riscaldamento delle serre potrebbe rappresentare il 65-85% dell'energia totale richiesta per il loro funzionamento. In studi condotti nelle regioni più calde del mediterraneo invece la voce più importante per quanto riguarda il consumo energetico è data dal sistema di raffreddamento (Pomoni et al., 2023). Queste diverse necessità potrebbero spiegare il perché diversi studi riportano valori ampiamente discordanti per quanto riguarda il fabbisogno energetico necessario al funzionamento del sistema idroponico.

Ad esempio Song et al. (2022) riporta che l'agricoltura idroponica indoor ha un fabbisogno energetico 35 volte superiore rispetto all'agricoltura del suolo, mentre Pomoni et al. (2023) riporta che la coltivazione idroponica presenta un fabbisogno energetico in MJ/kg cinque volte superiore rispetto alla coltivazione tradizionale. Nei due casi appena citati il riscaldamento o raffreddamento è l'onere energetico più elevato per il funzionamento della serra. Si può pertanto dedurre che l'area geografica in cui viene condotta la coltivazione, la stagione e il suo clima influenzano direttamente il consumo energetico.

In particolar modo tanto più la temperatura esterna all'ambiente di coltivazione sarà simile alla temperatura ottimale per la crescita della coltura tanto meno energia sarà richiesta per creare le condizioni ambientali ideali all'interno della serra o dell'edificio.

(Lages Barbosa et al., 2015) sono arrivati alla conclusione che le serre situate in climi più miti (cioè climi più vicini alla temperatura ottimale di riferimento della serra) avranno una minore richiesta energetica.

In alcune aree geografiche infatti, i sistemi di riscaldamento e raffreddamento non sono necessari per la coltivazione di determinate colture e vengono sostituiti da un sistema di ventilazione passiva, riducendo così il fabbisogno energetico complessivo.

Anche il grado di automazione della serra influenza il consumo energetico. Pomoni et al. (2023), si trova in accordo con altri studi nell'affermare che esiste una differenza significativa tra i consumi di una coltivazione condotta in ambiente strettamente controllato e quelli di una coltivazione condotta in una struttura il cui controllo climatico è minimo.

In particolare le strutture che dispongono delle tecnologie per regolare le condizioni ambientali presentano un fabbisogno energetico tra le 8 e le 12 volte maggiore rispetto alle altre (Pomoni et al., 2023).

Sulla base di quanto finora riportato è chiaro che il consumo energetico delle coltivazioni fuori suolo non è più di tanto influenzato dal tipo di sistema adottato (DFT, NFT o aeroponica) ma ciò che fa la differenza è la latitudine e le conseguenti condizioni climatiche esterne in cui questo si trova a

operare. E anche il grado di controllo ambientale che il sistema è in grado di operare nell'ambiente interno di coltivazione influenza il fabbisogno energetico.

Va inoltre evidenziato che i consumi energetici delle coltivazioni indoor verticali risultano essere particolarmente elevati se confrontati con sistemi idroponici a singolo piano (Molin e Martin, n.d.). Tale evidenza è data dal fatto che sono totalmente dipendenti dall'illuminazione artificiale necessaria affinché tutte le piante in crescita sui ripiani degli scaffali che sono stretti e profondi vengano colpite dalla radiazione luminosa.

Ne caso in cui l'illuminazione artificiale non venisse utilizzata difficilmente le piante che si trovano nel mezzo del ripiano verrebbero raggiunte dalla radiazione solare in modo uniforme, se non con l'ipotetica costruzione di un sistema di specchi (Molin e Martin, n.d.).

Tuttavia sostituire la radiazione solare che è di per sé una risorsa rinnovabile con l'illuminazione artificiale per quanto alimentata da fonti energetiche rinnovabili può sembrare un controsenso (Molin e Martin, n.d.). Sempre Molin e Martin, n.d. affermano che, quando nella coltivazione in ambiente protetto viene rimossa la radiazione solare, l'aumento dei costi di produzione in relazione al consumo energetico è significativo.

L'illuminazione artificiale presenta comunque i suoi vantaggi dal momento che permette di massimizzare la resa delle colture. Inoltre la produzione viene mantenuta costante durante tutto l'anno grazie al fotoperiodo che ha una durata maggiore rispetto a quello offerto dalla radiazione solare. Di conseguenza anche la durata del ciclo di crescita viene ridotta (Lages Barbosa et al., 2015).

In certe situazioni invece l'illuminazione artificiale è necessaria per la crescita delle colture anche in serre ferro-vetro o ferro-nylon, che sono ampiamente illuminate dalla luce solare. È il caso delle regioni del nord Europa dove le ore in cui è disponibile la radiazione solare sono limitate (Taghizadeh, 2021).

Dal momento che l'elettricità è fondamentale per il funzionamento dei sistemi di coltivazione idroponici, vanno assolutamente evitati guasti che possano causare lo spegnimento delle pompe che mettono in circolo la soluzione nutritiva perché significherebbe causare dei danni irreversibili alla coltura in crescita. Sono pertanto indispensabili sistemi di back-up nelle coltivazioni idroponiche, tra cui un generatore di energia elettrica, in modo tale da evitare perdite importanti (Barla et al., 2020).

## **3.5 SOSTENIBILITA AMBIENTALE SOCIALE ECONOMICA DEI SISTEMI IDROPONICI**

### **3.5.1 SOSTENIBILITA AMBIENTALE**

Sulla base delle caratteristiche dei sistemi idroponici analizzate fino ad ora si può dire che questi presentano diversi vantaggi rispetto alla coltivazione tradizionale come riportato da Massa et al., (2020). Permettono di risparmiare elevate quantità di acqua che viene utilizzata con maggiore efficienza. Permettono di ridurre l'impiego di prodotti fitosanitari tra cui insetticidi, acaricidi, fungicidi dal momento che diverse malattie sono eliminate con l'eliminazione del suolo, inoltre essendo l'ambiente di coltivazione protetto diversi insetti sono esclusi. Anche il terreno viene utilizzato in modo molto efficiente in quanto la densità d'impianto può essere elevata e più cicli di coltivazione possono essere svolti rispetto alla coltivazione in campo.

I diversi input vengono generalmente utilizzati con un'elevata efficienza, a partire dai fertilizzanti che sono distribuiti con la soluzione nutritiva e non vengono persi per dilavamento.

La possibilità di monitorare con precisione il flusso di acqua e nutrienti in questi sistemi di coltivazione è un fattore chiave per limitare l'emissione di sostanze inquinanti nell'ambiente.

Il fatto di ridurre le emissioni non è solo sinonimo di minore impatto ambientale, ma significa anche andare a ridurre l'utilizzo di risorse limitate, in particolar modo di acqua ed elementi minerali (Massa et al., 2020).

Tuttavia da quanto riportato nel capitolo 3.4 è evidente che il fabbisogno energetico dei sistemi idroponici sia un punto critico che andrebbe analizzato prima di poter affermare che questi sono più sostenibili a livello ambientale rispetto alla coltivazione tradizionale. Sarebbe infatti opportuno che tali sistemi di coltivazione soddisfacessero anche l'obiettivo numero dodici dell'Agenda 2030 che prevede di garantire modelli di sviluppo sostenibili.

In ogni caso queste tecnologie possono sicuramente aiutare a soddisfare l'obiettivo numero due dell'Agenda 2030 dell'ONU in quanto si possono ottenere rese elevate anche senza avere a disposizione terreni fertili né il clima adatto alla crescita di una determinata coltura.

Va comunque precisato che quanto detto vale principalmente per ortaggi freschi e frutta. Da un punto di vista più generale l'energia elettrica è la spina dorsale del mondo moderno, e alla sua generazione sono attribuiti diversi impatti negativi come il cambiamento climatico, l'acidificazione del suolo, l'eutrofizzazione delle acque e la liberazione di smog fotochimico, come conseguenza dell'emissione di CO<sub>2</sub> (Hassanien et al., 2016).

Uno studio condotto da (Casey et al., 2022) ha dimostrato come la lattuga coltivata con sistemi idroponici alimentati dalla corrente elettrica di rete possa essere molto meno sostenibile, dal punto di vista ambientale, rispetto alla coltivazione della stessa sul suolo.

Questo studio si è concentrato nel confrontare le emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte dalla coltivazione di lattuga con sistemi idroponici in ambiente controllato, in diverse località con climi diversi e che venivano alimentati con elettricità proveniente da differenti fonti, rinnovabili e non.

Hanno ipotizzato che l'alimentazione derivasse da energia completamente rinnovabile solare o eolica senza allacciamento alla rete elettrica, eolica fornita dalla rete elettrica nazionale, oppure che fosse fornita da reti elettriche di diversi paesi che erano Gran Bretagna, sud Africa e Norvegia.

In questo modo hanno potuto valutare l'impronta ecologica associata alla produzione agricola locale alimentata da differenti fonti energetiche che possono essere più o meno pulite.

La coltivazione era verticale a più piani e si sviluppava all'interno di un container di 28 m<sup>2</sup>. L'ambiente interno era controllato da un sistema in grado di mantenere costante temperatura, umidità e qualità dell'aria. L'illuminazione era completamente artificiale, ottenuta da luci led.

I risultati delle emissioni di CO<sub>2</sub>.eq per kg di lattuga prodotta dai sistemi in base alla fonte energetica sono stati i seguenti:

- 1.33 kg CO<sub>2</sub>.eq / kg lattuga per l'alimentazione con energia solare
- 0.56 kg CO<sub>2</sub>.eq / kg lattuga per l'alimentazione con energia eolica
- 0.48 kg CO<sub>2</sub>.eq / kg lattuga per l'alimentazione con energia di rete eolica
- 0.89 kg CO<sub>2</sub>.eq / kg lattuga per l'alimentazione con energia di rete della Norvegia
- 8.9 kg CO<sub>2</sub>.eq / kg lattuga per l'alimentazione con energia di rete della Gran Bretagna
- 17.8 kg CO<sub>2</sub>.eq / kg lattuga per l'alimentazione con energia della rete del Sud Africa

Come si può notare dai risultati ottenuti da (Casey et al., 2022) non è il sistema di coltivazione idroponico in sé ad essere insostenibile in quanto richiede energia elettrica per il suo funzionamento, ma è il come questa energia viene generata.

La rete elettrica norvegese viene alimentata principalmente da energia idroelettrica ed eolica, mentre quelle di Gran Bretagna e sud Africa sono alimentate da diverse fonti come gas naturale, rinnovabile e nucleare.

In particolare in Africa la generazione elettrica è ancora dominata dal carbone, difatti è la più impattante in termini di CO<sub>2</sub> equivalente emessa per kg di lattuga prodotta.

Un altro studio condotto da (Barla et al., 2020) invece ha portato alla conclusione che la CO<sub>2</sub> eq. per kg di lattuga prodotta tramite un sistema di aeroponica è superiore rispetto alle corrispondenti emissioni riportate da altri studi sulla coltivazione della lattuga basata sul suolo.

Questo studio ha inoltre sottolineato che le emissioni prodotte dall'aeroponica sono paragonabili o addirittura inferiori a quelle generate da altri sistemi idroponici che però richiedono il ricircolo della soluzione nutritiva e che utilizzano apparecchiature che funzionano con l'energia elettrica.

L'idroponica rimane comunque un approccio promettente per ridurre le emissioni di gas serra, poiché le coltivazioni assorbono il carbonio dall'aria senza interferire con il suolo.

Pomoni et al. (2023) invece riporta che la coltivazione idroponica permette di ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> in tre modi:

- 1) le colture vengono coltivate in strutture chiuse;
- 2) più prodotti agricoli vengono coltivati e consumati nello stesso luogo riducendo così le esigenze di trasporto
- 3) il riciclo del carbonio è coinvolto (questo argomento è ancora in fase di ricerca)

Negli ultimi decenni, l'energia solare ha visto un notevole sviluppo, grazie sia ai miglioramenti tecnologici che alle politiche governative a sostegno dello sviluppo e dell'utilizzo di energia rinnovabile (Hassanien et al., 2016). Molin e Martin, n.d. hanno studiato l'impatto di diverse fonti energetiche rinnovabili e non per il funzionamento di un sistema idroponico. Come ci si aspettava è emerso che la fonte di energia elettrica influenza la sostenibilità della coltivazione idroponica. In particolare alimentare il sistema idroponico con il 100% di elettricità generata da fonti rinnovabili permette di ridurre al minimo le emissioni di CO<sub>2</sub> eq./ kg di prodotto.

Tuttavia (Casey et al., 2022) riporta che la produzione di elettricità con il fotovoltaico genera comunque un'impronta ambientale intermedia a causa delle emissioni relativamente elevate associate all'installazione di sistemi su piccola scala.

La costruzione dei pannelli fotovoltaici inoltre implica una domanda relativamente elevata di risorse naturali. Questo si traduce in un'elevata necessità di risorse scarse tra cui anche acqua in relazione ai kWh generati.

Particolare attenzione va quindi prestata agli impatti secondari che la produzione di energia rinnovabile può avere sull'ambiente circostante, in modo tale da limitare la pressione esercitata sulle risorse idriche. Ad esempio le dighe costruite per la produzione di energia idroelettrica potrebbero causare problemi di scarsità idrica a valle.

Anche perché a questo punto sarebbe poco sensato utilizzare sistemi idroponici per arginare gli effetti della carenza idrica (Casey et al., 2022).

I pannelli fotovoltaici possono essere un'opzione valida per alimentare i sistemi idroponici nel sud Europa o nelle regioni desertiche del nord Africa per esempio. Richiedono comunque grandi spazi nel momento in cui vengono installati a terra oltre a presentare un elevato costo iniziale. Tuttavia potrebbero anche essere posizionati sui tetti delle strutture che ospitano le colture nel caso di coltivazioni indoor. Oppure, come nel caso dell'agrifotovoltaico, potrebbe essere combinata produzione alimentare ed energetica in campo aperto. In queste soluzioni i pannelli solari sono sospesi in alto tramite delle strutture così da permettere ai mezzi agricoli di operare al di sotto di questi. Le colture coltivate sotto i pannelli vengono comunque raggiunte dalla radiazione solare.

I pannelli potrebbero anche essere installati sulle serre. (Hassanien et al., 2016) ha posizionato al di sopra di serre ferro-film plastico dei moduli fotovoltaici andando a coprire il 9,8% della superficie senza riscontrare variazioni nella resa e nella qualità dei prodotti coltivati.

Nei paesi del nord Europa invece, dove la radiazione solare è limitata la corrente idroelettrica ed eolica sono quelle che sono state maggiormente implementate negli ultimi anni. In particolare l'utilizzo di turbine eoliche sembra essere il sistema rinnovabile più produttivo e sostenibile per generare energia elettrica (Taghizadeh, 2021). Per aumentare il risparmio di corrente elettrica necessaria alla creazione del microclima adatto all'interno dell'ambiente di coltivazione si può anche agire sull'isolamento delle strutture. Ad esempio utilizzando serre con il doppio schermo termico o il doppio vetro si può ridurre del 60% il fabbisogno energetico, a seconda anche del clima esterno (Hassanien et al., 2016). Continui miglioramenti delle tecnologie sono necessari per poter ridurre il consumo energetico e rendere l'idroponica ancora meno impattante per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica. Anche lo sviluppo di metodi per produrre energia elettrica pulita e rinnovabile è indispensabile per poter implementare l'agricoltura verticale altamente tecnologica, in particolare quella indoor (Song et al., 2022).

### **3.5.2 SOSTENIBILITA SOCIALE**

Come visto anche in precedenza la sicurezza alimentare della popolazione globale è un tema importante per il mondo moderno che vuole rendere il più efficiente possibile la produzione agricola, per ottenere prodotti di alta qualità minimizzando l'utilizzo di risorse, al fine di migliorare il benessere sociale (Molin e Martin, n.d.).

La coltivazione fuori suolo porta ad una concezione diversa del settore agricolo rispetto a quella cui siamo oggi abituati. Questo sistema di produzione difatti è ideale per essere sviluppato all'interno delle città o subito fuori di queste, ad esempio nelle periferie (Gonnella e Renna, n.d.). Questo è un

buon punto di inizio per assicurare l'approvvigionamento alimentare nelle città, che sono solitamente distanti dalle campagne e dai centri di coltivazione (Gonnella e Renna, n.d.). Inoltre come già ricordato più volte in questa tesi i sistemi idroponici sono adatti alla coltivazione di ortaggi freschi che dovrebbero essere commercializzati poco tempo dopo la raccolta per giungere al consumatore finale in condizioni di freschezza ottimali. Quest'ultimo passaggio potrebbe essere difficilmente realizzabile con i sistemi di coltivazione sul suolo, anche in previsione del fatto che circa il 70% della popolazione vivrà in aree urbane entro il 2050.

L'agricoltura idroponica, e specialmente quella verticale potrebbero quindi avere un ruolo nell'assicurare il benessere sociale e rafforzare l'autosufficienza alimentare delle città, riducendo i rischi legati alle lunghe catene di approvvigionamento. Si verrebbero così a creare così comunità più resilienti (Molin e Martin, n.d.).

Da un punto di vista più generale i sistemi di coltivazione verticali, o comunque idroponici, potrebbero creare posti di lavoro nelle aree urbane, andando per quanto possibile ad alleviare un problema come quello della disoccupazione nelle città. Tali sistemi potrebbero inoltre portare allo sviluppo e alla crescita di piccole e medie imprese (Gonnella e Renna, n.d.).

L'utilizzo di tecnologie è indispensabile per il funzionamento di un sistema idroponico, sono difatti definiti anche come sistemi altamente tecnologici. Possono quindi aiutare il settore primario a svilupparsi e ammodernarsi andando così ad aumentare la sostenibilità della produzione vegetale (Massa et al., 2020). Va comunque considerato che l'adozione e la gestione di sistemi idroponici su larga scala richiede personale altamente formato, qualificato e con conoscenze tecniche approfondite. Questo in ragione del fatto che per massimizzare la resa diversi parametri devono essere controllati ed eventualmente adattati per una determinata coltura, in funzione di molte variabili come visto nel paragrafo 3.3 (Pomoni et al., 2023).

Essendo il livello tecnologico di questi sistemi elevato è inoltre richiesta assistenza esterna da operatori altamente qualificati. Si verrebbero così a creare posti di lavoro anche nel settore meccanico, chimico e accademico. Verrebbe così promosso lo sviluppo socio-economico (Pomoni et al., 2023). Va comunque evidenziato che queste necessità per l'avvio di sistemi idroponici potrebbero essere un limite più che un'opportunità. È pertanto necessario un aiuto da parte degli enti pubblici, che in collaborazione con i privati dovrebbero dare vita a seminari e programmi educativi per formare operatori in grado di ricoprire i ruoli richiesti dai sistemi di coltivazione fuori-suolo.

Anche la cooperazione dei privati con le università potrebbe aiutare a diffondere conoscenza in questo settore (Sharma et al., 2018).



### 3.5.3 SOSTENIBILITA ECONOMICA

Uno dei principali svantaggi della coltivazione idroponica che viene puntualmente riportato in vari studi è sicuramente l'elevato costo iniziale per la realizzazione delle infrastrutture necessarie a rendere operativi questi sistemi di coltivazione (Pomoni et al., 2023; Barla et al., 2020; Tripathi et al., 2022; Huy et al., 2020; Tabaglio et al., 2020; Molin e Martin, n.d.). Tuttavia anche i costi operativi sembrano essere elevati e sono dovuti al funzionamento continuo delle pompe per il ricircolo della soluzione nutritiva per i sistemi DFT e NFT, oppure per la nebulizzazione della soluzione per l'aeroponica (Huy et al., 2020).

Massa et al. (2020) aggiunge anche che i costi per la costruzione di sistemi idroponici chiusi sono maggiori rispetto a quelli per la costruzione di sistemi aperti, ma ci sono pochi studi che fanno un'analisi costi/benefici a lungo termine, in quanto il costo iniziale dovrebbe essere ricompensato dalla maggiore efficienza con cui vengono utilizzate le risorse. In particolar modo sembra essere la coltivazione aeroponica sia quella ad avere i costi più elevati per la realizzazione, specialmente se messa a confronto con la coltivazione tradizionale (Barla et al., 2020; Tabaglio et al., 2020).

Tripathi et al. (2022) inoltre afferma che nello sviluppo di fattorie verticali il costo della realizzazione del sistema di illuminazione e il consumo energetico per il suo funzionamento sono tra i principali ostacoli che ne limitano l'espansione. Anche Molin e Martin, n.d. riportano che l'uso di energia è un fattore impattante a livello economico nella coltivazione idroponica e che contribuisce per il 20-30 % dei costi totali di produzione. Gonnella e Renna, M, n.d. invece evidenziano che nella coltivazione in serra con sistemi idroponici l'energia rappresenta il 40% dei costi totali di produzione.

Il consumo energetico dovuto all'illuminazione artificiale diventa una necessità più che un costo nelle regioni in cui le ore di luce solare sono limitate rispetto a quelle necessarie per una crescita ottimale della coltura. Va comunque detto che le tecnologie per l'illuminazione sono state abbondantemente migliorate negli ultimi decenni e il loro consumo energetico è stato notevolmente ridotto. Nonostante questo si afferma che i costi di produzione, in termini di consumo energetico, risultano essere troppo elevati quando viene utilizzata solo l'illuminazione artificiale per la coltivazione, in particolare nelle vertical-farm (Molin & Martin, n.d.).

Una ricerca condotta sulle serre idroponiche in Francia ha dimostrato che l'uso di corrente elettrica di rete generata da fonti energetiche convenzionali determina un aumento dei costi di produzione oltre che essere causa di questioni ambientali (Pomoni et al., 2023). Diversi studi concordano sul fatto che nonostante i costi iniziali siano elevati vengono comunque rapidamente ripagati grazie all'elevata produttività che questi sistemi sono poi in grado di dare (Pomoni et al., 2023; Huy et al., 2020; Molin e Martin, n.d.; Elkazzaz, 2017). (Huy et al., 2020) aggiunge anche che una volta ripagato

l'investimento iniziale il rapporto tra costi operativi e ricavi è minore rispetto a quello dei sistemi di coltivazione basati sul suolo.

Va tuttavia anche ricordato che, come visto nel capitolo 3.5.1, parte dei costi per la produzione idroponica in ambiente controllato possono essere attribuiti ai sistemi di riscaldamento e raffreddamento (Hassanien et al., 2016). Per rendere l'idroponica commerciale un'alternativa sostenibile dal punto di vista economico, ma anche ambientale, sarebbe opportuno che questi sistemi di coltivazione venissero realizzati in aree dove sono presenti fonti energetiche rinnovabili e a basso costo, come può essere l'energia solare, eolica o geotermica.

Va comunque considerato che gli investimenti iniziali richiesti per l'adozione di tutte queste soluzioni diventerebbero per lo più proibitivi per i piccoli agricoltori.

Sarebbe pertanto utile che le istituzioni pubbliche stanziassero dei sussidi per poter aiutare le piccole aziende a realizzare questi progetti (Lages Barbosa et al., 2015).

Gli studi di ricerca disponibili in letteratura sui sistemi agricoli di coltivazione idroponici dal punto di vista economico sono molto limitati e si concentrano principalmente sulle proprietà fisiche, chimiche e biologiche, di tali sistemi (Huy et al., 2020). Per questo sempre gli stessi autori hanno analizzato e confrontato i sistemi di coltivazione della lattuga basati sul suolo e senza suolo (idroponica e aeroponica) per evidenziare l'efficienza economica e i limiti di ciascuna pratica. I risultati ottenuti mostrano che oltre a una maggiore produttività, idroponica e aeroponica presentano costi di produzione più elevati.

Nel dettaglio il costo fisso per l'aeroponica è \$6,850/1,000 m<sup>2</sup>, che comprende la manutenzione della serra, dei macchinari, e delle attrezzature, mentre per l'idroponica il costo è di \$ 8,640/1,000 m<sup>2</sup>, che risulta essere nove volte superiore rispetto a quello dell'agricoltura tradizionale.

I costi medi variabili sono stati di \$23.640/1.000 m<sup>2</sup> per l'aeroponica, \$17.010/1.000 m<sup>2</sup> per l'idroponica con ricircolo della soluzione e \$5.400/1.000 m<sup>2</sup> per la coltivazione tradizionale.

Il rendimento medio invece è stato di \$45.04/1,000 m<sup>2</sup>/anno per l'aeroponica e \$16,630/1,000 m<sup>2</sup>/anno per l'idroponica, valori nettamente superiori rispetto al rendimento medio ottenuto con i metodi basati sul suolo, in accordo con quanto riportato da altri studi (Huy et al., 2020). Valori elevati dei ricavi derivano da volumi più elevati e da prezzi di vendita migliori in quanto si possono ottenere produzioni anche fuori stagione (Sharma et al., 2018). Sempre nello stesso studio (Huy et al., 2020) hanno riscontrato che il periodo di rimborso attualizzato per l'aeroponica è di 1,2 anni, che è un buon risultato se si considera che la durata media di questi sistemi è stimata essere di 10 anni.

Per i sistemi che ricircolano la soluzione nutritiva ha invece trovato valori che si aggirano sui 2,6 anni. Entrambi questi valori sono ovviamente maggiori rispetto al periodo di rimborso attualizzato trovato per la coltivazione tradizionale che è di 0,20 anni. Questi valori sono più incoraggianti rispetto

a quelli trovati da altri due lavori che riportavano rispettivamente un periodo di recupero dell'investimento di 5,24 e 3,13 anni per il sistema idroponico (Huy et al., 2020).

I numerosi prodotti generati dalla coltivazione idroponica, l'industrializzazione dei suoi sistemi, l'automazione offerta dalle sue attrezzature, la sua applicabilità in aree urbane e l'aumento della produttività lo rendono un investimento economicamente interessante nell'ottica di ottenere una produzione alimentare alternativa (Pomoni et al., 2023).

## **4. CONFRONTO TRA COLTIVAZIONE TRADIZIONALE E IDROPONICA DELLA LATTUGA**

### **4.1 LA LATTUGA COME COLTURA MODELLO**

In questo lavoro di tesi la lattuga è stata presa come coltura modello per avere dei dati con cui poter fare un confronto tra l'agricoltura convenzionale e quella idroponica, in quanto diversi studi effettuati su questa specie sono disponibili in letteratura.

La lattuga o *Lactuca sativa* L. è un ortaggio a foglia appartenente alla famiglia delle *Asteraceae*. È una pianta erbacea e per l'ottenimento del cespo (parte commestibile) ha un ciclo annuale.

Ha un fabbisogno di illuminazione di 12.000 - 30.000 lux (illuminamento prodotto da una sorgente luminosa) che è fondamentale per ottenere un adeguato accrescimento e morfologia fogliare.

Intensità luminose insufficienti ( $<14 \text{ W/m}^2$ ) impediscono un corretto accrescimento del cespo e ne rallentano l'accrescimento.

È una specie che non ha esigenze pedologiche particolari e ben si adatta a diversi tipi di terreno anche se predilige quelli sciolti, ben drenati, ricchi di sostanza organica ed elementi nutritivi assimilabili.

Per quanto riguarda le esigenze termiche queste sono limitate, in quanto è una specie definita microterma. È una coltura che ben si adatta alla coltivazione invernale nella regione del Mediterraneo.

La temperatura minima letale è  $-2^\circ\text{C}$ , mentre la temperatura ottimale di crescita è compresa tra i 16 e i  $20^\circ\text{C}$ .

Viste le limitate esigenze pedoclimatiche viene coltivata in tutto il mondo, difatti cresce bene nelle zone temperate e subtropicali, ma essendo una coltura tipica della stagione fresca può essere coltivata in ogni continente (Barla et al., 2020).

L'asportazione di macroelementi è la seguente:

- 2,3 kg N / t di prodotto tal quale
- 0,8 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$  / t di prodotto tal quale

- 4,8 kg K<sub>2</sub>O / t di prodotto tal quale

In Italia e in particolare in Veneto la resa si aggira sulle 21,5 t/ha per la coltivazione in pieno campo e 33,9 t/ha per la coltivazione in serra basata sul suolo.

La sua produzione a livello mondiale ammonta a 27 Mt, di cui il 73,7% viene prodotto in Asia, e il 9,7% in Europa (Tabaglio et al., 2020).

Solo in Italia la coltivazione della lattuga occupa circa 34.460 ettari per una produzione di 768055 t e la maggior parte viene coltivata in campo aperto (Tabaglio et al., 2020).

Oltre ad essere un ortaggio ampiamente coltivato la lattuga è anche tra i più consumati a livello mondiale, in quanto non richiede più di tanto lavoro per essere consumata. Per questo motivo è stata definita come la regina delle insalate (Tripathi et al., 2022).

È inoltre sempre più richiesta per fast-food, ristorazione e consumo domestico (Tabaglio et al., 2020). (Tabaglio et al., 2020) riporta che la lattuga fa parte della dieta umana da più 6500 anni.

Essendo questa specie coltivata in tutto il mondo diversi studi hanno analizzato i suoi requisiti tecnici, il consumo energetico e i costi di produzione (Taghizadeh, 2021).

La lattuga ha anche il vantaggio di avere un ciclo produttivo relativamente breve, ad esempio in uno studio effettuato da (Lages Barbosa et al., 2015) un ciclo di coltivazione di lattuga veniva completato in 30 giorni, in un sistema idroponico, in ambiente controllato e con l'utilizzo di illuminazione artificiale supplementare.

Potrebbe quindi essere coltivata durante tutto l'anno e si potrebbero ottenere 12 cicli all'anno. Questo è un altro motivo che la rende una coltura adatta per essere utilizzata negli studi. Le verdure a foglia in generale e in particolar modo la lattuga si prestano bene all'essere coltivate con sistemi idroponici, inoltre l'eventuale elevata densità con cui la lattuga può essere coltivata nei sistemi idroponici favorisce rese elevate (Taghizadeh, 2021).

## **4.2 PRODUTTIVITA DELLA LATTUGA**

Tutti gli studi presenti in letteratura concordano sul fatto che coltivare con sistema idroponico una determinata coltura permette di aumentarne la resa rispetto a se questa viene coltivata sul suolo con metodo tradizionale. In particolare (Sharma et al., 2018) riporta che in diversi studi spesso la differenza di produzione tra il sistema idroponico e quello convenzionale era risultata inaspettatamente elevata e parte del merito è stato attribuito all'ambiente controllato che crea le condizioni ottimali di crescita. Ad esempio uno studio condotto da (Lages Barbosa et al., 2015) ha dimostrato che la lattuga coltivata con sistema idroponico ad alta tecnologia può avere una resa 11 volte maggiore (+1000%) rispetto alla coltivazione basata sul suolo.

Secondo altri risultati ottenuti da (Michelon et al., 2020) l'uso di un sistema idroponico semplificato, che impiegava poca tecnologia, ha portato a un aumento di resa che andava da un +35% a un +72% a seconda della regione in cui la prova era condotta ovvero Nord Est del Brasile e Myanmar rispettivamente.

In questo caso l'aumento della resa era attribuito a una maggiore densità d'impianto. Nella coltivazione idroponica difatti venivano trapiantate 26 piante/m<sup>2</sup> rispetto alle 13 piante/m<sup>2</sup> della coltivazione basata sul suolo (Michelon et al., 2020).

L'aumento della resa nei sistemi idroponici è direttamente correlato alla maggiore densità d'impianto che può essere adottata rispetto alla coltivazione tradizionale. (Lages Barbosa et al., 2015) afferma che un sesto d'impianto più fitto è tipico dei sistemi idroponici rispetto alla coltivazione tradizionale. Anche la maggiore precocità di raccolta, 34 giorni dal trapianto contro i 41 della coltivazione tradizionale, favorita dal mantenimento delle condizioni ambientali adeguate ha permesso di aumentare la produzione (Michelon et al., 2020). Un altro studio che ha confrontato la produzione della lattuga con sistemi idroponici e convenzionali ha riscontrato che la resa risulta essere 5,5 volte maggiore con il sistema idroponico NFT rispetto a quella della coltivazione su suolo (Maestre-Valero et al., 2018).

La maggiore velocità con cui la lattuga si accresce nei sistemi idroponici può anche essere attribuita al fatto che non deve sviluppare più di tanto l'apparato radicale in quanto acqua ed elementi nutritivi gli sono forniti direttamente sulle radici assorbenti e in quantità abbondanti (Fussy & Papenbrock, 2022).

Michelon et al. (2020) ha evidenziato anche come la frequenza di irrigazione influenzi la capacità produttiva nel sistema idroponico. Sempre nello stesso articolo difatti ha riportato che un'elevata frequenza di fertirrigazione, ovvero da 2 a 10 eventi al giorno, porta a un aumento del peso fresco della lattuga del 13-15%.

Anche (Tripathi et al., 2022) affermano che tra i fattori che favoriscono l'incremento della resa nella coltivazione idroponica vi è sicuramente l'adeguato apporto di acqua e nutrienti. Inoltre la velocità di assorbimento dei nutrienti aumenta con l'aumentare della temperatura (fino a 20°C come visto nel capitolo 4.1), consentendo alla pianta di accelerare il processo metabolico.

Per questo motivo il ciclo di crescita dal trapianto alla maturità commerciale della lattuga coltivata idroponicamente in ambiente controllato ha una durata inferiore rispetto a quello della lattuga coltivata su suolo sia in campo aperto che in serra (Sharma et al., 2018).

(Huy et al., 2020) hanno riscontrato i seguenti valori per quanto riguarda la resa media della lattuga coltivata con diversi sistemi in Vietnam:

- agricoltura tradizionale 16,89 kg/m<sup>2</sup>/anno

- idroponica                      30,38 kg/m<sup>2</sup>/anno (+79,9%)
- aeroponica                      44,00 kg/m<sup>2</sup>/anno (+160%)

Questi risultati confermano che la coltivazione fuori suolo permette di ottenere rese decisamente più elevate rispetto alla coltivazione convenzionale. Questo studio presenta tuttavia dei limiti che non possono essere trascurati, ovvero il numero ridotto di campioni che avevano a disposizione per le aziende che coltivano fuori-suolo. Difatti una sola azienda che coltiva con l'aeroponica è stata inclusa, mentre ne sono state incluse sette per il sistema a ricircolo di soluzione nutritiva e 60 per la coltivazione convenzionale. In questo caso (Huy et al., 2020) attribuiscono la differenza di produzione al numero di cicli di coltivazione che vengono effettuati in un anno. Le aziende che coltivano sul suolo riescono a fare mediamente 7-8 cicli all'anno, mentre quelle che coltivano con il sistema idroponico riescono a effettuare 10-12 cicli/anno. Casey et al. (2022) hanno confrontato la coltivazione della lattuga in diversi ambienti e con diversi sistemi di coltivazione arrivando a concludere che i sistemi idroponici in ambiente protetto possono produrre 154 kg/m<sup>2</sup>/anno, ovvero fino a 38 volte in più rispetto alla coltivazione basata sul suolo.

Questo vuol dire che c'è una minore necessità di suolo per produrre un kg di lattuga. In numeri significa che servono 0,0065 m<sup>2</sup> per produrre 1 kg di lattuga all'anno con i sistemi idroponici in ambiente controllato, mentre sono necessari 0,24 m<sup>2</sup> per produrre 1 kg di lattuga/anno nei sistemi di coltivazione del suolo (Casey et al., 2022).

Anche Lages Barbosa et al. (2015) hanno confrontato la coltivazione della lattuga con sistemi idroponici in serre altamente tecnologiche e la coltivazione tradizionale in campo aperto in Arizona. Per ipotizzare la resa nei due sistemi di coltivazione hanno fatto una revisione degli articoli presenti in letteratura e hanno poi fatto una media dei valori che hanno trovato.

Hanno inoltre assunto che la coltivazione potesse avvenire durante tutto l'anno grazie all'illuminazione artificiale e al controllo ambientale.

I valori di resa che hanno trovato sono i seguenti:

- Idroponica    41,0 ± 6,1 kg/m<sup>2</sup>/anno
- Tradizionale    3,9 ± 0,21 kg/m<sup>2</sup>/anno

L'uso dell'illuminazione artificiale supplementare e il controllo della temperatura interna dell'ambiente di coltivazione hanno permesso di completare un ciclo di coltivazione in trenta giorni durante tutti e 12 i mesi all'anno. La resa dell'idroponica si può ottenere assumendo una densità d'impianto di 24 piante/m<sup>2</sup> per ogni ciclo di coltivazione e considerando 12 cicli l'anno si ottiene una produzione di 288 cespi/m<sup>2</sup>/anno. Se poi si assume un peso medio dei cespi a maturità di 146,6 grammi ecco allora che la resa risulta essere di 41 kg/m<sup>2</sup>/anno (Taghizadeh, 2021).

In questo caso (Lages Barbosa et al., 2015) hanno assunto che la coltivazione idroponica avvenisse su un solo piano di coltivazione.

Con questo sistema di coltivazione si potrebbe però applicare il concetto di vertical farm. La produzione potrebbe così aumentare di n volte, quanti sono i piani di coltivazione aggiunti. La superficie di suolo calpestabile necessaria rimarrebbe invece invariata (Molin & Martin, n.d.).

Ad esempio ipotizzando un sistema a quattro piani di coltivazione e tenendo in considerazione i valori di resa per metro quadrato trovati da (Lages Barbosa et al., 2015), la produzione potrebbe diventare di 168 kg/m<sup>2</sup>/anno e sarebbero così necessari 0,006 m<sup>2</sup> per produrre 1 kg di lattuga all'anno, valore simile a quello indicato da (Casey et al., 2022).

Va comunque considerato che è necessario dello spazio tra gli scaffali di coltivazione in modo tale da poter permettere lo svolgimento delle normali operazioni da parte degli operatori.

Pertanto la superficie necessaria alla coltivazione risulta essere 0,0135 m<sup>2</sup> per produrre 1 kg di lattuga all'anno (Taghizadeh, 2021).

Come già riportato in precedenza nella vertical farm si rende necessaria la presenza di un sistema di illuminazione artificiale che distribuisca la radiazione luminosa in modo omogeneo. Questa necessità è associata al controllo ambientale e permette di ridurre la durata del ciclo di crescita e di uniformare la produzione (Molin e Martin, n.d.). Taghizadeh, (2021) ha confrontato le densità d'impianto adottate per la coltivazione della lattuga con sistemi idroponici in diversi studi e ha trovato valori decisamente concordanti, che sono riportati nella tabella 4.2.1.

**Table 2.** Production yields of a few studies regarding hydroponic lettuce.

Paper	Yield per cycle* (Head/m <sup>2</sup> )	Number of cycles	Annual yield**** (head/m <sup>2</sup> )
Barbosa et al. 2015	24	12	288
Somerville 2017	24	11	264
Fernandes 2017	25	12***	300
Pertierra Lazo & Quispe Gonzabay 2020	25.6*	12	307

\* Acquired from one cultivation layer.

\*\* Reported as after 20% lost in the paper.

\*\*\* Author's own assumption

\*\*\*\* Author's own estimation: (Yield per cycle) × (Number of cycles)

Tabella 4.2.1 (Taghizadeh, 2021)

Questi valori sono inferiori a quelli riportati da (Wang et al., 2023) che hanno adottato una densità d'impianto media di 29,8 piante/m<sup>2</sup> per la coltivazione idroponica con sistema NFT e 17,5 piante/m<sup>2</sup> per la coltivazione tradizionale della lattuga su suolo.

(Wang et al., 2023) hanno confrontato la coltivazione tradizionale della lattuga e la coltivazione con tecnica idroponica NFT. Il confronto è avvenuto in funzione di diverse variabili e ha portato a concludere che la resa nella coltivazione idroponica è influenzata da più fattori.

Questo studio tra le altre cose ha anche confermato che la resa della lattuga nel sistema idroponico era maggiore rispetto alla resa della lattuga coltivata sul suolo. Come appena visto la densità del sesto d'impianto è correlata all'aumento di produzione, ma anche la concentrazione di nutrienti della soluzione nutritiva e l'ambiente protetto giocano un ruolo importante per poter massimizzare la resa. In numeri la resa più alta per la lattuga coltivata in idroponica è stata di 6,81 kg/m<sup>2</sup>, ovvero il 134% in più rispetto alla resa più elevata ottenuta dalla coltivazione su suolo che è stata di 2,91 kg/m<sup>2</sup>.

Queste rese sono state ottenute entrambe nella prova in cui il trapianto è stato effettuato il 03/03/2021, mentre nella seconda prova in cui il trapianto è avvenuto in data 08/04/2021 le rese sono state inferiori per entrambi i sistemi di coltivazione.

Probabilmente la causa principale di queste differenze risiede nella temperatura media all'interno della serra che era maggiore nella seconda prova. La serra difatti non era dotata delle tecnologie per poter controllare in modo preciso le condizioni ambientali (Wang et al., 2023). La temperatura interna dell'ambiente influenza la temperatura della soluzione nutritiva e di conseguenza la disponibilità di ossigeno disciolto in essa. La quantità di ossigeno disciolto nella soluzione è solitamente temperatura dipendente. Più è alta la temperatura e meno ossigeno è presente nell'acqua (Fussy e Papenbrock, 2022). Per la coltivazione idroponica (Wang et al., 2023) hanno fatto tre prove con tre soluzioni nutritive aventi una diversa concentrazione degli elementi nutritivi. La resa maggiore è stata ottenuta nella prova in cui è stata usata la soluzione nutritiva con la più elevata concentrazione di elementi nutritivi.

Per quanto riguarda la coltivazione basata sul suolo invece erano state fatte sempre tre prove con diversi livelli di irrigazione ed è emerso che la resa maggiore è stata ottenuta nella prova dove è stato apportato un maggiore volume d'acqua di irrigazione.

(Taghizadeh, 2021) nell'ipotizzare la resa di un sistema idroponico per la coltivazione della lattuga in Svezia ha riscontrato che potrebbe produrre 75 kg/m<sup>2</sup>. Questa resa è 44 volte superiore rispetto a quella ottenibile dalla coltivazione in campo aperto in Svezia. L'elevato rendimento potenziale è dato dall'indipendenza del sistema idroponico dall'ambiente esterno. Ad esempio in Svezia la temperatura media annua è inferiore ai 18°C, che è la temperatura media ottimale per la crescita della lattuga (Taghizadeh, 2021). Anche il controllo nell'apporto di acqua e nutrienti, in questo caso, permette di aumentare la resa (Taghizadeh, 2021), confermando quanto riportato da altri studi.

Riassumendo la produzione idroponica permette di aumentare le rese per unità di superficie e di conseguenza l'efficienza con cui viene usato il suolo rispetto alla coltivazione tradizionale in quanto:



- si possono adottare sesti d'impianto più fitti
- L'ambiente controllato, l'apporto di acqua e nutrienti direttamente sull'apparato radicale permettono di ridurre la durata del ciclo di crescita. Nel caso di serre che non permettono di controllare l'ambiente la durata del ciclo dipende dalle condizioni locali dove si trova la serra
- L'eventuale utilizzo di illuminazione artificiale permette di ridurre ulteriormente la durata del ciclo dal trapianto alla raccolta
- Se si utilizza la coltivazione verticale la resa per unità di superficie può raddoppiare, triplicare e così via in base al numero di piani di coltivazione utilizzata

### 4.3 PRODUTTIVITA DELL'ACQUA

Tutti gli studi presenti in letteratura che confrontano la coltivazione idroponica con quella tradizionale concordano sul fatto che la prima utilizzi l'acqua in modo molto più efficiente rispetto alla seconda. Da questa osservazione ne deriva che la coltivazione su suolo consuma quantità d'acqua nettamente maggiori rispetto alla coltivazione idroponica (Sharma et al., 2023). Quando l'acqua viene apportata al suolo una parte viene persa per percolazione profonda negli strati dove non sono presenti le radici. Questo fenomeno non va sottovalutato specialmente quando si coltivano ortaggi in quanto solitamente presentano un apparato radicale poco profondo e che di conseguenza non riesce a sfruttare le riserve idriche immagazzinate negli strati profondi del suolo. Anche la lattuga fa parte di questi (Shtaya e Qubbaj, 2022).

Sharma et al. (2018) riporta che è possibile coltivare efficacemente verdure di alto valore nutrizionale e di buona qualità in condizioni idroponiche controllate utilizzando l'85-90% di acqua in meno rispetto alla coltivazione tradizionale basata sul suolo. Casey et al., (2022) hanno confrontato la coltivazione della lattuga su suolo e con sistemi idroponici in ambiente controllato e sono arrivati alla conclusione che per produrre un chilogrammo di lattuga con il sistema idroponico il fabbisogno idrico varia da 1,6 a 93 L di acqua. La coltivazione basata sul suolo invece ne richiede tra le otto e le sessanta volte in più. Majid et al. (2021) hanno confrontato il consumo idrico per la coltivazione della lattuga su suolo e con due sistemi idroponici (DFT e NFT). Hanno poi concluso che il sistema idroponico NFT consuma circa il 64% di acqua in meno rispetto alla coltivazione tradizionale, ottenendo così una maggiore efficienza nell'utilizzo dell'acqua. Tuttavia in questo caso il consumo idrico per il sistema idroponico DFT e per la coltivazione su suolo è risultato essere abbastanza simile. Questo può essere spiegato con il fatto che come già detto la lattuga ha un apparato radicale che non si

sviluppa più di tanto in profondità e che di conseguenza non gli permette di sfruttare tutta l'acqua disponibile nel sistema di coltivazione in acque profonde.

La coltivazione idroponica con sistema NFT permette di massimizzare l'efficienza di utilizzo dell'acqua in quanto va a eliminare le perdite dovute al drenaggio e al deflusso superficiale. Inoltre l'acqua e i nutrienti non utilizzati dalle piante coltivate vengono completamente riciclati (Shtaya e Qubbaj, 2022).

La coltivazione della lattuga con sistemi idroponici altamente tecnologici in ambiente controllato permette di ridurre il consumo di acqua di 13 volte rispetto alla coltivazione tradizionale su suolo (Michelon et al., 2020).

Lages Barbosa et al. (2015) nel confrontare la coltivazione della lattuga con sistema idroponico e convenzionale in Arizona hanno riscontrato che il consumo di acqua era più o meno simile se rapportato alla superficie. Tuttavia quando il consumo idrico è stato rapportato alla resa quello della coltivazione tradizionale è risultato essere  $13 \pm 2,7$  volte maggiore rispetto a quello del sistema idroponico. La coltivazione idroponica ha mostrato un consumo idrico di  $20 \pm 3,8$  L/kg/anno, valore nettamente inferiore rispetto a quello della coltivazione tradizionale che è risultato essere  $250 \pm 25$  L/kg/anno.

Il consumo idrico più elevato può essere attribuito al metodo di irrigazione. In Arizona la lattuga coltivata in campo aperto viene principalmente irrigata per scorrimento superficiale e infiltrazione laterale attraverso i solchi. Questo fa sì che l'acqua non velocemente assorbita dalle piante venga persa per percolazione profonda (Lages Barbosa et al., 2015). Anche Majid et al., (2021) hanno dimostrato come la quantità di acqua consumata da una pianta coltivata con sistema idroponico sia uguale a quella consumata da una pianta coltivata sul suolo.

Pertanto per confrontare la coltivazione idroponica con quella convenzionale è meglio utilizzare il parametro di efficienza dell'utilizzo dell'acqua.

Shtaya e Qubbaj, (2022) hanno condotto uno studio sulla coltivazione della lattuga in Palestina con due metodi di coltivazione ovvero su suolo o con sistema idroponico NFT a ciclo chiuso. Sono poi andati a valutare l'efficienza di utilizzo dell'acqua in rapporto al peso fresco nelle due coltivazioni e hanno riportato che con la coltivazione su base suolo sono stati ottenuti 34 kg di prodotto fresco per m<sup>3</sup> di acqua utilizzata, mentre per la coltivazione idroponica sono stati ottenuti 121 kg di prodotto fresco per m<sup>3</sup> di acqua utilizzata.

L'efficienza di utilizzo dell'acqua per i sistemi idroponici è di molto superiore rispetto a quella della coltivazione su suolo. Tale evidenza è conseguenza della riduzione del consumo di acqua che i sistemi idroponici permettono di ottenere nonostante l'aumento della resa che gli stessi offrono (Sharma et al., 2023).

Wang et al. (2023) hanno svolto diverse prove per confrontare la coltivazione della lattuga con sistema idroponico NFT e la coltivazione classica su suolo. I valori di produttività dell'acqua più elevati che hanno riscontrato sono 146,29 kg lattuga/m<sup>3</sup> di acqua per la coltivazione con tecnica NFT e 72,1 kg lattuga/m<sup>3</sup> di acqua per la coltivazione tradizionale su suolo.

Michelon et al. (2020) hanno confrontato la produzione di lattuga con un sistema idroponico e convenzionale su suolo in due paesi che soffrono la carenza idrica, che sono la zona nord orientale del Brasile e la zona centrale secca del Myanmar. I risultati che hanno ottenuto mostrano che l'efficienza di utilizzo dell'acqua nei due paesi rispettivamente è di 7,7 e 2,7 volte più elevata per la coltivazione idroponica rispetto alla coltivazione tradizionale su suolo. È pertanto evidente che seppur con valori diversi tutti gli studi precedentemente menzionati concordano sul fatto che la lattuga coltivata con sistemi idroponici permette di aumentare considerevolmente la produttività dell'acqua.

#### **4.4 IL CONSUMO ENERGETICO**

Come ampiamente visto in precedenza nella coltivazione basata su suolo la forma principale di energia utilizzata è l'energia meccanica la cui generazione è data quasi esclusivamente dal diesel. Per quanto riguarda la coltivazione idroponica invece è totalmente dipendente dall'energia elettrica per poter funzionare. Questa può essere generata da varie fonti rinnovabili e non.

Lages Barbosa et al. (2015) nel confrontare la coltivazione della lattuga con sistemi idroponici e convenzionali in Arizona, hanno riscontrato che la coltivazione della lattuga con sistema idroponico permette di ottenere una resa per metro quadrato undici volte maggiore rispetto alla lattuga coltivata su suolo. Tuttavia il consumo energetico per chilogrammo di lattuga raccolta è stato di  $82 \pm 11$  volte maggiore per la coltivazione idroponica rispetto a quello riscontrato per la coltivazione su suolo.

Il consumo energetico totale per produrre un kg di lattuga con sistema idroponico è stato di  $90.000 \pm 11.000$  kJ/kg/anno.

Questo valore è il risultato della somma delle seguenti voci:

- $74.000 \pm 10.000$  kJ/kg/anno necessari per il riscaldamento/raffreddamento dell'ambiente all'interno della serra
- $15.000 \pm 2.100$  kJ/kg/anno necessari al funzionamento dell'illuminazione artificiale supplementare
- $640 \pm 120$  kJ/kg/anno necessari per il funzionamento delle pompe di circolazione della soluzione nutritiva

In questo caso vista la zona in cui si è svolta la ricerca il consumo energetico maggiore è stato per il riscaldamento e raffreddamento della serra, mentre il consumo minore è stato determinato dalle

funzioni base del sistema idroponico ovvero il funzionamento delle pompe che ricircolano la soluzione nutritiva.

Il consumo energetico totale per la coltivazione tradizionale della lattuga in Arizona invece è stato ipotizzato essere  $1.100 \pm 75$  kJ/kg/anno.

Tale valore è dato dalla somma dei seguenti consumi:

- $330 \pm 20$  kJ/kg/anno forniti dal diesel per tutte le lavorazioni di preparazione del terreno e di protezione della coltivazione
- $760 \pm 74$  kJ/kg/anno di energia elettrica per il pompaggio dell'acqua di irrigazione

I risultati riscontrati da Barla et al. (2020) si trovano in accordo con Lages Barbosa et al. (2015) e confermano come il consumo di energia elettrica per illuminazione, raffreddamento, ventilazione e pompaggio della soluzione nutritiva risulta essere molto elevato per la coltivazione idroponica. In questo studio il consumo è stato di 15 kWh per ogni chilogrammo di lattuga prodotta, che corrispondono a circa 54.000 kJ.

Taghizadeh (2021), nell'ipotizzare il consumo energetico per la coltivazione idroponica della lattuga in ambiente chiuso in Svezia con un sistema verticale a quattro piani, ha determinato che sarebbero necessari 17,3 kWh/kg di lattuga prodotta, ovvero 62.280 kJ/kg di lattuga prodotta.

In questo caso la voce di consumo energetico più alta è data dall'illuminazione artificiale necessaria alla crescita della lattuga con sistema verticale. Per il riscaldamento / raffreddamento in questo caso non era necessaria più di tanta energia in quanto la temperatura media ottimale per la crescita della lattuga è simile a quella della temperatura media ambientale esterna della città di Uppsala, dove hanno ipotizzato avvenisse la coltivazione, durante i mesi estivi.

Difatti 10.260 kJ/kg/anno sono richiesti per il riscaldamento/raffreddamento dell'ambiente di coltivazione. Mentre 7560 kJ/kg/anno sono necessari per il funzionamento delle pompe per il ricircolo della soluzione nutritiva.

Si può notare come il fabbisogno energetico dipenda in particolar modo dalla necessità di riscaldamento o raffreddamento dell'ambiente di coltivazione.

Taghizadeh (2021) ha riscontrato un consumo energetico per l'ipotetico sistema idroponico a quattro strati in Svezia pari a 17,3 kWh/kg di lattuga all'anno, che è quasi il 30% in meno rispetto al consumo energetico totale che (Lages Barbosa et al., 2015) hanno calcolato (cioè, 90.000 kJ/kg o 25 kWh/kg). Tuttavia anche per l'ipotetico sistema idroponico applicato in Svezia da (Taghizadeh, 2021) dove il carico energetico per il riscaldamento/raffreddamento era minimo il consumo energetico totale è risultato essere comunque superiore a quello trovato da (Lages Barbosa et al., 2015) per la coltivazione tradizionale della lattuga in Arizona.

## 4.5 CONVENIENZA ECONOMICA

Tutti gli studi presenti in letteratura che confrontano la coltivazione della lattuga con sistema idroponico alla coltivazione su suolo riportano che i costi di investimento iniziali sono molto maggiori nel primo caso rispetto al secondo. Tuttavia riportano anche che l'elevata produttività dei sistemi idroponici e la loro durata economica considerata di almeno dieci anni permette di rientrare rapidamente dei costi iniziali elevati.

Di seguito sono riportati alcuni studi che hanno confrontato da un punto di vista economico la coltivazione della lattuga con diversi sistemi idroponici alla coltivazione su suolo.

(Huy et al., 2020) hanno fatto una valutazione economica per comprendere quale sia l'efficienza economica e i limiti della coltivazione della lattuga con il sistema idroponico (DFT e NFT), aeroponica e tradizionale su suolo.

Per fare il confronto hanno utilizzato diversi indici finanziari tra cui:

- VAN (Valore Attuale Netto) o valore attuale del rendimento futuro. Dà indicazioni sull'efficienza economica nel corso della vita del progetto
- TIR (Tasso di Rendimento Interno), strumento economico classico utilizzato per bilanciare il flusso di cassa che si crea durante la vita del progetto a seguito dell'investimento iniziale
- BCR il rapporto benefici-costi (BCR) è il rapporto tra il valore attuale dei ricavi e il valore attuale dei costi con alcuni tassi di sconto per attualizzarli all'anno zero. Questo rapporto indica che un progetto è economicamente vantaggioso quando risulta essere maggiore di 1, mentre non lo è quando è inferiore a 1
- DPP (Periodo di Rimborso Attualizzato) indice che valuta l'efficienza economica di un investimento per unità di tempo. Indica il numero di anni di recupero dell'investimento dal flusso di cassa netto attualizzando il valore della valuta nel tempo

Per quanto riguarda i costi di investimento iniziale (Huy et al., 2020) riportano che quelli per la coltivazione idroponica e aeroponica sono più elevati rispetto a quelli necessari per la coltivazione tradizionale. I costi più elevati sono dovuti alla costruzione di serre e all'acquisto di macchinari e attrezzature. Anche il costo di irrigazione per l'idroponica è maggiore rispetto a quello per la coltivazione su suolo. I \$17,810/1,000 m<sup>2</sup> sono la conseguenza del continuo ricircolo della soluzione nutritiva, operazione necessaria per il buon funzionamento del sistema.

Tuttavia (Huy et al., 2020) riportano che una volta ripagato l'investimento iniziale il rapporto tra costi operativi e ricavi favorisce il sistema idroponico e aeroponica rispetto a quello tradizionale.

La media dei costi di investimento iniziali necessari per avviare la coltivazione della lattuga in questo studio ha dato i seguenti risultati:

- 7,99 \$/m<sup>2</sup> per la coltivazione tradizionale
- 38,83 \$/m<sup>2</sup> per la coltivazione idroponica
- 39,73 \$/m<sup>2</sup> per la coltivazione aeroponica

I costi di produzione della lattuga per i tre sistemi sono invece di:

- 5,40 \$/m<sup>2</sup> per la coltivazione tradizionale
- 17,00 \$/m<sup>2</sup> per la coltivazione idroponica
- 23,64 \$/m<sup>2</sup> per la coltivazione aeroponica

I costi di acqua ed energia rappresentano il 19,88% per l'idroponica e il 5,07% per l'aeroponica dei costi per gli input iniziali. La coltivazione tradizionale fa uso di combustibili fossili e anche energia elettrica per il pompaggio dell'acqua di irrigazione.

Idroponica e aeroponica mostrano anche costi fissi più elevati:

- 8,64\$/m<sup>2</sup> per la coltivazione idroponica
- 6,85\$/m<sup>2</sup> per la coltivazione aeroponica
- 0,96\$/m<sup>2</sup> per la coltivazione tradizionale

Idroponica e aeroponica tuttavia permettono di ottenere rese più elevate rispetto alla coltivazione su suolo come visto nel capitolo 4.2. Le rese più elevate permettono di ottenere rendimenti medi più elevati:

- 45,04\$/m<sup>2</sup>/anno per la coltivazione aeroponica
- 16,63\$/m<sup>2</sup>/anno per la coltivazione idroponica
- Il rendimento della coltivazione tradizionale non è riportato, tuttavia affermano che è molto inferiore rispetto ai due precedentemente riportati.

Di seguito sono riportati i risultati dell'analisi finanziaria dei differenti sistemi di coltivazione con costi e prezzi di esercizio fissi.

VAN (valori positivi indicano che i ricavi sono maggiori dei costi):

- Idroponica 109,38 \$/m<sup>2</sup>
- Aeroponica 185,47 \$/m<sup>2</sup>
- Tradizionale 22,44 \$/m<sup>2</sup>

TIR:

- Idroponica 62,13%
- Aeroponica 92,11%

- Tradizionale 63,01%

BCR che è risultato maggiore di uno in tutti i casi:

- Idroponica 2,70
- Aeroponica 2,60
- Tradizionale 3,60

DPP:

- Idroponica 2,6 anni
- Aeroponica 1,2 anni
- Tradizionale 2,4 anni

Il DPP dell'idroponica è relativamente breve se si considera una vita utile dell'impianto di dieci anni. (Wang et al., 2023) hanno confrontato la coltivazione della lattuga su suolo e con sistema idroponico NFT. In entrambi i casi la coltivazione si svolgeva in ambiente protetto in serra ferro-vetro e sono state utilizzate due serre identiche per entrambe le coltivazioni.

Gli impatti economici dei due sistemi di coltivazione sono stati valutati sulla base del VAN e del BCR. Essendo la coltivazione avvenuta in due serre identiche il costo per la loro costruzione e dei terreni è stato trascurato in quanto non necessari per il confronto della fattibilità economica dei due sistemi di coltivazione.

Sono invece stati presi in considerazione dati relativi alla resa, ai costi fissi e ai costi variabili.

Anche in questo caso si ritiene che il progetto sia economicamente fattibile se il VAN risulta maggiore di zero e il BCR maggiore di uno.

Hanno condotto diversi esperimenti sia per quanto riguarda la coltivazione idroponica sia per quella tradizionale e hanno trovato valori diversi del VAN e di BCR. Di seguito vengono riportati quelli più elevati che nella coltivazione con sistema NFT sono stati riscontrati nell'esperimento che ha utilizzato una soluzione nutriente con una maggiore concentrazione di elementi nutritivi, mentre per la coltivazione su suolo sono stati riscontrati nell'esperimento che ha apportato una maggiore quantità di acqua di irrigazione.

VAN:

- 370,6 \$/m<sup>2</sup> per la coltivazione con sistema NFT
- 143,81 \$/m<sup>2</sup> per la coltivazione su suolo

BCR:

- 4,27 per la coltivazione su suolo

- 2,5 per la coltivazione idroponica NFT

Il rendimento netto del sistema idroponico è maggiore rispetto a quello della coltivazione su suolo, ciò significa che è più redditizio. I BCR sono entrambi maggiori di uno il che indica che entrambi i sistemi di coltivazione sono redditizi. Maestre-Valero et al. (2018) hanno confrontato la coltivazione della lattuga con sistema idroponico NFT e tradizionale su suolo. Nel fare una valutazione economica dei due sistemi di coltivazione hanno riscontrato che il sistema NFT ha un costo totale superiore di 5,9 volte, un ricavo di 5,7 e l'utile 3,5 volte maggiore rispetto agli stessi della coltivazione basata su suolo.

Il VAN o valore attuale netto invece è 3,1 volte maggiore per il sistema NFT rispetto a quello della coltivazione su suolo. Più il VAN è positivo e più il rendimento sarà maggiore rispetto ai costi. Questo significa la coltivazione della lattuga con un sistema NFT potrebbe essere un investimento più economicamente interessante rispetto alla coltivazione tradizionale. I costi d'investimento e di esercizio sono comunque più elevati per la coltivazione NFT, di conseguenza questo sistema presenta un rapporto minore tra profitto e costi totali rispetto alla coltivazione su suolo (0,079 contro 0,134). Pertanto in situazioni in cui siano presenti adeguate riserve idriche, terreno fertile e condizioni climatiche adeguate la coltivazione su suolo è più conveniente rispetto a quella con sistema idroponico NFT (Maestre-Valero et al., 2018).

Anche se le elevate rese potenzialmente ottenibili con il sistema NFT potrebbero comunque renderlo economicamente competitivo con la coltivazione basata sul suolo (Maestre-Valero et al., 2018).

Majid et al. (2021) hanno valutato da un punto di vista economico due sistemi idroponici (DFT e NFT) per la coltivazione della lattuga. Hanno riscontrato che il VAN per il sistema DFT è maggiore rispetto a quello di NFT, che si avvantaggia di costi di produzione più bassi e rese più elevate per unità di superficie. Un rapporto costi-benefici più elevato è invece stato riscontrato per il sistema NFT del quale si è ipotizzata una vita lavorativa utile di 20 anni. In questo studio sia il VAN che il rapporto costo benefici indicano che la coltivazione su suolo è meno redditizia rispetto alla coltivazione idroponica (Majid et al., 2021).

Tuttavia sia la coltivazione idroponica NFT e DFT che anche quella tradizionale hanno mostrato valori di VAN maggiori di zero e valori del rapporto costi benefici maggiore di uno. Ciò significa che tutti e tre i sistemi di coltivazione analizzati sono economicamente profittevoli.

Nonostante tutto però una valutazione economica su piccola scala attribuisce al sistema DFT la redditività maggiore (Majid et al., 2021). La redditività maggiore dei sistemi idroponici può in parte essere attribuita al prezzo di vendita più elevato che i produttori "high-tech" riescono a ottenere. Tale evidenza è data dal fatto che innanzitutto possono gestire con molta precisione la produzione anche



in stagioni poco favorevoli e dal momento che hanno a disposizione un prodotto di alta qualità riescono a vendere in catene di approvvigionamento ad alto valore aggiunto (Huy et al., 2020).

## 5 CONCLUSIONI

In conclusione l'agricoltura idroponica non può sostituire la coltivazione tradizionale di colture quali possono essere quelle cerealicole. Può invece essere una valida alternativa per la coltivazione di ortaggi. Tuttavia non potrà neanche in questo caso sostituire completamente la coltivazione tradizionale in quanto coltivare con il sistema idroponico richiede investimenti economici importanti. È difatti dimostrato come in situazioni dove non ci siano carenze particolari, ovvero si hanno a disposizione terreni fertili e acqua pulita, la coltivazione su suolo è economicamente conveniente rispetto a quella idroponica.

In secondo luogo poi sempre nel caso non ci siano impedimenti di altro tipo la coltivazione tradizionale è molto meno impattante a livello di emissioni di CO<sup>2</sup> rispetto alla coltivazione idroponica.

Particolare attenzione va posta sulla fonte energetica che alimenta il sistema idroponico, dal momento che necessita di quantità importanti di energia elettrica. Come visto in questa tesi per poter rendere la coltivazione di lattuga coltivata con sistema idroponico sostenibile dal punto di vista ambientale, l'alimentazione elettrica dovrebbe provenire da fonti completamente rinnovabili.

La realizzazione delle infrastrutture per la coltivazione associate alla realizzazione di sistemi per produrre energia rinnovabile portano a costi d'investimento iniziale che sono proibitivi per la maggior parte delle piccole medie imprese che compongono il settore agricolo oggi.

È però vero che i sistemi idroponici permettono di utilizzare suolo e acqua in modo molto più efficiente rispetto alla coltivazione classica su suolo. Queste caratteristiche rendono questi sistemi adatti alla coltivazione in paesi aridi o semi-aridi, così da utilizzare al meglio le risorse idriche e terreni che difficilmente permetterebbero la coltivazione di specie orticole.

Ad esempio le zone del Nord Africa hanno a disposizione aree desertiche che possono ospitare sia la costruzione di impianti fotovoltaici per la produzione di energia elettrica e sia le infrastrutture per la coltivazione idroponica.

Come visto poi la coltivazione idroponica può essere applicata all'interno delle città in container o edifici. Questa caratteristica li rende adatti ad affiancare la coltivazione tradizionale nell'ottica di rendere le città meno dipendenti dalle periferie per l'approvvigionamento di prodotti alimentari freschi. Questo vale anche per i paesi che magari non hanno grossi problemi di disponibilità idrica o terreni fertili, ma che al contempo hanno città con una densità di popolazione decisamente elevata.

Pochi studi e dati sono presenti in letteratura che confrontano l'efficienza con cui vengono utilizzati gli input produttivi nella coltivazione idroponica e tradizionale. Sarebbe pertanto opportuno che studi futuri si concentrassero sulle necessità in termini di fabbisogni nutrizionali della lattuga coltivata nei due sistemi e come questi possono essere soddisfatti. Anche studi che valutino la necessità di impiego di prodotti fitosanitari per i due tipi di coltivazione sarebbero necessari. Si può quindi affermare che i sistemi di coltivazione idroponica possono sicuramente fare la differenza per garantire la sicurezza alimentare nei paesi in via di sviluppo e in paesi dove le condizioni climatiche sono aride o semi aride.

In paesi invece dove la disponibilità idrica è abbondante e discretamente distribuita nel tempo, i sistemi idroponici possono comunque contribuire a “industrializzare” la produzione vegetale. Anche con la previsione di un clima sempre più instabile ad esempio nella Pianura Padana la coltivazione con questi sistemi può assicurare una produzione costante nel tempo e di conseguenza un potenziale reddito.

## BIBLIOGRAFIA

- Barla, S.-A., Salachas, G., & Abeliotis, K. (2020). Assessment of the greenhouse gas emissions from aeroponic lettuce cultivation in Greece. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 5(2), 29. <https://doi.org/10.1007/s41207-020-00168-w>
- Barrière, V., Lecompte, F., Nicot, P. C., Maisonneuve, B., Tchamitchian, M., & Lescourret, F. (2014). Lettuce cropping with less pesticides. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 175–198. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0158-5>
- Both, A. J. (n.d.). *TEN YEARS OF HYDROPONIC LETTUCE RESEARCH*.
- Casey, L., Freeman, B., Francis, K., Brychkova, G., McKeown, P., Spillane, C., Bezrukov, A., Zaworotko, M., & Styles, D. (2022). Comparative environmental footprints of lettuce supplied by hydroponic controlled-environment agriculture and field-based supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 369, 133214.
- Chausali, N., & Saxena, J. (2021). Chapter 15 - Conventional versus organic farming: Nutrient status. In V. S. Meena, S. K. Meena, A. Rakshit, J. Stanley, & C. Srinivasarao (Eds.), *Advances in Organic Farming* (pp. 241–254). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822358-1.00003-1>
- Chen, X., Shuai, C., & Wu, Y. (2023). Global food stability and its socio-economic determinants towards sustainable development goal 2 (Zero Hunger). *Sustainable Development*, 31(3), 1768–1780. <https://doi.org/10.1002/sd.2482>
- Elkazzaz, A. (2017). Soilless Agriculture a New and Advanced Method for Agriculture Development: An Introduction. *Agricultural Research & Technology: Open Access Journal*, 3. <https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2017.03.555610>
- Fontana, E., & Nicola, S. (2009). Traditional and soilless culture systems to produce corn salad (*Valerianella olitoria* L.) and rocket (*Eruca sativa* Mill.) with low nitrate content. *J. Food Agric. Environ*, 7(2), 405–410.
- Fussy, A., & Papenbrock, J. (2022). An Overview of Soil and Soilless Cultivation Techniques—Chances, Challenges and the Neglected Question of Sustainability. *Plants*, 11(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/plants11091153>
- Gonnella, M., & Renna, M. (n.d.). *The Evolution of Soilless Systems towards Ecological Sustainability in the Perspective of a Circular Economy. Is It Really the Opposite of Organic Agriculture?* Retrieved 2 April 2024, from <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/5/950>
- Hassanien, R. H. E., Li, M., & Dong Lin, W. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 989–1001. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.095>
- Huy, D. D., Thuyen, P. T., Hai Au, D. T., Giang, T. T., & My, N. T. T. (2020). Economic analysis of soil-based and soilless farming systems: A case study from Da Lat city. *Dalat University J Sci*, 10, 141–156.
- Kumari, S., Pradhan, P., Yadav, R., & Kumar, S. (2018). Hydroponic techniques: A soilless cultivation in agriculture. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(1S), 1886–1891.
- Lages Barbosa, G., Almeida Gadelha, F. D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., & Halden, R. U. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. Conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6879–6891.
- Maestre-Valero, J. F., Martin-Gorriz, B., Soto-García, M., Martinez-Mate, M. A., & Martinez-Alvarez, V. (2018). Producing lettuce in soil-based or in soilless outdoor systems. Which is more economically profitable? *Agricultural Water Management*, 206, 48–55. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.022>
- Majid, M., Khan, J. N., Ahmad Shah, Q. M., Masoodi, K. Z., Afroza, B., & Parvaze, S. (2021). Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of Lettuce (*Lactuca sativa* L., var. Longifolia) and comparison with protected soil-based cultivation. *Agricultural Water Management*, 245, 106572. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106572>
- Massa, D., Magán, J. J., Montesano, F. F., & Tzortzakis, N. (2020). Minimizing water and nutrient losses from soilless cropping in southern Europe. *Agricultural Water Management*, 241, 106395.
- Michelon, N., Pennisi, G., Myint, N. O., Dall'Olio, G., Batista, L. P., Salviano, A. A. C., Gruda, N. S., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2020). Strategies for Improved Yield and Water Use Efficiency of Lettuce

- (*Lactuca sativa* L.) through Simplified Soilless Cultivation under Semi-Arid Climate. *Agronomy*, 10(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091379>
- Molin, E., & Martin, M. (n.d.). *Assessing the energy and environmental performance of vertical hydroponic farming*.
- Pamminger, T., Bottoms, M., Cunningham, H., Ellis, S., Kabouw, P., Kimmel, S., Loutseti, S., Marx, M. T., Nopper, J. H., Schimera, A., Schulz, L., Sharples, A., Staab, F., & Ernst, G. (2022). Investigating the role of soil mesofauna abundance and biodiversity for organic matter breakdown in arable fields. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 18(5), 1423–1433. <https://doi.org/10.1002/ieam.4563>
- Pomoni, D. I., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G., & Vasiliadis, L. (2023). A review of hydroponics and conventional agriculture based on energy and water consumption, environmental impact, and land use. *Energies*, 16(4), 1690.
- Savvas, D., & Gruda, N. (2018). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry – A review. *European Journal of Horticultural Science*, 83, 280–293. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2018/83.5.2>
- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O. P. (2018). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364. <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5>
- Sharma, S., Lishika, B., Shahi, A., Shubham, & Kaushal, S. (2023). Hydroponics: The Potential to Enhance Sustainable Food Production in Non-Arable Areas. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 42(39), 13–23. <https://doi.org/10.9734/cjast/2023/v42i394253>
- Shtaya, M. J., & Qubbaj. (2022). Effect of different soilless agriculture methods on irrigation water saving and growth of lettuce (*Lactuca sativa*). *Research on Crops*, 23(1). <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2022.022>
- Song, S., Hou, Y., Lim, R. B. H., Gaw, L. Y. F., Richards, D. R., & Tan, H. T. W. (2022). Comparison of vegetable production, resource-use efficiency and environmental performance of high-technology and conventional farming systems for urban agriculture in the tropical city of Singapore. *Science of The Total Environment*, 807, 150621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150621>
- Stavi, I., Bel, G., & Zaady, E. (2016). Soil functions and ecosystem services in conventional, conservation, and integrated agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(2), 32. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0368-8>
- Tabaglio, V., Boselli, R., Fiorini, A., Ganimede, C., Beccari, P., Santelli, S., & Nervo, G. (2020). Reducing nitrate accumulation and fertilizer use in lettuce with modified intermittent nutrient film technique (NFT) system. *Agronomy*, 10(8), 1208.
- Taghizadeh, R. (2021). *Assessing the Potential of Hydroponic Farming to Reduce Food Imports: The Case of Lettuce Production in Sweden*. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-443568>
- Tripathi, V., Arora, D., Ahlawat, V., Lahari, P., Kumar, A., & Kumar, A. (2022). Soilless cultivation in Lettuce: A Review. *Ecology, Environment and Conservation*, 28(04), 1891–1898. <https://doi.org/10.53550/EEC.2022.v28i04.036>
- Wang, L., Ning, S., Zheng, W., Guo, J., Li, Y., Li, Y., Chen, X., Ben-Gal, A., & Wei, X. (2023). Performance analysis of two typical greenhouse lettuce production systems: Commercial hydroponic production and traditional soil cultivation. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1165856>