



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE ALIMENTARI

LA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DEI SISTEMI DI DOMESTIC VERTICAL FARMING

TIPO TESI: Compilativa

Studente:
ELISABETTA PICCININI

Relatore:
PROF. DANIELE DUCA

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

SOMMARIO

SOMMARIO	3
ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	7
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	9
CAPITOLO 1 DOMESTIC VERTICAL FARMING: LA NASCITA DELL'INDOOR GARDENING.....	11
1.1 Metodi di coltivazione	13
1.1.1 Idroponica	13
1.1.2 Aeroponica.....	16
1.1.3 Acquaponica	17
CAPITOLO 2 INDOOR VERTICAL FARMING: SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE E SOCIALE	19
2.1 Sostenibilità nei sistemi di Indoor Vertical Farming	20
2.1.1 Sostenibilità ambientale.....	20
2.1.2 Sostenibilità sociale	22
CAPITOLO 3 LIFE CYCLE ASSESSMENT: APPLICAZIONE AI SISTEMI INDOOR VERTICAL FARMING	25
3.1 Life Cycle Assessment (LCA): definizione, storia e metodo di valutazione	25
3.2 Applicazione del metodo LCA su impianti IVF medio-grandi.....	26
3.2.1 Descrizione dei casi studio in analisi	28
3.3 Confronto dei casi studio mediante indicatori ambientali.....	31
3.3.1 Indicatore del Cambiamento Climatico ($\text{kg CO}_2 \text{ eq kg}^{-1} \text{ FW}$)	31
3.3.2 Indicatore del consumo idrico o Water Use ($\text{m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ FW}$).....	33
3.3.3 Indicatore del consumo specifico di energia ($\text{kWh kg}^{-1} \text{ FW}$)	35
3.3.4 Indicatore dell'uso del suolo o Land Use ($\text{m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ FW}$)	36
CAPITOLO 4 IMPATTO AMBIENTALE DEI SISTEMI DI DOMESTIC VERTICAL FARMING	39

4.1 Analisi della sostenibilità di sistemi di Domestic Vertical Farming.....	40
4.1.1 Descrizione degli impianti di DVF e confronto con impianti medio-grandi	40
4.1.2 Discussione	43
CONCLUSIONI	46
BIBLIOGRAFIA	48
SITOGRAFIA	52

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 3-1: Raccolta dati dei casi studio a confronto. Vengono evidenziati la cultivar, la superficie (m^2), la produzione Fresh Weight (kg)/anno, il tempo entro il quale viene effettuata l'analisi LCA e l'input energetico annuo (kWh)..... 38

Tabella 3-2: Raccolta dati LCIA dei casi studio presi in analisi, con precisazione sul mix energetico impiegato dai vari impianti (Mix E). Indice del cambiamento climatico ($\text{kg CO}_2\text{-eq kg}^{-1}\text{ FW}$), consumo idrico o Water Use ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}\text{ FW}$), consumo specifico di energia o Consumi E ($\text{kWh kg}^{-1}\text{ FW}$), uso del suolo o Land Use ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}\text{ FW}$). 38

Tabella 4-1: Raccolta dati dei sistemi di DVF. Vengono specificati le cultivar, superficie (m^2), Fresh Weight (kg y^{-1}), tempo di analisi ed energia (kWh y^{-1}) nel tempo di analisi. 41

Tabella 4-2: Raccolta dati LCIA dei sistemi di media-grande scala, sistemi di DVF e dati su agricoltura convenzionale. Vengono riportati gli indicatori di performance: consumo specifico di energia o Consumi E ($\text{kWh kg}^{-1}\text{ FW}$), Land Use o uso del suolo ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1}\text{ FW}$), emissioni di GHG ($\text{kg CO}_2\text{-eq kg}^{-1}\text{ FW}$), Water Use o consumo idrico ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}\text{ FW}$). 42

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1: Confronto della disponibilità di terreni coltivabili con la crescita demografica. (FAO,2011).....	12
Figura 2: Mercato in espansione delle HIFs (www.technavio.com).....	13
Figura 3: Sistema a stoppino (Wick System).....	14
Figura 4: Sistema a flusso e riflusso (Ebb and Flow)	14
Figura 5: Sistema a goccia (Drip System) (Rouphael and Colla, 2005)	15
Figura 6: Coltura in acque profonde (Deep Water Culture)	15
Figura 7: Tecnica del filtro nutritivo (Nutrient Film Technique NFT) (Domingues et al., 2012)	16
Figura 8: Tecnica di coltivazione aeroponica (Naikoo et al., 2022)	16
Figura 9: Esempio di rappresentazione grafica dei limiti di un sistema LCA.	27

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

IVF	Indoor Vertical Farming
HIF	Home Indoor Farm
VF	Vertical Farming
HIC	Home Indoor Cultivator
FV	Fattoria Verticale
GHG	GreenHouse Gas (Gas Serra)
HIC	Home Indoor Cultivator
DVF	Domestic Vertical Farming
SEA	Swedish Energy Agency
PFAL	Plant Factory Artificial Light
FW	Fresh Weight
LED	Light-Emitting Diode
OF	Open Field
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
IoT	Internet of Things
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
PE	PoliEtilene
PET	PoliEtilene Tereftalato
GWP	Global Warming Potential
WU	Water Use
LU	Land Use
CHP	Combined Heating and Power

PPFD Photosynthetic Photon Flux Density

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

La crescita costante ed esponenziale della popolazione è un tema che preoccupa su più fronti il futuro e la sicurezza mondiale. Si stima che entro il 2050, il pianeta Terra toccherà i 9,8 miliardi di abitanti.

La crescente richiesta di risorse non potrà essere soddisfatta stando ai dati previsti dalla FAO (Food and Agriculture Organization), dove si stima che, a metà del XXI secolo, i terreni disponibili per coltivazioni saranno 1,700 m² per persona, dato significativamente in calo rispetto ai 5,200 m² per persona nel 1950 (FAO, 2011).

L'aumento demografico va in parallelo con la continua urbanizzazione, le città di conseguenza prenderanno il posto delle campagne e la situazione non avrà margini di miglioramento da qui a 25 anni.

Tutto ciò implica che l'agricoltura tradizionale non sarà più sostenibile nel futuro ed è da qui che bisogna attuare il cambiamento.

Un'alternativa valida alle metodiche tradizionali di coltivazione e che sta prendendo campo ormai da più di una decina di anni a questa parte è l'Indoor Vertical Farming (IVF). È un sistema di produzione di vegetali, destinati al consumo umano, svolto all'interno di strutture chiuse e che si sviluppa in verticale, così da ottimizzare lo spazio e massimizzare l'uso del suolo. Esistono dai più grandi sistemi di IVF i quali possono coinvolgere intere città ed edifici fino ai più piccoli, cosiddetti Domestic Vertical Farming o Home Cultivator o Home Indoor Farming (HIF), che sono sistemi domestici, i quali permettono a qualsiasi persona di divenire "Prosumer" (Verbeek & Hardeweg, 2022), ossia oltre che consumatori del prodotto ne sono anche produttori, al di là che si sia in possesso di un giardino o di un qualsiasi spazio esterno.

Il mercato delle HIF è in ascesa e sono sempre più le aziende e start-up che se ne interessano, in quanto questo rappresenta essere tendenzialmente "una soluzione plug-and-play" (Verbeek & Hardeweg, 2022), di utilizzo relativamente facile, grazie alla quale, seguendo semplici istruzioni, si dovrebbe essere in grado di produrre erbe aromatiche, frutta e, vegetali di qualsiasi tipo a seconda delle necessità. Purtroppo, manca ancora una bibliografia solida che mette in evidenza chiaramente la sostenibilità ambientale di questi sistemi più piccoli.

L'obiettivo del seguente elaborato è quindi quello di cercare di valutare l'impatto ambientale delle HIFs mediante l'analisi delle valutazioni di sostenibilità e in particolare analisi del ciclo di vita (LCA) effettuate su sistemi di agricoltura tradizionale e sistemi di IVF su scala più o meno grande e confrontarla con i pochi dati presenti in letteratura e relativi ai piccoli sistemi domestici.

Capitolo 1

DOMESTIC VERTICAL FARMING: LA NASCITA DELL'INDOOR GARDENING

Le Domestic Vertical Farming o HIFs, derivano da sistemi di *Indoor Vertical Farming*. In generale le coltivazioni verticali non sono un'invenzione del nostro secolo, al contrario, già nel 600 a.C. i Babilonesi avevano organizzato la vegetazione in “giardini pensili”(Naikoo et al., 2022), dove piante e fiori arricchivano i terrazzi e tetti di palazzi ed abitazioni dell'epoca.

Il termine “*Vertical Farming*” venne coniato nel 1915 dal geologo americano Gilbert Ellis Bailey (Naikoo et al., 2022) con la pubblicazione del suo libro, dove per verticale s'intendeva un tipo di coltivazione che andasse più in profondità nel terreno in modo da aumentare la resa delle colture (Bailey, 1915).

Successivamente, nel 1999, si declinò la definizione odierna di VF. Dickson Despommier, docente presso la Columbia University (USA) ed autore di “*The Vertical Farm: feeding the world in the 21st Century*” (2010) (Despommier, 2019), si occupò di studiare ed applicare il concetto di agricoltura verticale.

Despommier concretizzò l'idea di coltivare cibo all'interno di strutture, quali magazzini o edifici (indoor), dove la vegetazione impilandosi un ripiano sopra l'altro, va a costituire un sistema che si sviluppa per altezza (verticale).

Tutto ciò si può definire come un importante punto di partenza, in quanto con lo studio e l'impiego di queste tecnologie si è in grado, potenzialmente, di risolvere diverse problematiche a livello mondiale. Primo fra tutti il rischio di “carestia globale” da qui ai prossimi 30 anni, dovuto ad un aumento della popolazione, dove la “domanda sarà superiore all'offerta” (Naikoo et al., 2022), dunque il cibo prodotto non sarà sufficiente a sfamare tutti i futuri abitanti del pianeta, e questo anche come ulteriore conseguenza dell'urbanizzazione, la quale porterà alla graduale scomparsa di appezzamenti coltivabili (Naikoo et al., 2022) (*Figura 1*).

Tutto ciò viene favorito dai sempre più frequenti fenomeni atmosferici allarmanti: alluvioni, siccità, uragani, incendi boschivi ed in generale l'aumento delle temperature, che porterà alla diminuzione della disponibilità di acqua e potenzialmente della resa delle coltivazioni, con conseguente aumento dei prezzi dei prodotti alimentari. Questo si traduce in

una compromissione dell'accessibilità del cibo, che andrà a minare la sicurezza alimentare degli individui.

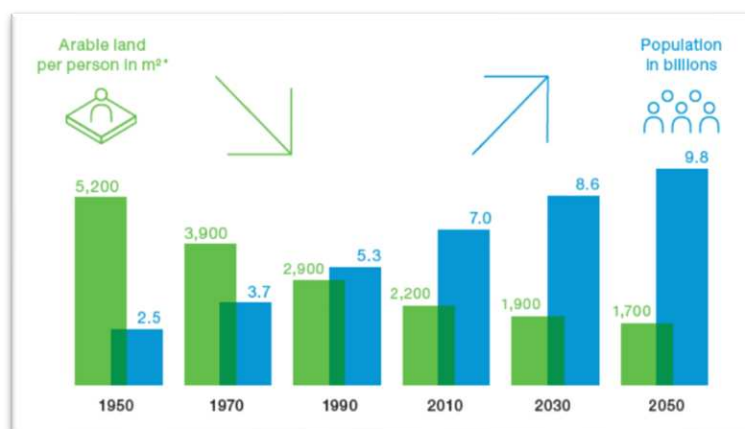


Figura 1: Confronto della disponibilità di terreni coltivabili con la crescita demografica. (FAO,2011)

Il report pubblicato dalla “Technavio” (www.technavio.com) nel luglio 2024 permette di esprimere una previsione a proposito dell’andamento di mercato dell’HIFs in un periodo compreso tra l’anno 2023 e l’anno 2028. Durante questi cinque anni si prevede un’espansione del mercato di 1,09 miliardi USD, con un CAGR (Compounded Average Growth Rate) di 9,59% (www.technavio.com) (Figura 2).

È in atto una vera e propria “rivoluzione” in campo agricolo e la domanda di sistemi domestici di smart gardening e in generale di prodotti derivanti dalle Vertical Farming sta crescendo di anno in anno.

I motivi per cui sempre più riflettori sono puntanti sulle HIFs e sugli smart garden in generale sono soprattutto legati ad esigenze ambientali e demografiche di cui si è già discusso precedentemente.

Un’altra ragione risulta essere il facile utilizzo, soprattutto grazie al supporto dell’evoluzione tecnologica e dei sistemi “IoT” o *Internet of Things*, i quali rappresentano una rete di dispositivi interconnessi, in grado di monitorare i fattori di crescita delle HVFs. Livello di umidità, nutrienti, temperatura, luce, sono tutti parametri che possono essere rilevati e tenuti sotto controllo in modo costante grazie ad un sistema di sensori e attuatori (www.technavio.com) (Ramadhan et al., 2024).

Inoltre, il loro design accattivante e la richiesta di prodotti alimentari potenzialmente più genuini, a km zero e dunque di semplice reperibilità e basati sui fabbisogni personali, fanno avvicinare sempre più persone ad investire in questo settore.

Ad oggi, tale settore occupa ancora una quota esigua nel mercato alimentare complessivo. Questo è conseguenza del fatto che ha elevati costi di investimento, i quali non ne permettono una piena ascesa (Avgoustaki & Xydis, 2020).

Negli anni si sono diffusi vari modelli delle Indoor Vertical Farms, i quali si differenziano principalmente per metodo di coltivazione e grandezza dell'impianto stesso. Questi sistemi rappresentano un modello di *Controlled Environment Agriculture (CEA)* (Despommier, 2019). Le piante vengono coltivate in ambienti chiusi, con lo scopo di monitorare la temperatura, l'atmosfera, l'umidità, la luce, la composizione del terreno e la soluzione con i vari nutrienti nelle percentuali desiderate. Ciò significa produrre alimenti nelle condizioni ottimali di crescita ed essendo un ambiente chiuso il rischio di contaminazioni esterne è limitato se non praticamente nullo; quindi, anche l'utilizzo di pesticidi ed erbicidi risulta essere poco o per niente necessario.



Figura 2: Mercato in espansione delle HIFs (www.technavio.com)

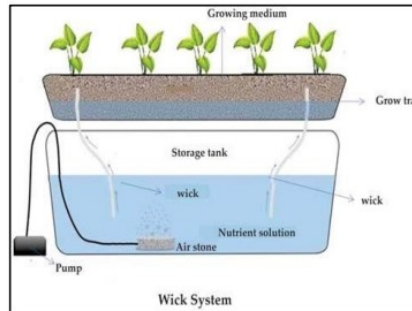
1.1 Metodi di coltivazione

1.1.1 Idroponica

Il termine “Idroponica” deriva dal greco “*hydro*” acqua e “*ponos*” lavoro (Naikoo et al., 2022) e in effetti è proprio l’acqua a svolgere il lavoro, perché all’interno di essa vengono disciolte le sostanze nutritive, le quali saranno assorbite dalle piante direttamente dalle radici o tramite supporti. I sistemi più usati sono:

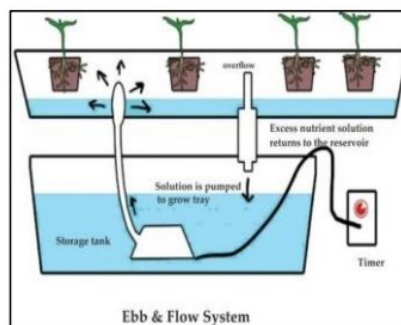
1. **Sistema a stoppino (Wick System):** Questa metodologia è indicata per piante di piccole dimensioni, che richiedono quantità d’acqua esigue, come spezie e piante aromatiche.

La soluzione nutriente viene fornita per capillarità e, dallo stoppino in nylon, passa al supporto assorbente in fibra di cocco o in vermiculite, dove vengono alloggiare le piante (*Figura 3*) (Shrestha and Dunn, 2013).



***Figura 3: Sistema a stoppino
(Wick System)
(Shrestha and Dunn, 2013)***

2. **Sistema a flusso e riflusso (Ebb and Flow):** Il principio è quello di riempimento del vasoio di coltivazione con l'acqua ricca di nutrienti fino al raggiungimento del livello massimo. Le piante alloggiavano su supporti costituiti da rocce, ghiaia o lana di roccia. Atteso un tempo prestabilito la soluzione verrà drenata fuori dal vasoio. È uno dei sistemi più usati in commercio anche se il rischio di incorrere nella formazione di muffe, alghe e marciume apicale è molto alto ed è dovuto al tempo prolungato di permanenza della soluzione con le piante (*Figura 4*) (Nielsen et al., 2006).



***Figura 4: Sistema a flusso e
riflusso (Ebb and Flow)
(Nielsen et al., 2006)***

3. **Sistema a goccia (Drip System):** Questo sistema viene impiegato soprattutto nei coltivatori domestici. La soluzione nutritiva viene introdotta tramite gocciolamento diretto alla base di un mezzo assorbente dove sono collocate le piante (*Figura 5*) (Rouphael and Colla, 2005).

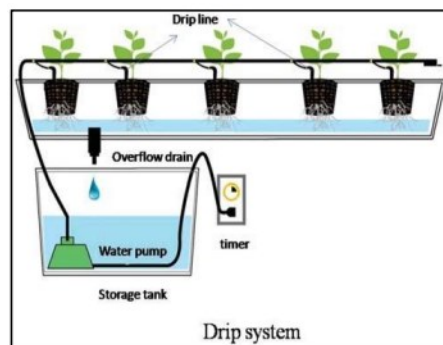


Figura 5: Sistema a goccia (Drip System) (Rouphael and Colla, 2005)

4. **Coltura in acque profonde (Deep Water Culture):** La seguente procedura è efficiente per piante che hanno bisogno di grandi quantità d'acqua, come piante da frutto. Le radici di quest'ultime sono immerse direttamente nella soluzione grazie ad un sostegno in polistirolo, il quale sorregge le piante senza farle affondare nell'acqua.

Come nel sistema del “*Flusso e riflusso*”, quando vi è un contatto prolungato con la soluzione è possibile incorrere, con maggiore facilità, nel marciume apicale o nella formazione di muffe o alghe. È essenziale tenere sotto controllo tutti i parametri della soluzione (pH, salinità, ossigeno) in modo frequente (*Figura 6*) (Domingues et al., 2012).

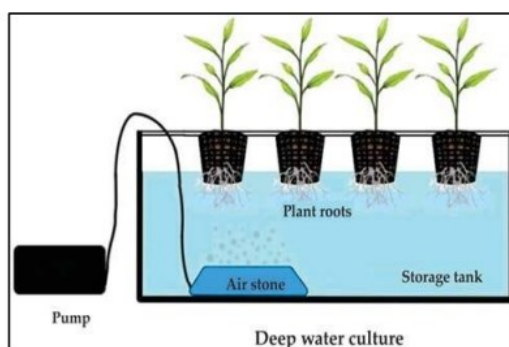
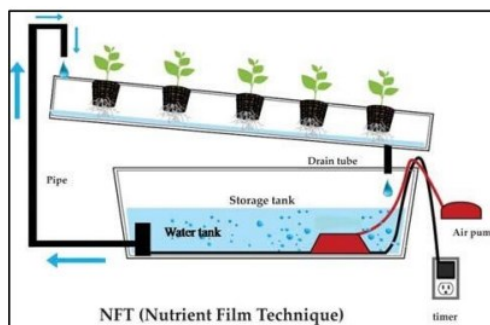


Figura 6: Coltura in acque profonde (Deep Water Culture) (Domingues et al., 2012)

5. **Tecnica del film nutritivo (Nutrient Film Technique – NFT):** A differenza del sistema “*Flusso e riflusso*”, il vasoio di coltivazione è inclinato per far defluire l’acqua con i nutrienti disciolti nel serbatoio. La soluzione viene continuamente pompata e lambisce l’apparato radicale delle piante. È una metodica che si utilizza soprattutto per vegetali a foglia larga (Domingues et al., 2012) (*Figura 7*).

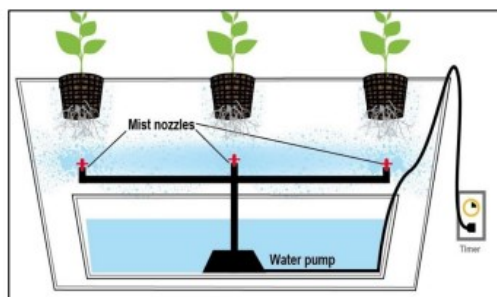


**Figura 7: Tecnica del filtro nutritivo
(Nutrient Film Technique NFT)
(Domingues et al., 2012)**

1.1.2 Aeroponica

L’aeroponica è un’evoluzione della coltura in serra, dove le piante si sviluppano senza la necessità di suolo, vasche per il contenimento dell’acqua o alcun tipo di sostegno.

La soluzione con i nutrienti disciolti viene nebulizzata direttamente sulle radici e grazie ad un sistema di ricircolo l’acqua viene riutilizzata. Questa metodica permette di risparmiare grandi quantità di suolo e di materiali che verrebbero utilizzati come substrato di crescita delle coltivazioni. Il risparmio notevole riguarda i consumi idrici, infatti l’aeroponica consuma circa il 70% di acqua in meno rispetto all’idroponica (Naikoo et al., 2022) e la produzione di vegetali è rapida. (*Figura 8*)



**Figura 8: Tecnica di coltivazione
aeroponica (Naikoo et al., 2022)**

1.1.3 Acquaponica

L'acquaponica è una tecnologia che combina l'acquacoltura con l'idroponica (Naikoo et al., 2022). L'allevamento di organismi acquatici fornisce nutrimento per la coltivazione di piante. I pesci dallo svolgimento delle loro attività metaboliche rilasciano nell'acqua rifiuti organici, ricchi di ammoniaca e nitrati, i quali permettono uno sviluppo rigoglioso di alberi da frutto e vegetali vari (Diver, 2006).

I vantaggi di questo sistema sono molteplici e, oltre al risparmio del suolo, i consumi idrici saranno nettamente inferiori grazie al riciclo dell'acqua. In aggiunta i nutrienti prodotti dai pesci fungono da fertilizzanti naturali e permettono una produzione di alimenti più florida e in minor tempo.

L'acquaponica ha tutte le carte in regola per essere definita come tecnica di coltura sostenibile ma ad oggi non ha molto mercato in quanto ha bisogno di un'attenzione e una competenza maggiore nell'utilizzo rispetto ad altri metodi (Diver, 2006).

In linea generale questi sono i sistemi di coltivazione indoor più innovativi attualmente in uso e che sono in continuo studio per il loro miglioramento dal punto di vista dei consumi, materiali utilizzati e delle metodiche applicate.

Prendendo in analisi i coltivatori domestici e nello specifico i marchi che risultano essere i più venduti secondo il sito Serious Eats (www.seriousseats.com), la tecnologia più utilizzata per le Domestic Vertical Farms risulta essere l'idroponica. Le aziende prese in considerazione sono: AeroGarden, iDoo e la Click&Grow.

È stato possibile valutare e capire il funzionamento dei loro prodotti grazie alla consultazione delle specifiche tecniche descritte negli shop online (www.amazon.com). È emerso che tutti i sistemi di coltivazione possiedono in comune:

1. Un serbatoio, contenente acqua e/o soluzione nutritiva.
2. Un vassoio di supporto delle sementi/piante, le quali si trovano alloggiate all'interno di "pods". Il materiale utilizzato per la produzione di queste cialde assorbenti è la torba (di sfagno, biologica), che garantisce supporto alle sementi, sviluppo del futuro apparato radicale e permette di inglobare la quantità d'acqua necessaria.

Nell'impianto Click&Grow (www.amazon.com), le cialde contengono già i nutrienti essenziali per lo sviluppo del germoglio/pianta, a confronto degli altri sistemi dove questi ultimi devono essere aggiunti nel serbatoio, in soluzione con l'acqua.

3. Luci LED, le quali simulano la luce solare con frequenze che vanno dai 400 agli 800 nano-metri (Nm) circa (Budavári et al., 2024).

Dunque, le HIFs risultano essere di facile ed immediato utilizzo e il futuro “prosumer” ha la possibilità di scegliere tra diversi modelli, di differenti dimensioni a seconda della propria disponibilità e necessità.

Capitolo 2

INDOOR VERTICAL FARMING: SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE E SOCIALE

Il Vertical Farming sembra essere una soluzione promettente per un futuro più sostenibile, ma prima di analizzare i fattori che fanno considerare questo sistema tale, è importante dare una definizione del termine “sostenibilità”.

Oggigiorno si sente spesso parlare di sistemi sostenibili, ma cosa s'intende davvero? Qual è la vera essenza di questo termine?

“Sostenibilità” o “sviluppo sostenibile” indica: <<uno sviluppo che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri>>. Questa definizione fu attribuita da Go Harlem Bundtland, ex primo ministro norvegese e presidente della World Commission on Environment and Development (WCED, 1983) (Silvestri, 2015). Il concetto da puntualizzare è che le risorse del pianeta sono limitate e continuando ad ignorare tale realtà non si potrà garantire un futuro alla popolazione del domani. L'attuazione di uno sviluppo sostenibile permette di applicare politiche che mirino alla salvaguardia delle risorse della biosfera e che assicurino un avvenire dignitoso alle generazioni che verranno.

La sostenibilità è una materia multidisciplinare che coinvolge tre ambiti: ambientale, economico e sociale (Silvestri, 2015). Il primo riguarda la custodia degli equilibri che regolano l'insieme degli organismi viventi e non, i quali convivono in una mutualità funzionale all'interno di un ambiente circoscritto. Dunque, è possibile usufruire delle opportunità che la biosfera offre, ma in modo intelligente e bilanciato. La natura ha una sua armonia e l'uomo in passato ed ora se ne è servito sopra le disponibilità. L'applicazione di politiche aziendali “Green”, “Zero Waste” ad oggi, sono guidate proprio dal concetto di <<Sostenibilità ambientale>>, che mette al centro l'importanza del recupero degli scarti generati e soprattutto un'impronta che sia limitata nell'ambiente.

Si parla di <<Sostenibilità economica>> quando la crescita economica del capitale finanziario (monetario), viene limitata in base agli effetti che potrebbe causare sulla società e sull'ambiente. La scelta è ponderata su un modello di “economia circolare” la quale si basa

sull'impiego di risorse rinnovabili, risparmio energetico e che promuova una durabilità nel tempo dei beni (Silvestri, 2015).

Infine, il concetto di <<Sostenibilità etico-sociale>> garantisce un'*equità infragenerazionale e intergenerazionale* (Silvestri, 2015) e ciò significa assicurare uguaglianza di pari opportunità e pari accesso delle risorse e dei servizi sia alle generazioni odierne, impegnandosi al rispetto di un'equità sociale per tutta la popolazione mondiale, e sia alle generazioni future, offrendo loro una prospettiva di sviluppo.

2.1 Sostenibilità nei sistemi di Indoor Vertical Farming

Confrontando sistemi su larga-scala di IVF con metodiche tradizionali agricole, è possibile valutare gli effetti che apportano a livello ambientale e sociale. Grazie a diversi studi sono stati riscontrati parecchi benefici, tra cui il minor consumo di suolo e il risparmio idrico.

Di seguito verranno riportate le conseguenze prodotte dalla diffusione dell'IVF nell'ambiente e "l'impatto sociale" che hanno questi sistemi.

2.1.1 Sostenibilità ambientale

Nel Vertical Farming le sementi/piante alloggiano in supporti assorbenti costituiti da torba, o supporti rocciosi o le radici sono direttamente a contatto con la soluzione nutritiva. Dunque, l'impiego di terre arabili è limitato per questo tipo di coltivazione e quindi permette di preservare il suolo e utilizzarlo per altre finalità.

In tal senso, una delle più grandi cause dell'erosione dei terreni è la lavorazione dei campi ai fini della coltivazione intensiva. Da uno studio condotto si è riscontrato un rischio di erosione di 1-2 ordini di grandezza superiori rispetto a terreni non coltivati (Stein, 2021).

L'attuazione delle pratiche agricole tradizionali, al fine di produrre alimenti destinati al consumo umano, risulta favorire l'emissione di gas serra nell'atmosfera globale quali protossido di azoto (N₂O), metano (CH₄) e anidride carbonica (CO₂) (Stein, 2021).

Un'altra problematica che incombe attualmente sul pianeta è la "scarsità assoluta d'acqua", com'è stata definita dal FAO, dove quasi il 50% della popolazione mondiale, per almeno un mese durante l'anno, sarà tenuta ad affrontare una carestia a livello di disponibilità idrica (unric.org).

L'acqua è un bene fondamentale ed oggi più che mai è necessario farne un uso consapevole e scegliere soluzioni che permettano di usufruirne in modo efficiente. Allevamenti intensivi di bestiame e agricoltura in pieno campo hanno un impatto ambientale e soprattutto un'impronta

idrica elevata. L'industria alimentare, grazie alla ricerca ed agli studi che si stanno effettuando, si sta muovendo verso soluzioni più sostenibili anche sotto questo aspetto.

L'IVF ovvierebbe tali problematiche andando a ridurre di un 90-95% i consumi idrici rispetto alle coltivazioni in campo (Stein, 2021). A proposito dell'impronta idrica apportata dalla produzione di alimenti, è stato effettuato uno studio nell'Arizona sud-occidentale (Barbosa et al., 2015), il quale ha evidenziato che sono necessari 250 ± 25 L/kg di acqua dolce per la coltivazione di lattuga tramite metodo tradizionale, al fronte dei 20 ± 3.8 L/kg di acqua impiegata per la stessa coltura, però tramite tecnica idroponica. (Barbosa et al., 2015)

Le tecniche agricole standard non sembrano influire unicamente sulla quantità d'acqua impiegata nella produzione di derrate alimentari, ma ne risente indirettamente anche l'ecosistema. Nella coltivazione vengono forniti ai vegetali e al suolo nutrienti, pesticidi, erbicidi, per favorirne la crescita ed ostacolare insetti, funghi e vegetazione indesiderata. Tali "additivi" con l'irrigazione vengono trasportati dall'acqua nei canali di scolo, per poi arrivare alle falde acquifere e/o riversarsi in fiumi e laghi. Il dilavamento di questi fertilizzanti, pesticidi ed erbicidi può causare dei veri e propri squilibri a livello ambientale, come *eutrofizzazione idrica* (Stein, 2021), inquinamento, dissesto ecologico e concorrere all'emissione di gas serra.

L'*eutrofizzazione idrica* è un evento che si verifica nei casi in cui laghi e fiumi vengano inquinati con prodotti agricoli (fertilizzanti, prodotti fitosanitari), i quali vanno a provocare squilibri della flora e della fauna selvatica pre-esistente. La presenza di questi prodotti molto spesso va a favorire una crescita smisurata di alghe, le quali portano a una riduzione della concentrazione di ossigeno nelle acque, con conseguente scomparsa della popolazione ittica che è naturalmente stanziata in questi ambienti (Stein, 2021).

Una serie di reazioni a catena fatali, che sono in grado di distruggere i delicati equilibri su cui si regola un ecosistema. Tutto ciò viene dimostrato dalla correlazione tra la contaminazione delle acque a causa dell'impiego di fertilizzanti chimici, ricchi in formulazione di azoto e fosforo, e l'inquinamento atmosferico. L'U.S. EPA (Environmental Protection Agency, 2020) ha osservato che i fertilizzanti a base azoto sono in grado di contribuire al rilascio di tali componenti gassosi in atmosfera, compromettendo la qualità dell'aria.

Dunque, in generale l'agricoltura verticale in sistemi chiusi dovrebbe consentire di far fronte alle questioni appena affrontate confermandosi come una scelta "*Green*" rispetto alle soluzioni agricole adottate sino ad ora.

Purtroppo, ad oggi, gli impianti di IVF non riescono a rispondere a tutte le difficoltà in campo ambientale e una delle debolezze più rilevanti risulta essere l'elevato consumo energetico.

Le piante comunemente utilizzano l'energia solare per effettuare la fotosintesi, una reazione chimica che è alla base del loro metabolismo e quindi della loro crescita. In assenza di luce, il loro sviluppo sarebbe compromesso ed è per questa ragione che nelle coltivazioni indoor le radiazioni energetiche naturalmente emesse dal sole vengono riprodotte da LED, i quali tendono ad imitare le stesse lunghezze d'onda dello spettro solare. L'impiego di un impianto di illuminazione artificiale genera dei costi e dei consumi molto elevati, a tal punto che, secondo alcuni studi, se si convertisse l'intera industria agricola degli Stati Uniti in VF, sarebbe necessaria una produzione di energia otto volte superiore rispetto al quantitativo generato annualmente (Perez, 2014).

Alle spese energetiche per l'illuminazione si sommano i consumi dell'impianto di condizionamento e di ventilazione. Lo studio condotto da Avgoustaki & Xydis (2020) ha evidenziato una richiesta di energia elettrica di tali impianti di circa 703,000 kWh/anno, a fronte di 123,000 kWh/anno di una equivalente produzione di basilico in serra. Tali consumi si traducono anche in un dispendio economico nell'IUVF di 3,7 volte superiore alle spese energetiche del sistema in serra. Inoltre i LED, pur essendo la tecnologia più in uso come soluzione di illuminazione artificiale, possono interferire con l'ambiente dell'IUVF producendo calore ed aumentando la temperatura interna, con un incremento in consumi e costi del sistema di condizionamento (Kalantari et al., 2018).

Tuttavia, l'impiego di energia rinnovabile (energia solare e geotermica) risulterebbe un'ottima alternativa per limitare l'impatto della componente energetica, abbassare in modo significativo i costi (Al-Kodmany K., 2018) ed avvicinare ancora di più i sistemi di IVF alla definizione di "*Sostenibilità ambientale*" ma ne servirebbero quantitativi al momento assolutamente non disponibili.

2.1.2 *Sostenibilità sociale*

La *Sostenibilità etico-sociale* consente la costruzione di un collettivo solido ed unito, e insieme a quella ambientale ed economica assicurano una stabilità a lungo termine. È insito che per esplicitare tale obiettivo devono necessariamente coesistere tutti e tre i concetti di sostenibilità (ecologica, sociale, economica), i quali, pur essendo discipline differenti tra loro, devono mantenere un equilibrio dinamico per uno sviluppo sostenibile.

Dopo aver valutato i sistemi di IVF dal punto di vista ambientale, è importante comprenderne anche l'impatto sociale che provoca la diffusione di queste nuove tecnologie di coltivazione, i prodotti alimentari che ne derivano e quindi il loro ipotetico acquisto e consumo.

L'opinione pubblica riguardante l'IVF sembra rispondere in modo positivo. Dalla consultazione della letteratura e dalle ricerche effettuate su diversi target sociali, Mina et al. (2023) hanno dedotto che almeno un 40-60% delle persone prese in esame possiedono un approccio propositivo nei confronti dell'espansione di nuove tecnologie in campo agricolo (IVF) e sarebbero favorevoli a sostentarsi con prodotti che derivano da questo tipo di coltivazione. Nella percentuale positiva rientrano consumatori che hanno avuto accesso a più alti livelli di istruzione, soprattutto giovani e che dispongono di un grado di consapevolezza maggiore nei confronti delle problematiche ambientali (Mina et al., 2023).

Il pensiero sociale può essere influenzato da molti fattori, in particolar modo dai bisogni, valori e disponibilità di ciascun utente, ma possono essere altrettanti i benefici che una comunità può trarre dall'IVF. Ad esempio, sistemi più grandi che si sviluppano in edifici urbani, permettono di riqualificare un quartiere, dando nuova vita ad aree inutilizzate sia esteticamente che socialmente. Tali zone potrebbero divenire modelli educativi per far analizzare e comprendere da vicino il ciclo vitale delle piante e come viene prodotto il cibo, in modo che le generazioni future siano educate ad una cultura di anti-spreco (Mina et al., 2023). Un'altra opportunità che può offrire l'avvento dell'IVF nelle città e nelle realtà domestiche della popolazione è una maggiore disponibilità di alimenti sani e privi di pesticidi o erbicidi, in quanto crescendo in ambiente chiuso è possibile controllare eventuali infestanti e si va a superare anche la stagionalità delle coltivazioni.

I vantaggi presi in analisi precedentemente della sostenibilità ambientale, i quali riguardano la riduzione in sfruttamento del suolo, consumo d'acqua ed emissione di gas serra, anch'essi vanno ad influire positivamente nell'impronta sociale dell'IVF.

Sebbene una percentuale in maggioranza approvino queste novità in campo alimentare, un 20-50% delle persone hanno risposto con incertezza/diffidenza sull'argomento IVF e un 30% si è dimostrato totalmente in disaccordo (Mina et al., 2023).

Tali riscontri dipendono, come per le opinioni positive, dalle attitudini, esperienze, dalla cultura del singolo, ma non solo. Come possono essere percepiti dei benefici, l'opinione pubblica è in grado di "scovare" dei possibili punti deboli dell'IVF ed avere quindi una visione dubbiosa se non addirittura avversa a riguardo.

Mina et al. (2023) dall'analisi che hanno effettuato della letteratura, hanno evidenziato nei consumatori una sorta di "*tecnofobia*", ossia un senso di discostamento da prodotti alimentari che derivano da processi artificiosi e ne evitano il consumo.

Le persone differiscono dall'adattarsi a queste tecniche innovative di coltivazione in quanto sono molto lontane dalle metodiche tradizionali ed abituati a quest'ultime non sentono la stessa "sicurezza" di alimentarsi con i prodotti che ne derivano.

Uno dei punti a favore dell'IVF è la maggiore disponibilità a livello quantitativo di cibo. Si presuppone che all'aumentare dell'offerta diminuirà il prezzo, ma non sempre è così. Da uno studio condotto da Broad (2020), è stato possibile riscontrare che i prodotti che derivano dall'IVF hanno prezzi tutt'altro che sostenibili e dunque escludono tutto quel target di consumatori che non hanno disponibilità economiche adeguate a questo tipo di prodotti. Tale ragionamento andrebbe fuori dalla definizione di sostenibilità sociale, ostacolando il concetto di equità e pari opportunità.

Per ultimo, un altro tema che può mettere in discussione lo sviluppo di fattorie verticali allocate in palazzi o edifici di una città, è la "*gentrificazione socioculturale*" di queste zone (Mina et al., 2023). L'effetto positivo è la riqualificazione dell'area interessata, ma tale migrazione si potrà estremizzare al punto di divenire un quartiere esclusivo, riservato ad un'élite di persone, con conseguente rincaro del costo d'acquisto degli immobili.

Dunque, l'IVF sembra promettere a livello sociale grandi cambiamenti che la società è pronta ad accogliere anche se con qualche riserbo, che forse con il tempo verrà risolto.

Capitolo 3

LIFE CYCLE ASSESSMENT: APPLICAZIONE AI SISTEMI INDOOR VERTICAL FARMING

3.1 Life Cycle Assessment (LCA): definizione, storia e metodo di valutazione

Il Life Cycle Assessment (LCA) permette di valutare il ciclo di vita di un prodotto o servizio. Questi vengono esaminati “dalla culla alla tomba”, cioè viene considerato l’impatto del ciclo di produzione nella sua interezza, a partire dalle materie prime fino ad arrivare allo smaltimento dei rifiuti (Klöpffer, 1997).

I concetti di sostenibilità applicati alle metodiche del LCA sono finalizzati ad uno sviluppo globale sostenibile. Questa transizione ecologica si basa su accordi globali ed europei che si sono incentrati sul tema della sostenibilità. Ad esempio, i 193 Paesi che fanno parte delle Nazioni Unite (ONU), il 15 settembre 2015 hanno deciso di accogliere all’unanimità “L’Agenda per lo sviluppo sostenibile” (camera.it), dove si sono impegnati, entro il 2030, a perseguire i 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (Sustainable Development Goals – SDGs) (camera.it), i quali toccano temi come povertà, fame, uguaglianza, salute e benessere, pace e gestione sostenibile dell’acqua, dello sviluppo economico e industriale e molti altri.

Successivamente, nel 2021 subentra il Green Deal, accordo preso tra gli Stati membri dell’Unione Europea con lo scopo di ridurre le emissioni ad un livello inferiore del 55% rispetto al 1990 entro il 2030, fino al raggiungimento di zero emissioni entro il 2050 (ec.europa.eu).

Da ciò si può dedurre che i vari continenti e Paesi sono focalizzati a promuovere politiche di sostenibilità; pertanto, numerose aziende e i governi stessi richiedono sempre più analisi specifiche che permettano di valutare l’impatto ambientale dei propri beni e servizi a lungo termine.

L’idea del LCA nasce attorno al 1970 e le prime ricerche erano volte alla comparazione di imballaggi che fossero più sostenibili a livello ambientale. In seguito, il SETAC-Europe (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) tra il 1990 e il 1993 diede la definizione attuale di LCA (Klöpffer, 1997). Grazie a vari studi e workshop diretti da varie organizzazioni, tra le quali spicca l’ISO (International Organization for Standardization), nel

1997 si determinarono le linee guida per l'applicazione del metodo LCA in maniera scientifica e standardizzata (Roy et al., 2009).

La normativa ISO 14040:2006 (EN) regola i principi e lo svolgimento del LCA. Quest'ultimo ha quattro fasi principali di processo (ISO, 2006):

1. **Fase di definizione degli obiettivi e del campo di applicazione:** vengono fissati lo scopo dell'analisi, il prodotto atteso, vengono delimitati anche i confini del sistema, i quali sono rappresentati da un diagramma di flusso che ne definisce gli input e output. Inoltre, in questa fase vengono specificati anche le ipotesi operative e l'unità funzionale (FU). FU stabilisce un'unità di riferimento alla quale vengono normalizzati i dati dell'inventario e la scelta di questo parametro viene fatta in base agli obiettivi della ricerca e a seconda della categoria di impatto ambientale (Roy et al., 2009).
2. **Fase di analisi dell'inventario:** Anche definita *Life Cycle Inventory (LCI)*. Durante questa fase viene effettuata una raccolta dati (inventario) in base a tutti gli input e output del sistema. È una fase essenziale dove vengono raccolte informazioni necessarie per lo svolgimento degli obiettivi di analisi (ISO, 2006).
3. **Fase di valutazione dell'impatto:** *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)* è la terza fase del LCA e consiste nel convertire la tabella LCI in impatti al fine di valutare nel complesso l'impatto ambientale del sistema (ISO, 2006).
4. **Fase interpretativa:** Nell'ultimo step vengono analizzati, discussi e rielaborati i risultati dell'analisi interpretando i dati raccolti nel LCI e LCIA (ISO, 2006).

3.2 Applicazione del metodo LCA su impianti IVF medio-grandi

Di seguito verrà riportato lo schema generale di un'analisi LCA di alcuni sistemi di IVF applicati nella produzione di vegetali destinati al consumo umano su media-larga scala.

Lo scopo della valutazione è quello di esaminare l'impatto ambientale dell'IVF. Lo studio viene eseguito prendendo in considerazione differenti parametri che definiscono l'impronta ecologica di tali sistemi. Gli indicatori ambientali che vengono impiegati maggiormente in questo studio sono: il cambiamento climatico (kg CO₂ eq/FU), l'efficienza energetica (kWh/FU), il consumo d'acqua (L/FU) e consumo di suolo (Pt/FU).

LCA viene generalmente effettuato "cradle-to-costumer" ossia letteralmente dalla culla al consumatore (Gargaro et al., 2024a) e viene studiato il processo produttivo a partire dall'impianto di VF, fino ad arrivare alla consegna dei prodotti al cliente. Entro tali limiti vengono compresi nello studio gli input e gli output del sistema: tutti i materiali e le risorse

necessarie allo svolgimento del processo produttivo, incluso l'edificio che accoglie l'impianto e le pratiche per la distribuzione del prodotto finito a rivenditori al dettaglio e consumatori, includendo le emissioni dirette del sistema (Gargaro et al., 2024a).

La Figura 9 rappresenta un esempio grafico di definizione dei confini di un sistema LCA. La rappresentazione tramite diagramma a blocchi dei vari input, output e dei processi produttivi permette maggiore chiarezza di quelli che sono i confini del sistema preso in analisi.

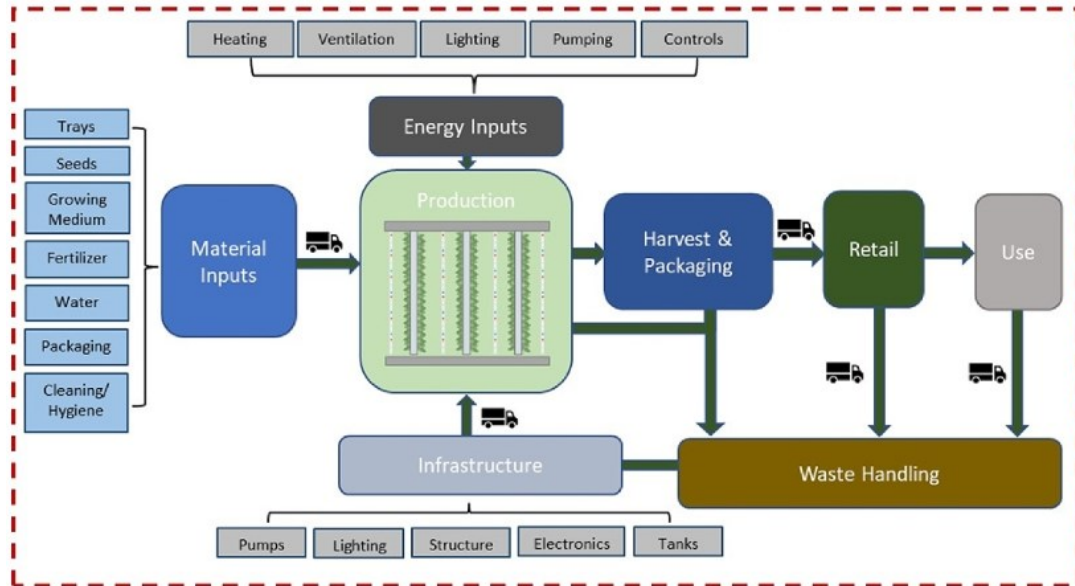


Figura 9: Esempio di rappresentazione grafica dei limiti di un sistema LCA.

(Martin et al., 2023)

Sommariamente i sistemi di IVF negli studi LCA si possono suddividere in tre fasi principali:

1. **Fase di produzione:** comprende le operazioni di semina e sviluppo delle piante all'interno della camera di crescita. Rientrano in tale fase gli input del sistema quali materiali di produzione (acqua, fertilizzanti, imballaggi, sementi, supporti di crescita, ecc.), input energetici e di infrastruttura stessi, che riguardano gli impianti di condizionamento, ventilazione, pompaggio della soluzione nutritiva e di illuminazione.
2. **Fase di raccolta e imballaggio.**
3. **Distribuzione:** il raccolto viene venduto al consumatore finale o presso la grande distribuzione.

Prima di prendere in esame i vari casi studio, è bene fare chiarezza a proposito della composizione dei sistemi di IVF. La descrizione di questi sistemi permette la comprensione

dell'influenza sui consumi (energetici, suolo, acqua, emissioni CO₂) in funzione della grandezza e della finalità dei vari apparati che compongono tale sistema produttivo. Indipendentemente dalla loro dimensione (media o grande), gli impianti di IVF sono costituiti da una grande camera di produzione che non comunicando con l'esterno permette di avere un monitoraggio costante dell'ambiente. Per tale motivo le camere sono munite di sistema di condizionamento e ventilazione, consentendo di regolare la temperatura interna e la qualità dell'aria.

Le camere, inoltre, ospitano gli impianti di coltivazione idroponica, i quali si sviluppano per verticalità. Infine, viene installato un sistema di illuminazione artificiale, che insieme all'impianto di pompaggio della soluzione nutritiva, concorre allo sviluppo delle piante.

3.2.1 *Descrizione dei casi studio in analisi*

I casi studio riportati in questo elaborato derivano dallo studio della letteratura trovata tramite differenti motori di ricerca e repository: Scopus, Research Gate, Google Scholar, Science Direct. L'intento è di fornire dati sulle “performance” ambientali dell'IVF, in modo da definire l'effettiva sostenibilità di questi sistemi valutando l'efficienza nell'impiego delle risorse e come variano i vari parametri in funzione dei fattori produttivi impiegati e delle dimensioni di questi impianti.

CASO STUDIO I: Ljusgård Vertical Farm (IVF-Svezia).

Il caso studio tratta un sistema di IVF situato a Tibro in Svezia. La fattoria verticale in questione si sviluppa su 7'000 m², di cui circa un 25% dell'intero lotto di produzione è impiegato come camera di crescita della vegetazione. Il restante 75% è costituito da una camera riservata alla corretta applicazione dei protocolli igienici per il personale e gli eventuali visitatori dell'impianto di produzione. Inoltre, è presente una “camera di germinazione” nella quale mediante una macchina seminatrice i vassoi con i plug vengono seminati ed irrigati. Le stanze di coltivazione della *Ljusgård Vertical Farm* sono dotate di 8'200 tubi verticali (growpipes) che includono il sistema di irrigazione a goccia, connessione ai binari, ventilazione e LED per tutti i vassoi presenti nell'impianto. L'azienda è munita anche di robot che facilitano lo spostamento dei vassoi.

Durante l'anno 2022, sono stati prodotti 520 t di lattuga, destinata ad essere confezionata e distribuita ad oltre 500 negozi tra la regione di Stoccolma e Göteborg (Martin et al., 2023).

Annualmente tale impianto impiega 5'160'000 kWh e le fonti energetiche alle quali attinge l'*IVF-Svezia* fanno parte del “mix energetico svedese” (SEA, 2021), il quale si compone in prevalenza di energia nucleare (41%), idroelettrica (39%), eolica (10%). Le percentuali minori

riguardano l'energia solare (1%) e la cogenerazione di energia e calore (9%), una tecnica di produzione energetica che permette di produrre energia meccanica, solitamente trasformata in elettrica e termica (enelx.com) (Martin et al., 2023).

CASO STUDIO II: UK Vertical Farm (IVF-UK)

In questo secondo caso studio è stata effettuata un'analisi LCA di un impianto di IVF situato nel Regno Unito. L'*IVF-UK* è operante nel settore alimentare nella produzione di lattuga, la quale viene commercializzata nel mercato della ristorazione inglese (Gargaro et al., 2024a).

L'azienda si sviluppa complessivamente su 238 m² e comprende uffici, magazzini, sale per l'imballaggio dei prodotti ecc. Rispetto al totale della superficie 150 m² sono occupati dalla camera di crescita con coltivazione idroponica, la quale si sviluppa su quattro ripiani.

Le fasi che compongono il sistema in analisi sono: arrivo degli input, coltivazione delle colture di lattuga, raccolta, pulizia e confezionamento del prodotto, consegna degli output.

Lo studio dell'impronta ambientale del sistema *IVF-UK* si riferisce all'unità funzionale (UF) di 1 kg di raccolto; dunque, i consumi e i dati LCI presi in esame sono rapportati a questa quantità. Sono inclusi nella valutazione anche il processo di produzione delle sementi, le quali sono acquistate da un'azienda specializzata del Regno Unito.

La fase di produzione della lattuga richiede il 91% della domanda elettrica in particolare comprende l'illuminazione LED e il sistema di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC). Il restante 10% di elettricità viene richiesto dagli uffici.

La domanda elettrica è soddisfatta dall'impiego di energia 100% rinnovabile a garanzia del fornitore dal quale *IVF-UK* si rifornisce, il quale specifica come energia eolica (Gargaro et al., 2024).

CASO STUDIO III: Fattoria Verticale in Giappone (PFAL-Japan)

Si tratta di una fattoria verticale installata presso l'Università di Chiba nella città di Kashiwa, Giappone. L'impianto è stato costruito a scopo dimostrativo e di valutazione delle prestazioni, in modo da poterne implementare l'efficienza operativa.

La camera di crescita della *PFAL-Japan* si sviluppa su 338 m² e si organizza in 10 ripiani di coltivazione idroponica di lattuga e la schiuma uretanica flessibile viene impiegata come substrato di crescita delle piante. L'intera struttura occupa una superficie di 406 m² dove sono presenti anche uffici e stanze adibite al packaging dei vegetali destinati al consumo. Durante

il periodo preso in esame (23 mesi), l'impianto ha prodotto 45 t di *Lactuca sativa*, consumando circa 1'731'725 kWh di energia.

Le fonti energetiche impiegate appartengono al “mix energetico giapponese” della Tokyo Electric Power Company del 2013, il quale adotta soprattutto combustibili fossili e gas naturale (www.rinnovabili.it) (Kikuchi et al., 2018).

CASO STUDIO IV: IVF con produzione di broccoli microgreens in Portogallo (IVF-Portogallo)

Sono state studiate le performance ambientali di un altro esempio di agricoltura urbana indoor. Tale analisi viene definita “prospettica” in quanto la struttura, nel periodo di riferimento, non era in funzione. Lo scopo, infatti, è di esaminare la sostenibilità di un futuro impianto che sarà attivo all'interno di un campus universitario presso Lisbona, in Portogallo.

L'*IVF-Portogallo* si occuperà prevalentemente della produzione di broccoli microgreens (*Brassica oleracea*), i quali saranno direttamente disponibili al consumo nella mensa del campus.

La camera di crescita occuperà 32 m² e sarà organizzata in 8 scaffali, ognuno munito di 5 ripiani (4 di coltivazione e un livello di germinazione). I 40 ripiani sono collegati ad un sistema idroponico di “flusso e riflusso” (*Ebb and Flow*) e ad un sistema di illuminazione artificiale. Ogni livello di coltivazione è in grado di ospitare 4 vassoi di coltivazione, 5 luci LED e l'impianto di climatizzazione.

L'illuminazione artificiale sarà attiva per tutto il fotoperiodo delle piante, che in questo caso viene fissato per 14 ore al giorno.

A pieno regime si stima che l'azienda portoghese sia in grado di coltivare circa 126 vassoi a settimana e 18 vassoi seminati al giorno. Nello specifico le sementi di broccoli microgreens vengono fatte germogliare nel livello inferiore in assenza di luce per 7 giorni, successivamente i vassoi si spostano ai livelli con illuminazione LED per altri 7 giorni, tempo necessario per il completo sviluppo di questa coltura.

Questo sistema di IVF è collegato ad un software (IoT) con finalità di controllo e monitoraggio della temperatura, umidità relativa, anidride carbonica, acqua e nutrienti.

Dunque, la produzione annuale di *IVF-Portogallo* viene stimata a 2'700 kg, con una richiesta mensile di energia di circa 4'620 kWh (Parkes et al., 2022).

Le fonti energetiche utilizzate in questo caso studio risalgono al “mix energetico” portoghese dell'anno 2018, il quale impiegava prevalentemente fonti non rinnovabili (Parkes et al., 2022).

3.3 Confronto dei casi studio mediante indicatori ambientali

3.3.1 Indicatore del Cambiamento Climatico ($\text{kg CO}_2\text{-eq kg}^{-1}\text{ FW}$)

L'impatto ambientale dei dispositivi di IVF può essere valutato a partire ad esempio dal parametro del Cambiamento Climatico. L'indicatore del *Climate Change* studia le emissioni in kg di CO_2 su kg di prodotto, consentendo di valutare uno degli aspetti principali dell'impronta ecologica della produzione di vegetali destinati al consumo umano in sistemi di agricoltura verticale.

Il valore delle emissioni di gas serra viene influenzato da molti fattori, a partire dalle fasi che vengono prese in considerazione nell'analisi, fino alle scelte delle varie procedure operative che compongono questi sistemi e alle assunzioni delle analisi LCA.

Nel dettaglio in tutti e quattro i casi studio elencati precedentemente l'elemento comune, che apporta variazioni determinanti a livello quantitativo delle emissioni di GHG, è sicuramente l'approvvigionamento energetico utilizzato in tali sistemi. L'energia, infatti, da come può essere facilmente intuibile dalla struttura e funzionamento dei sistemi di IVF, è una risorsa essenziale per questo tipo di coltivazione e la decisione aziendale a proposito delle risorse energetiche impiegate è fondamentale per quanto riguarda i consumi, costi e gli eventuali effetti ambientali.

A dimostrazione di ciò, nei vari studi che sono stati portati in evidenza nel seguente elaborato sono presenti differenti scelte energetiche, le quali hanno dimostrato questo legame con la variazione dei singoli indicatori ambientali e dunque del risultato dello studio LCA. Ad esempio, nel primo caso studio che tratta dell'impianto *IVF-Svezia*, dallo studio LCA effettuato sullo scenario base descritto nel *Capitolo 3.2.1* del lavoro in questione, l'impianto risulta avere emissioni di GHG del valore di circa $0.98 \text{ kg CO}_2\text{-eq kg}^{-1}\text{ FW}$. Tali emissioni si potrebbero ridurre fino a circa $0.75\text{-}0.77 \text{ kg CO}_2\text{-eq kg}^{-1}\text{ FW}$ nel caso in cui l'azienda decida di adottare strategie energetiche 100% rinnovabili, quali eolico o idroelettrico, che permettono di risparmiare l'uso di risorse fossili (Martin et al., 2023).

L'elettricità contribuisce di un 46% sull'impatto ambientale del sistema *IVF-Svezia*, classificandosi come maggiore percentuale di influenza in questo indicatore. Ciò è dovuto sia ad un'alta richiesta di energia per l'impianto di illuminazione LED, che per il sistema di HVAC, il quale potrebbe essere ottimizzato nei consumi grazie al recupero del calore residuo emesso dai LED (Martin et al., 2023).

Un altro fattore riscontrato dall'azienda svedese è il trasporto dei materiali e dei prodotti finiti (input e output) all'interno e all'esterno del sistema, il quale contribuisce per un 18% nell'indice del cambiamento climatico. Ciò è dovuto all'ipotesi che tutti i trasporti sono

avvenuti con mezzi che impiegano combustibili fossili come carburanti. Includere biocarburanti quali biodiesel e olio vegetale idrotrattato (HVO) nella logistica permetterebbe di attenuare tale problematica (Martin et al., 2023).

Il packaging in polietilene (PE) del prodotto finito influenza del 17% il cambiamento climatico di *IVF-Svezia*, ma i risultati in questione sono ancora poco precisi. Durante lo studio si è ipotizzato che solo il 50% dell'imballaggio totale viene riciclato e la restante metà viene incenerita. Avendo informazioni limitate sulle abitudini di riciclo dei consumatori in Svezia, i dati si sono basati prevalentemente sui tassi di riciclo di altre plastiche diverse dal PET (Polietilene Tereftalato) e lo smaltimento di queste risulta avere una percentuale bassa in questo Paese (Martin et al., 2023).

Anche il caso studio *IVF-UK* sostiene il concetto di riduzione delle emissioni di GHG utilizzando energia 100% rinnovabile e riducendo il valore di tali emissioni di sei volte rispetto all'utilizzo di una fornitura energetica appartenente al cosiddetto "mix energetico britannico 2022", il quale farebbe salire l'impatto sul cambiamento climatico di tale impianto a 4.32 kg CO₂-eq kg⁻¹ FW. Usufruendo unicamente di fonti energetiche rinnovabili, il valore di questo indicatore ambientale sarebbe di circa 0.75 kg CO₂-eq kg⁻¹ FW, dimostrandosi anche come l'impianto di IVF con il minor contributo alle emissioni di GHG tra le opzioni comparate in quest'analisi (Gargaro et al., 2024) (*Tabella 3-2*).

Ugualmente nell'azienda britannica, la domanda elettrica si dimostra come maggior contributo al *Climate Change* (40%), seguita dal 18% per la produzione di tappi in fibra di juta come substrato di crescita, i quali richiedono un processo più elaborato con dispendio di risorse esauribili (Gargaro et al., 2024a).

I valori risultano molto più alti nel caso della *PFAL-Japan* dove le emissioni sono circa 25 kg CO₂-eq kg⁻¹ FW. Tale esito è conseguenza di elementi come risorse energetiche di derivazione fossile e dunque non rinnovabili e l'impiego di luci fluorescenti nell'impianto di illuminazione. Si è dimostrato che implementando anche solo il fattore dell'illuminazione, andando a sostituire l'impianto in funzione con luci a LED, si andrebbe ad aumentare non solo in efficienza e durabilità della produzione, ma i LED consentono un consumo energetico ridotto, tale da limitare di un 16,6% in meno il contributo dell'illuminazione nell'emissione di GHG (Kikuchi et al., 2018).

Allo stesso modo nello scenario di *IVF-Portogallo* la produzione e l'uso di energia elettrica è responsabile del 54% dell'intero impatto ambientale dell'impianto, per il quale ogni kg di FW determina un impatto di circa 18.6 kg CO₂-eq kg⁻¹ di GHG (Parkes et al., 2022). Insieme alla domanda energetica, l'impianto portoghese ha evidenziato un contributo rilevante nel

Global Warming Potential (GWP) da parte della produzione delle sementi e con il 22% sul totale del GWP, si classifica come secondo contributo alle emissioni di GHG. È un fattore che non viene preso in considerazione in altri studi, ma che in questo caso ha portato alla luce degli errori asimmetrici dovuti all'utilizzo di "proxy", ossia dati approssimativi quali sementi di altre cultivar, che vengono impiegati per la valutazione dell'impatto ambientale. Essendo di altre specie non è sempre possibile la comparazione, in quanto sono presenti differenze in peso, dimensioni e densità delle sementi stesse. L'*IVF-Portogallo* si occupa della produzione di broccoli microgreens che possono essere facilmente paragonabili a germogli piuttosto che piante mature. Dunque, le emissioni di GHG dovute alla produzione di sementi sono, in un certo senso, "diluite" in una quantità minore di raccolto, aumentando di conseguenza questo indicatore (Parkes et al., 2022).

Per studi LCA futuri sarebbe interessante valutare l'influenza della produzione delle sementi nel GWP e definire dati di paragone più accurati per tale comparazione.

In definitiva, i casi *IVF-Svezia* e *IVF-UK* dimostrano che l'adozione di energie rinnovabili, quali eolico, solare e idroelettrico, consentirebbe di ridurre in modo significativo le emissioni di GHG, migliorando la sostenibilità dei sistemi di coltivazione verticale.

Di contro, *PFAL-Japan* e *IVF-Portogallo* presentano indicatori del Cambiamento Climatico molto più alti rispetto ai sistemi precedenti e le ragioni principali di questa differenza risiedono nell'uso di fonti energetiche non rinnovabili e di tecnologie poco performanti, nel caso di *PFAL-Japan*. La problematica del *IVF-Portogallo* è principalmente l'elevato consumo di energia elettrica, il quale potrebbe essere in parte attenuato con migliorie nei tempi di esposizione delle piante all'illuminazione artificiale (LED) e maggiore efficienza nei valori di energia termica ricevuta per metro quadro (Parkes et al., 2022).

3.3.2 Indicatore del consumo idrico o Water Use ($m^3\ kg^{-1}\ FW$)

Tendenzialmente i sistemi di IVF permettono una gestione sostenibile dell'acqua fresca impiegata nella produzione di vegetali. Tutto ciò si realizza attraverso l'applicazione di tecnologie e metodiche agricole innovative, con le quali è possibile ridurre l'impiego d'acqua di un 60-70% in meno rispetto ai sistemi tradizionali di coltivazione (Despommier, 2019).

Tuttavia, è importante la valutazione del parametro idrico in questo studio in quanto consente di considerare quali sono i fattori che variano tale indicatore ambientale e trarre conclusioni su come potrebbe essere massimizzata l'efficienza nei consumi idrici di questi impianti. L'indice del consumo idrico viene misurato tramite m^3 o L d'acqua su kg^{-1} di prodotto fresco raccolto. Nella seguente analisi i dati verranno descritti mediante la prima unità di misura.

Dal confronto dei dati presenti in *Tabella 3-2*, spiccano in valori di consumi idrici gli impianti *IVF-Svezia* e *IVF-UK*, con rispettivamente 2.3 e 0.73 m³ kg⁻¹ FW (Gargaro et al., 2024b; Martin et al., 2023). Nell'ottenimento di questi risultati entrano in gioco differenti aspetti che hanno influenza nei parametri analizzati. Analogamente all'indicatore del cambiamento climatico, il consumo idrico dei sistemi di IVF viene condizionato soprattutto dalle risorse energetiche alle quali gli impianti in questione attingono.

L'azienda svedese, tra le altre, detiene il valore maggiore e ciò che condiziona principalmente tale parametro è ancora una volta la domanda energetica, che rappresenta il 74% sul totale del WU (Martin et al., 2023). L'approvvigionamento energetico di *IVF-Svezia* prevede l'impiego di un 50% circa di fonti rinnovabili, le quali richiedono nella maggior parte dei casi un minore dispendio energetico e consumo idrico nella produzione (Martin et al., 2023). Un'eccezione è rappresentata dall'energia idroelettrica, la quale è a tutti gli effetti una fonte energetica 100% rinnovabile, ma la produzione della stessa richiede un quantitativo superiore d'acqua rispetto ad altre fonti *Green*. Questo è il caso di *IVF-Svezia* che impiega circa un 39% di energia idroelettrica sul totale dell'approvvigionamento, la quale va inevitabilmente a gravare sui consumi idrici del sistema (Martin et al., 2023).

Ciò non si verifica nella *IVF-UK* dove l'indicatore del WU viene influenzato in percentuale maggiore (44%) dalla lavorazione e impiego dei tappi di juta, i quali fungono da sostegni per l'apparato radicale della pianta (Gargaro et al., 2024). Tuttavia, in commercio sono disponibili differenti materiali di substrati di crescita: fibra di cocco, lana di roccia, canapa o perlite, che svolgono la stessa funzione della fibra di juta, ma in modo più sostenibile abbassando i consumi idrici ed emissioni di CO₂ (Gargaro et al., 2024).

Il sistema *IVF-Portogallo* con 0.167 m³ kg⁻¹ FW, detiene uno dei valori minori in WU. A tale risultato potrebbe contribuire l'implementazione ad un sistema IoT, il quale consente il controllo dei nutrienti disciolti in soluzione, riducendo al minimo le perdite dovute al "risciacquo" (Parkes et al., 2022). Ciò che si va a monitorare sono i livelli di conducibilità elettrica o conduttività idrica, un parametro che permette di determinare la quantità di sali disciolti nell'acqua. Quest'ultimi possiedono per natura cariche negative e positive, permettendo il passaggio della corrente nella soluzione stessa (www.pnrr.salute.it). Quindi, misurare la conducibilità dell'acqua significa rilevare le cariche presenti in soluzione.

Per concludere, *PFAL-Japan* con 5.2 m³ d'acqua su kg FW è il sistema con minor consumo idrico rispetto ai precedenti (Kikuchi et al., 2018), conseguenza del fatto che l'acqua di evapotraspirazione viene recuperata attraverso il sistema di condizionamento dell'aria, per essere rimessa in circolo successivamente (cosiddetta *acqua verde*) (Kikuchi et al., 2018).

La scelta delle risorse energetiche e le decisioni operative in base ai materiali impiegati sono risultati determinanti nei consumi idrici. Dunque, ottimizzare l'uso delle risorse disponibili ed implementare un sistema di rilevazione delle concentrazioni dei nutrienti consentirebbe un risparmio idrico non indifferente.

3.3.3 Indicatore del consumo specifico di energia ($kWh\ kg^{-1}\ FW$)

Valutare i consumi specifici di energia degli impianti IVF permette di esprimere quanto efficacemente un sistema utilizza energia (kWh) per produrre un determinato output ($kg\ FW$).

Il calcolo di questo parametro consente di apprendere anche l'efficienza energetica di un impianto di IVF e dunque formulare un giudizio sul rendimento di questo. In termodinamica la definizione di rendimento (η) viene espressa come rapporto tra il “lavoro meccanico” compiuto da un'ipotetica macchina e il “calore assorbito”. Tale rapporto consente di definire se l'energia in entrata (kWh) è stata utilizzata in modo più o meno ottimale al fine dello svolgimento di un “lavoro”, ossia quanto prodotto fresco si ricava dalla produzione.

Questo indicatore come i precedenti permette la comparazione dei vari sistemi con l'obiettivo di descrivere le varie scelte operative adottate nell'IVF ed individuare i punti di forza, gli eventuali *hotspots* e quali potrebbero essere le strategie di implementazione di tali impianti.

In relazione alla *Tabella 3-2*, i sistemi *IVF-Svezia* e *IVF-UK* rappresentano un consumo specifico di energia inferiore rispetto a *IVF-Portogallo* e *PFAL-Japan*.

L'azienda *IVF-Svezia* impiega quasi quattro volte meno dell'azienda giapponese in termini di energia per produrre un kg di lattuga e con $10\ kWh\ kg^{-1}\ FW$ è il sistema con il consumo specifico più basso tra i casi studio in analisi (Kikuchi et al., 2018; Martin et al., 2023).

Questo risultato è indice di un impiego ottimizzato delle disponibilità dell'azienda, specificatamente degli input energetici. L'energia è una risorsa non poco rilevante nei sistemi di IVF; dunque, massimizzarne l'impiego vorrebbe dire non solo aumentare il rendimento aziendale e di produzione, ma andare a diminuire impatti che sono correlati indirettamente con tale input (ad esempio emissioni di GHG).

Nel caso di *IVF-Svezia*, l'azienda usufruisce di un approvvigionamento energetico con circa il 50% di fonti rinnovabili che combinato ad un impianto di illuminazione LED permette un consumo inferiore, maggiore efficienza, durabilità e modulazione della luce.

Allo stesso modo, è ciò che si verifica nel sistema *IVF-UK*, il quale impiega $17.25\ kWh$ di energia per $kg\ FW$ (Gargaro et al., 2024). Le condizioni di questo caso studio sono analoghe all'azienda svedese se non che *IVF-UK* impiega solo fonti energetiche al 100% rinnovabili, che hanno fatto aggiudicare il primato in impatto ambientale con il più basso valore di

emissioni GHG tra gli altri casi studio. Una differenza non di poco conto da tenere in considerazione è la dimensione aziendale tra i due sistemi di IVF. In riferimento alla *Tabella 3-1* è possibile apprezzare l'estensione dei vari impianti e *IVF-UK* è più di 10 volte inferiore a dimensioni rispetto *IVF-Svezia*. Ciò rappresenta un importante fattore che va a favore dell'efficienza energetica degli impianti più grandi in quanto sono in grado di sfruttare il principio delle “economie di scala” o “rendimenti di scala crescenti” (www.treccani.it). Il concetto di “economia di scala” si basa sulla diminuzione dei costi medi sul lungo periodo all'aumentare della quantità prodotta. Questo rapporto inversamente proporzionale dei costi e produzione può essere facilmente paragonato ai consumi energetici e alla dimensione produttiva dell'azienda. Per sistemi IVF su larga scala, è possibile implementare la produzione riducendo i vari input, in quanto il “lavoro” si ridistribuirebbe in modo più uniforme ed efficiente, e sarebbe “giustificato” oltretutto l'impiego di tecnologie operative avanzate rispetto ad impianti di dimensioni ridotte.

Ed è anche per questa motivazione che il consumo specifico di *IVF-Portogallo* aumenta rispetto ai precedenti impiegando 23.77 kWh kg⁻¹ FW (Parkes et al., 2022).

Seguendo il concetto di “economia di scala”, il valore in consumo specifico non dovrebbe risultare inferiore al sistema *PFAL-Japan*, che è secondo per dimensioni sono all'*IVF-Svezia*.

Il caso giapponese, concorde con gli elevati valori nell'indicatore del GWP, possiede un consumo energetico specifico di 38.5 kWh su kg di lattuga fresca (Kikuchi et al., 2018).

Valori così elevati in consumi sono dovuti al largo impiego di risorse energetiche non rinnovabili e di un impianto di illuminazione con luci fluorescenti, le quali determinano un consumo molto elevato di energia. I risultati potrebbero essere mitigati mediante integrazione di tecnologie innovative e di risorse rinnovabili (Kikuchi et al., 2018).

L'applicazione di un *setup* aziendale più avanzato rispetto allo scenario *PFAL-Japan* ha consentito ai sistemi *IVF-UK* e *IVF-Portogallo* delle prestazioni maggiori, le quali possono essere migliorate mediante implementazione di risorse energetiche rinnovabili ed ottimizzando il processo produttivo.

3.3.4 Indicatore dell'uso del suolo o Land Use (m² kg⁻¹ FW)

Il vertical farming per definizione permette di svilupparsi in verticalità, risparmiando superficie e tutti gli svantaggi e danni che possono derivare dallo sfruttamento del suolo.

La comparazione dell'indicatore del Land Use (LU) nei sistemi di IVF studiati consente di valutare non solo la conservazione del suolo, ma l'efficienza nell'uso di quest'ultimo e dunque le migliori combinazioni per poterne valorizzare l'impiego di questa risorsa esauribile.

Tra i casi studio in analisi l'impatto più elevato in LU appartiene al sistema *IVF-UK* ($0.23 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ FW}$), dove la produzione di fibra in juta per i substrati di crescita e in minima parte l'uso di elettricità hanno contribuito a tale indicatore (Gargaro et al., 2024). L'elettricità come la fibra di juta, seppur derivando da fonti 100% rinnovabili, richiede un impiego di suolo che non può essere trascurabile nel calcolo di questo indicatore, che resta comunque minore dell'impatto nell'uso di risorse fossili.

Un effetto positivo sul LU è stato riscontrato dal riciclaggio dei rifiuti cartacei da parte dell'azienda britannica, che grazie all'integrazione nelle pratiche aziendali di questo processo consente di ridurre la domanda di materie prime e in sfruttamento del terreno di $2.4 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ FW}$ (Gargaro et al., 2024).

I valori in LU di *IVF-Portogallo* e *PFAL-Japan* (rispettivamente $1.2 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ FW}$ e $7.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ FW}$) sono prevalentemente influenzati dall'approvvigionamento energetico di origine prettamente fossile (Kikuchi et al., 2018; Parkes et al., 2022).

IVF-Svezia con $3.27 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ FW}$ presenta l'indice minore in LU (Martin et al., 2023). Questo valore viene influenzato per l'84% sul totale del LU dall'energia impiegata, la quale deriva per metà da fonti non rinnovabili (Martin et al., 2023). Un altro 10% del LU è dato dal trasporto della lattuga fresca nei vari punti vendita, utilizzando automezzi che impiegano combustibili fossili (Martin et al., 2023).

Oltre a questi aspetti, il concetto che viene riportato nuovamente dai dati nell'uso di suolo della *Tabella 3-2* è quello delle "economie di scala" e dunque delle dimensioni degli impianti. Infatti, dall'impianto di maggiori dimensioni (*IVF-Svezia*) fino all'impianto con dimensioni minori (*IVF-Portogallo*), i valori nel LU sono pressoché decrescenti. Ciò è a dimostrazione del fatto che sistemi di IVF su larga scala consentono di ottimizzare l'uso del terreno massimizzando la produzione e quindi aumentando la resa per metro quadro.

Nel complesso incentrare la coltivazione di vegetali destinati al consumo umano in sistemi di coltivazione intensiva indoor, i quali sfruttano lo spazio per verticalità e magari concedendo nuova vita ad infrastrutture inutilizzate, con preferenza in un approvvigionamento energetico *Green*, consente di avere un uso efficiente del suolo.

Tabella 3-1: Raccolta dati dei casi studio a confronto. Vengono evidenziati la cultivar, la superficie (m^2), la produzione Fresh Weight (kg)/anno, il tempo entro il quale viene effettuata l'analisi LCA e l'input energetico annuo (kWh).

	Cultivar	m^2	FW (kg) y^{-1}	Tempo	Energia (kWh) y^{-1}
<i>IVF-Svezia</i>	<i>Lettuce</i>	1'700	520'000	1 anno	5'160'000
<i>PFAL-Japan</i>	<i>Lettuce</i>	338	45'000	1 anno	1'731'725
<i>IVF-UK</i>	<i>Lettuce</i>	150	n.d.	n.d.	n.d.
<i>IVF-Portogallo (prototipo)</i>	<i>Broccoli microgreens</i>	32	2'700	1 anno	64'179

Tabella 3-2: Raccolta dati LCIA dei casi studio presi in analisi, con precisazione sul mix energetico impiegato dai vari impianti (Mix E). Indice del cambiamento climatico ($kg\ CO_2\text{-eq}\ kg^{-1}\ FW$), consumo idrico o Water Use ($m^3\ kg^{-1}\ FW$), consumo specifico di energia o Consumi E ($kWh\ kg^{-1}\ FW$), uso del suolo o Land Use ($m^2\ kg^{-1}\ FW$).

	Mix E	GHG	Water Use	Consumi E	Land Use
<i>IVF-Svezia</i>	41% nucleare, 9% CHP, 50% rinnovabile	0.98	2.3	10	3.27×10^{-3}
<i>PFAL-Japan</i>	Alta % combustibili fossili	25	5.2×10^{-2}	38.5	7.5×10^{-3}
<i>IVF-UK</i>	100% rinnovabile	0.74	0.73	17.25	0.23
<i>IVF-Portogallo (prototipo)</i>	Alta % combustibili fossili	18.6	0.167	23.77	1.2×10^{-2}

Capitolo 4

IMPATTO AMBIENTALE DEI SISTEMI DI DOMESTIC VERTICAL FARMING

Le Domestic Vertical Farming o Home Indoor Cultivator (HIC) rappresentano i sistemi “casalinghi”, di dimensioni ridotte. In letteratura sono presenti molti studi eseguiti su impianti di IVF di medio-grandi dimensioni che, come si è riportato nel capitolo precedente, trattano prevalentemente la sostenibilità ed analisi LCA. Queste fattorie verticali costituiscono degli impianti di coltivazione intensiva di vegetali in palazzi e edifici, rappresentando su larga-scala delle vere e proprie “fabbriche di piante” destinate alla distribuzione e vendita su larga scala. Impianti di tali dimensioni sono in attività in paesi come Giappone, America, Regno Unito, Svezia (Kalantari et al., 2018) e perciò le ricerche che si stanno svolgendo sono indispensabili al fine di mettere in rilievo eventuali punti deboli ed opportunità nell’IVF, così da favorire il progresso tecnologico in campo agro-alimentare ed assicurare quindi un futuro sempre più improntato alla sostenibilità.

Nell’ultimo periodo l’attenzione sembrerebbe spostarsi in particolar modo verso sistemi più piccoli e “compatti” e capaci di adattarsi agli ambienti più disparati: dalla casa fino a rispondere alle diverse esigenze della ristorazione. I dispositivi possono essere dei semplici “smart garden”, i quali occupano la grandezza di un ripiano di scaffale, o dispositivi a parete che danno spazio a più tipi di colture (erbe aromatiche, fiori, pomodori e vegetali a foglia larga).

Il crescente interesse per il cibo sano e a km zero ha portato molte aziende e startup ad investire e promuovere l’agricoltura domestica come soluzione futura di sostenibilità, non più incentrata sulla distribuzione e vendita al dettaglio. Non essendoci ad oggi studi sufficienti che possano suffragare quest’ultima affermazione, sembrerebbe al momento solo una strategia commerciale definirli tali.

L’assenza in letteratura di analisi LCA su impianti domestici non permette una valutazione accurata di tali sistemi mediante l’applicazione di indicatori ambientali (emissioni di GHG, consumi idrici, consumi energetici, sfruttamento del suolo). Applicare un approccio comparativo può evidenziare le criticità e le potenzialità del DVF contribuendo ad indirizzare futuri sviluppi tecnologici.

In questo capitolo verrà effettuato un paragone tra le varie dimensioni di produzione e gli input necessari per il domestic farming, al fine di ottenere un'analisi seppur “superficiale” sulle prestazioni ambientali dell'agricoltura verticale domestica, ma basata su informazioni oggettive.

4.1 Analisi della sostenibilità di sistemi di Domestic Vertical Farming

L'analisi comprende sistemi di DVF presenti in letteratura e un sistema *smart garden* in commercio. Questi ultimi verranno comparati con alcuni degli impianti di IVF descritti nel Capitolo precedente (Capitolo 3.2.1 e 3.3). A scopo comparativo sono presenti in tale valutazione anche due esempi di agricoltura tradizionale, i quali riguardano sistemi di coltivazione con metodiche classiche.

Nello specifico *OF-Conventional* e *OF-Organic* sono due sistemi agricoli, presenti in letteratura, i quali rappresentano un esempio di coltivazione in pieno campo di lattuga e sono stati valutati con i rispettivi indicatori ambientali. Il primo, *OF-Conventional*, è un sistema “standard”, mentre *OF-Organic* è un sistema di coltivazione sempre in pieno campo ma biologico (Jensen et al., 2024; Paturu & Varadarajan, 2024). Tale confronto permetterà anche di prendere in considerazione le differenze tra consumi ed impieghi delle risorse di queste differenti tecniche agricole.

4.1.1 Descrizione degli impianti di DVF e confronto con impianti medio-grandi

Gli impianti di DVF presi in esame in questo studio sono: *GrowOff-Lettuce*, *DVF-Univpm* e *Click&Grow*⁹.

La *GrowOff-Lettuce* è un sistema modulare sviluppato dall'azienda Grönska Stadsodling a Stoccolma, in Svezia. Rappresenta un “armadietto” che permette di coltivare vegetali in sistemi idroponici domestici. Essendo progettato per differenti ambienti, è presente in varie attività commerciali in Svezia come ristoranti, caffetterie e supermercati. Inoltre, gli impianti sono dotati di un *cloud-based server* e di un'applicazione (sistema IoT), i quali permettono un monitoraggio e una raccolta dati delle condizioni di crescita del dispositivo *GrowOff-Lettuce* e consentono sia al fruitore finale che al fornitore (Grönska) di tenere traccia dei fattori di sviluppo (Martin et al., 2024).

Il secondo caso in analisi nei sistemi domestici è la *DVF-Univpm*, dove Brunetti et al. (2024) hanno studiato prevalentemente i consumi energetici di dispositivi domestici per l'agricoltura verticale. Anch'essi sono commercializzati sul mercato europeo con lo scopo di

avere vegetali direttamente usufruibili presso cucine di hotel o ristoranti, ma anche in abitazioni disponibili ad accogliere questi impianti.

Lo studio di quest’ultimo è stato svolto presso l’Università Politecnica delle Marche (Ancona) riportando dati a proposito delle dimensioni, funzionamento e prestazioni (Brunetti et al., 2024).

Click&Grow rappresenta un esempio in commercio di *smart garden*, che sta spopolando sempre più nei mercati internazionali. È un impianto idroponico modulare che si adatta in particolar modo ad un ambiente casalingo, con possibilità di collocazione anche in appartamenti di metratura modesta.

La Click&Grow è un’azienda estone nata nel 2009, che si occupa della produzione di “mini serre” specializzate nella coltivazione di erbe e verdure in casa (www.repubblica.it).

The Wall Farm Indoor Vertical Garden può ospitare 51 “cialde” con i corrispettivi terreni di coltivazione (eu.clickandgrow.com), i quali possiedono dei biopolimeri che si modificano a seconda della coltivazione in sviluppo, rilasciando la quantità di nutrienti necessaria alla pianta stessa (www.repubblica.it). Il sistema *Click&Grow* è costituito da un impianto luci a LED, dei supporti dove alloggiano i substrati di crescita/cialde e un serbatoio dal volume di 35 L. Il metodo di coltivazione è idroponico, nello specifico viene applicata la tecnica del *Wick System*, dove l’acqua viene assorbita dallo stoppino e per capillarità andrà ad umidire il substrato di crescita, il quale a sua volta rilascerà i nutrienti e adatterà le condizioni ottimali di crescita (eu.clickandgrow.com).

Tabella 4-1: Raccolta dati dei sistemi di DVF. Vengono specificati le cultivar, superficie (m^2), Fresh Weight ($kg\ y^{-1}$), tempo di analisi ed energia ($kWh\ y^{-1}$) nel tempo di analisi.

	Cultivar	m^2	FW ($kg\ y^{-1}$)	tempo	E ($kWh\ y^{-1}$)
<i>GrowOff-Lettuce</i> (Martin et al., 2024)	<i>Lactuca sativa</i>	0.8712	240	1 anno	3'540
<i>DVF-Uni</i> (Brunetti et al., 2024)	<i>Lactuca sativa</i> L. cv. Albarossa	1.155	14.6	1 anno	1'560
<i>Click&Grow</i> (eu.clickandgrow.com)	<i>Lactuca sativa</i>	0.54	51	1 anno	691.2

I dati presenti nella *Tabella 4-1* derivano dalla letteratura in merito ai sistemi *GrowOff-Lettuce* e *DVF-Uni* (Brunetti et al., 2024; Martin et al., 2024).

Nello specifico il sistema *DVF-Univpm* viene preso in analisi per un periodo di 75 giorni; dunque, i dati presenti in letteratura sono stati rapportati ad un periodo di analisi di un anno. Durante i 75 giorni l'energia media impiegata da *DVF-Univpm* è di 130 kWh mensili, mentre il prodotto fresco ottenuto da otto tagli di raccolta è di circa 3.04 kg, avendo una resa produttiva di $2'636 \text{ g m}^{-2}$ (Brunetti et al., 2024).

Per quanto riguarda *Click&Grow* i valori della superficie (m^2) e dei consumi energetici mensili (kWh) vengono specificati dal fornitore (eu.clickandgrow.com). Quest'ultimo descrive le corrette pratiche di coltivazione della lattuga e precisa i tempi di germinazione (1-2 settimane) e raccolta (5-6 settimane) della stessa. Ipotizzando che la raccolta avvenga entro queste tempistiche, ed essendoci 52 settimane complete in un anno, avverranno in totale circa 10 raccolte (eu.clickandgrow.com). I kg FW ottenuti durante l'anno sono stati calcolati, analogamente allo studio di (Martin et al., 2024), ipotizzando che il peso medio di una pianta di lattuga dopo 5 settimane sia di circa 100 g e dunque essendo il sistema *The Wall Farm Indoor Vertical Garden* in grado di ospitare 51 piante, ogni 5 settimane si avrà 5.1 kg di prodotto fresco, il quale moltiplicato per tutte le raccolte che avvengono in un anno si otterrà 51 kg FW.

Tabella 4-2: Raccolta dati LCIA dei sistemi di media-grande scala, sistemi di DVF e dati su agricoltura convenzionale. Vengono riportati gli indicatori di performance: consumo specifico di energia o Consumi E ($\text{kWh kg}^{-1} \text{FW}^{-1}$), Land Use o uso del suolo ($\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \text{FW}$), emissioni di GHG ($\text{kg CO}_2\text{-eq kg}^{-1} \text{FW}$), Water Use o consumo idrico ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{FW}$).

	Consumi E	Land Use	GHG	Water Use
<i>IVF-Svezia</i>	10	3.27×10^{-3}	0.98	2.3
<i>PFAL-Japan</i>	38.5	7.5×10^{-3}	25	5.2×10^{-2}
<i>IVF-UK</i>	17.25	0.23	0.74	2.8×10^{-2}
<i>GrowOff-</i>	14.75	3.63×10^{-3}	1.18	3.3
<i>Lettuce</i>				
<i>DVF-Univpm</i>	106.85	0.08	n.d.	n.d.
<i>Click&Grow</i>	13.55	0.01	n.d.	n.d.
<i>OF-Organic</i>	0.785	0.271	0.256	5.9×10^{-2}
<i>OF-</i>	1.56	0.4	0.393	25
<i>Conventional</i>				

4.1.2 Discussione

Prendendo in analisi i dati presenti nella *Tabella 4-2* si può affermare che in media i valori delle prestazioni dei sistemi domestici, confrontati con i sistemi IVF discussi nel Capitolo 3 e per alcuni aspetti delle coltivazioni in campo aperto, non sono così performanti come vengono sponsorizzati.

A cominciare dal consumo specifico di energia, i dati formulati dei sistemi di *GrowOff-Lettuce* e *Click&Grow* (rispettivamente 14.75 e 13.55 kWh kg⁻¹ FW) (Brunetti et al., 2024) possono essere compresi (come range di valore) tra i sistemi *IVF-Svezia* e *IVF-UK*, ma i sistemi domestici in questione hanno una metratura nettamente inferiore e quindi delle dimensioni produttive che non sono eguagliabili in alcun modo ai precedenti.

Dunque, pensare ad un'espansione globale nell'acquisto ed utilizzo di sistemi modulari con consumi di questa entità, incarna davvero il futuro sostenibile che tanto si promuove?

Avendo come dato certo in *climate change* solamente il valore del sistema *GrowOff-Lettuce* (1.18 kg CO₂-eq kg⁻¹ FW) (Martin et al., 2024), rende comunque possibile la riflessione su questo indicatore, il quale risulta superare i sistemi di *IVF-Svezia* e *IVF-UK* ed è 3-4 volte al di sopra dei valori riscontrati nei metodi di coltivazione tradizionale (*OF-organic* e *OF-Conventional*). Ciò significa che essendo un sistema di dimensioni minori degli IVF presi in analisi fin ora, i consumi e l'impiego di risorse di tali sistemi probabilmente saranno spalmati su una minore quantità di output ottenuti, determinando prestazioni ambientali ancora peggiori. Questo implica che il livello di emissioni di GHG i sistemi *Click&Grow* e *DVF-Univpm* sarà presumibilmente peggiore.

Quest'ultimo caso detiene il valore più alto in consumi specifici tra i sistemi e gli impianti presi in considerazione (106.85 kWh kg⁻¹ FW) (Brunetti et al., 2024) e tale risultato è portato da una inefficienza generale del sistema. A partire dall'impiego di luci fluorescenti, le quali consumano circa il 53.1% dell'energia totale, fino all'altro quasi 50% che viene utilizzato dai restanti componenti elettromeccanici (irrigazione, ventilazione, aerazione, drenaggio, controllo, riempimento) (Brunetti et al., 2024). Tutto ciò potrebbe mitigarsi con l'implementazione di un impianto di illuminazione artificiale a LED, il quale abbasserebbe i consumi, ma che indirettamente potrebbe aumentare la densità nel flusso dei fotoni (PPFD), inibendo il tempo di crescita della pianta (Brunetti et al., 2024). La densità nel flusso dei fotoni fotosintetici (PPFD) è un'unità di misura che indica la quantità di fotoni della regione delle radiazioni fotosinteticamente attive (PAR) che impattano su un m² (cre.science.it). La PAR è compresa nella regione dello spettro luminoso visibile (400-700 nm). Per garantire un'illuminazione uniforme e assicurare uno sviluppo idoneo delle piante è necessario

considerare diversi fattori quali la posizione della luce (altezza) rispetto alle piante, la composizione e PPFD di quest'ultima (Budavári et al., 2024).

Ritornando ai sistemi domestici, essendo la resa uno dei principali obiettivi è importante, dunque, tenere in conto anche i parametri appena descritti.

Brunetti et al. (2024) evidenziano altre opzioni utili con lo scopo di poter ovviare ai consumi energetici di *DVF-Univpm*, come creare un ambiente altamente riflettente di modo da poter sfruttare la luce diffusa dalle pareti e l'implementazione di un sistema cosiddetto a "feedback" che permetta di controllare i livelli di conducibilità idrica e di pH, e in caso essi fossero accettabili, evitare lo scarico settimanale. Un'altra alternativa sarebbe quella di impiegare un sistema di raffreddamento passivo, in modo da dissipare il calore senza ulteriori consumi (Brunetti et al., 2024).

Per quanto riguarda l'indicatore dell'uso del suolo, i DVF hanno presentato valori simili se non superiori ai sistemi di IVF, risultati che sono dovuti prettamente al concetto della dimensionalità degli impianti. Essendo sistemi domestici la produzione risulta più "frammentata" con conseguente inefficienza del rapporto tra spazio occupato ed output produttivo.

Nonostante ciò, il LU dei sistemi OF risulta avere valori ben superiori per la maggior parte dei sistemi DVF e IVF evidenziando come sia questo il principale punto di forza del vertical farming in generale. Ad esempio, il valore in LU del sistema *OF-Conventional* è più di 100 volte superiore rispetto al sistema *IVF-Svezia*, a supporto del fatto che nell'agricoltura convenzionale viene impiegata una notevole superficie di terreno arabile a dispetto di impianti di coltivazione verticale.

Un'altra risorsa esauribile che viene ampiamente utilizzata nell'OF è l'acqua. *OF-Conventional* impiega addirittura 25 m³ di acqua su kg FW per l'irrigazione delle colture, con il valore più alto dell'intero studio (Paturu & Varadarajan, 2024).

Gli indicatori ambientali dei sistemi convenzionali *OF-Conventional* e *OF-Organic* sono condizionati da molti fattori. Nello specifico, *OF-Conventional* essendo un sistema di agricoltura convenzionale in campo aperto, presenta impatti ambientali maggiori rispetto a *OF-Organic*, il quale rappresenta un sistema OF biologico.

In *OF-Conventional* l'elemento che influenza di più le performance di questo sistema sono i fertilizzanti chimici a base azotata, i quali possedendo un'alta intensità energetica risultano molto nocivi non solo per la salute umana, ma hanno effetti negativi sul GWP e sugli ecosistemi (Paturu & Varadarajan, 2024).

Mentre il contributo maggiore a livello ambientale del sistema *OF-Organic* è rappresentato dalla produzione delle sementi. Avendo fatto germogliare le sementi in serra, l'utilizzo di energia per il riscaldamento, di torba di sfagno come substrato di crescita e di carburante di origine fossile per il trasporto delle piante germogliate presso l'azienda *OF-Organic*, ha determinato l'impatto maggiore di tutto il processo (Jensen et al., 2024).

Alla luce di quanto esposto, se i sistemi di agricoltura convenzionale possiedono valori vantaggiosi in consumi energetici ed emissioni di GHG, dall'altra parte l'IVF e i sistemi di coltivazione domestica consentono di guadagnare in risorse idriche, del suolo e senza impiego di fertilizzanti o pesticidi che compromettono la biodiversità e la salute umana, dimostrandosi come soluzione competitiva rispetto alle precedenti.

I sistemi di DVF hanno presentato evidenti lacune in quasi tutte le categorie di impatto ambientale prese in analisi, a discapito del fatto che sono dimensionalmente inferiori rispetto ai sistemi di IVF di scala medio-grande. Tuttavia, bisogna precisare che i valori delle performance ambientali sono influenzati da molti elementi di processo e basandosi prevalentemente su dati "grezzi" ricavati dalle informazioni operative dei sistemi, non rientrano in tale analisi molti aspetti che potrebbero essere rilevanti nella valutazione.

CONCLUSIONI

Lo scopo di questo lavoro è stato valutare la sostenibilità ambientale dei sistemi domestici del vertical farming. Essendo la bibliografia scientifica ancora povera a riguardo di studi LCA di impianti di DVF, si è proceduto impiegando tutto il materiale e le risorse disponibili.

Lo studio si è svolto mediante metodologia comparativa con i risultati delle performance ambientali di sistemi agricoli verticali indoor e sistemi di agricoltura convenzionale.

Dall'analisi dei sistemi di coltivazione domestica si è riscontrato un risparmio sia nell'uso di suolo che nelle risorse idriche rispetto a metodiche tradizionali di coltivazione, aprendosi apparentemente la strada come soluzione agricola più attiva dal punto di vista ambientale e rispettosa dell'ecosistema.

Tuttavia, i sistemi domestici hanno dimostrato evidenti inefficienze energetiche rispetto ai sistemi agricoli convenzionali e nei confronti degli impianti di IVF di media-larga scala. Queste lacune sono derivate soprattutto al minore output produttivo ottenuto dal DVF e quindi minore distribuzione dei consumi energetici.

In generale, aumentando in impiego e consumo degli input operativi, i sistemi domestici si sono dimostrati come l'opzione di coltivazione meno performante dello studio dal punto di vista ambientale.

È doveroso aggiungere che in questo elaborato, per i sistemi DVF, non sono stati presi in considerazione aspetti quali la produzione delle sementi, dei substrati di crescita delle piante, il trasporto per il rifornimento dei nutrienti da disciogliere in soluzione (ove necessario), lo smaltimento dei rifiuti che ne derivano e l'approvvigionamento energetico impiegato.

Da come si è dimostrato nel Capitolo 3, tutti questi fattori sono determinanti nel risultato di analisi LCA; perciò, sarebbe necessario approfondire questo tema con ulteriori analisi più accurate nella valutazione dell'impatto ambientale dei sistemi domestici di vertical farming.

In aggiunta, è corretto affermare che le coltivazioni indoor eliminano le "barriere" legate alla stagionalità delle varie *cultivar*, ma non tutte le produzioni vegetali destinate al consumo si possono adattare al vertical farming. A tal proposito, un altro spunto interessante per studi successivi sarebbe quello di valutare le differenze in consumi e indicatori ambientali a seconda delle diverse varietà di vegetali coltivati.

Se per “sostenibilità” si intende di tutelare uno sviluppo che permette di soddisfare i bisogni di oggi senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri, per le ragioni ambientali discusse e ragioni di tipo economico/sociale che riguardano anche una accessibilità economica limitata di impianti di coltivazione domestica, quest’ultimi non rientrano al giorno d’oggi in tale definizione.

Per concludere, compiendo scelte operative riguardanti l’approvvigionamento energetico ponderate sul rispetto dell’ecosistema e implementando un efficiente impianto di illuminazione LED, sistema HVAC e sfruttando sistemi IoT per il continuo monitoraggio delle condizioni di crescita, la scelta dell’IVF potrebbe davvero garantire un futuro di un’alimentazione più sostenibile, conciliando le esigenze produttive con la tutela ambientale e assicurando una sicurezza alimentare globale.

BIBLIOGRAFIA

- InserireAvgoustaki, D. D., & Xydis, G. (2020). Indoor vertical farming in the Urban nexus context: Business growth and resource savings. *Sustainability (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/su12051965>
- Bailey, G. E. (2024). *VERTICAL FARMING*.
- Brunetti, G., Duca, D., Boakye-Yiadom, K. A., Deligios, P. A., Appicciutoli, M., Vischetti, C., Garofalo, C., Riolo, P., De Bernardi, A., Marini, E., Milanovic, V., Abdalhadi, A., Ilari, A., Francioni, M., Casucci, C., Lombi, E., Tagliabue, F., Rossa, U. B., Pedretti, E. F., ... Pacetti, D. (2024). Sustainable Domestic Vertical Farming: Energy Consumption of an Indoor Farming Appliance. *2024 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment, MetroLivEnv 2024 - Proceedings*, 122–127. <https://doi.org/10.1109/MetroLivEnv60384.2024.10615743>
- Budavári, N., Pék, Z., Helyes, L., Takács, S., & Nemeskéri, E. (2024). An Overview on the Use of Artificial Lighting for Sustainable Lettuce and Microgreens Production in an Indoor Vertical Farming System. *Horticulturae*, 10(9), 938. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10090938>
- Despommier, D. (n.d.-a). *Field Actions Science Reports Vertical farms, building a viable indoor farming model for cities*.
- Despommier, D. (n.d.-b). *Field Actions Science Reports Vertical farms, building a viable indoor farming model for cities*.
- Gargaro, M., Hastings, A., Murphy, R. J., & Harris, Z. M. (2024a). A cradle-to-customer life cycle assessment case study of UK vertical farming. *Journal of Cleaner Production*, 470. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143324>
- Gargaro, M., Hastings, A., Murphy, R. J., & Harris, Z. M. (2024b). A cradle-to-customer life cycle assessment case study of UK vertical farming. *Journal of Cleaner Production*, 470. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143324>
- K16pffer, W. (n.d.). *Review icles Life Cycle Assessment From the Beginning to the Current State*.

- Kalantari, F., Tahir, O. M., Joni, R. A., & Fatemi, E. (2018). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review. *Journal of Landscape Ecology(Czech Republic)*, 11(1), 35–60. <https://doi.org/10.1515/jlecol-2017-0016>
- Kikuchi, Y., Kanematsu, Y., Yoshikawa, N., Okubo, T., & Takagaki, M. (2018). Environmental and resource use analysis of plant factories with energy technology options: A case study in Japan. *Journal of Cleaner Production*, 186, 703–717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.110>
- Martin, M., Bustamante, M. J., Zauli, I., & Orsini, F. (2024). Environmental life cycle assessment of an on-site modular cabinet vertical farm. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1403580>
- Martin, M., Elnour, M., & Siñol, A. C. (2023). Environmental life cycle assessment of a large-scale commercial vertical farm. *Sustainable Production and Consumption*, 40, 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.06.020>
- Mina, G., Peira, G., & Bonadonna, A. (2023). Public perception and social sustainability of indoor farming technologies: A systematic review. *Technology in Society*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2023.102363>
- Naikoo, N. B., Kanth, R., Bhat, M. A., & Nazir, A. (2022). *Vertical farming: The future of agriculture: A review*. <http://www.thepharmajournal.com>
- Parkes, M. G., Cubillos Tovar, J. P., Dourado, F., Domingos, T., & Teixeira, R. F. M. (2022a). Life Cycle Assessment of a Prospective Technology for Building-Integrated Production of Broccoli Microgreens. *Atmosphere*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/atmos13081317>
- Parkes, M. G., Cubillos Tovar, J. P., Dourado, F., Domingos, T., & Teixeira, R. F. M. (2022b). Life Cycle Assessment of a Prospective Technology for Building-Integrated Production of Broccoli Microgreens. *Atmosphere*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/atmos13081317>
- Ramadhan, A. J., Kumar, B. A., Bala, I., Mijwil, M. M., Abotaleb, M., Alkattan, H., & Albadran, Z. (2024). IoT-Integrated Multi-Sensor Plant Monitoring and Automated Tank-Based Smart Home Gardening System. *BIO Web of Conferences*, 97. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249700154>
- Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., & Shiina, T. (2009). A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 90, Issue 1, pp. 1–10). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016>

- Silvestri, M. (2015). *Sviluppo sostenibile: un problema di definizione*. .
- Stein, E. W. (2021). The Transformative Environmental Effects Large-Scale Indoor Farming May Have On Air, Water, and Soil. In *Air, Soil and Water Research* (Vol. 14). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/1178622121995819>
- Verbeek, M., & Hardeweg, B. (2022). From consumer to prosumer: Are small-scale home indoor farms economically viable? *European Journal of Horticultural Science*, 87(3), 1–12. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2022/031>
- Avgoustaki, D. D., & Xydis, G. (2020). Indoor vertical farming in the Urban nexus context: Business growth and resource savings. *Sustainability (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/su12051965>
- Bailey, G. E. (2024). *VERTICAL FARMING*.
- Brunetti, G., Duca, D., Boakye-Yiadom, K. A., Deligios, P. A., Appicciutoli, M., Vischetti, C., Garofalo, C., Riolo, P., De Bernardi, *AoLivEnv 2024 - Proceedo8*. <https://doi.org/10.p5743>
- Budavári, N., Pék, Z., Helyes, L., Takács, S., & Nemeskéri, E. (20nU. B., Pedretti, E. F., ... Pacetti, D.
- Barbosa GL, Gadelha FD, Kublik N, et al. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. *Int J Environ Res Pu*. 2015;12:6879-6891. doi:10.3390/ ijerph120606879.
- Environmental Protection Agency (EPA). Nutrient pollution—the sources and solutions: agriculture. <https://www.epa.gov/nutrientpollution/sources-and-solutions-agriculture>. Published September 29, 2020.
- Shrestha A, Dunn B. Hydroponics. Oklahoma Cooperative Extension Services HLA-2013, 6442.
- Nielsen CJ, Ferrin DM, Stanghellini ME. Efficacy of biosurfactants in the management of *Phytophthora capsici* on pepper in recirculating hydroponic systems. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2006;28(3):450-460.
- Rouphael Y, Colla G. Growth, yield, fruit quality and nutrient uptake of hydroponically cultivated zucchini squash as affected by irrigation systems and growing seasons. *Scientia Horticulturae*. 2005;105(2):177-195.
- Domingues DS, Takahashi HW, Camara CAP, Nixdorf SL. Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2012;84:53-61.

Diver S. Aquaponics-Integration of Hydroponics with Aquaculture, National Sustainable Agriculture Information Service, 2006.

SEA, 2021. Energilaget i Siffer. Energy in Sweden. In: Facts and Figures 2008. Energimyndighet. Swedish Energy Agency (SEA), Sweden.

G.M. Broad, Know your indoor farmer: square roots, techno-local food, and transparency as publicity, *Am. Behav. Sci.* 64 (2020) 1588–1606, <https://doi.org/10.1177/0002764220945349>.

Perez, V. M. (2014). Study of The Sustainability Issue of Food Production Using Vertical Farm Methods in An Urban Environment Within The State of Indiana. (Master's Thesis). Available from ProQuest Dissertations and Theses database. (UMI No.1565090).

Al-Kodmany K. The vertical farm: a review of developments and implications for the vertical city. *Buildings* (Basel). 2018;8:24. doi:10.3390/buildings8020024.

SITOGRAFIA

<https://www.seriousseats.com/best-indoor-herb-gardens-7563224#toc-the-winners-at-a-glance>
<https://www.amazon.com/dp/B07CKNX6CJ?tag=seriousseats-onsite-prod-20&ascsubtag=7563224%7Cn789554b1077e43ab95ab5e29f6c0d40415%7CB07CKNX6CJ%7C1730219945940%7C%7C>
<https://www.amazon.com/dp/B01MRVMKQH?tag=seriousseats-onsite-prod-20&ascsubtag=7563224%7Cn789554b1077e43ab95ab5e29f6c0d40415%7CB01MRVMKQH%7C1730219977418%7C%7C>
<https://www.technavio.com/report/smart-indoor-garden-systems-market-industry-analysis>
<https://unric.org/it/giornata-mondiale-dellacqua-la-scarcita-dacqua-a-livello-globale-incombe-ecco-cosa-si-puo-fare/>
https://temi.camera.it/leg19DIL/area/19_1_38/agenda-2030.html
<https://ec.europa.eu/stories/european-green-deal/>
<https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>
<https://www.enelx.com/it/it/faq/cosa-e-impianto-cogenerazione-quali-sono-principali-benefici>
<https://www.rinnovabili.it/clima-e-ambiente/clima-giappone-co2-333/>
<https://www.europeanaffairs.it/lisbona/2018/04/07/energie-rinnovabili-record-del-portogallo-in-europa/#:~:text=Il%20mix%20energetico%20portoghese%20%C3%A8,42%25%20delle%20esigenze%20di%20consumo.>
https://www.pnrr.salute.gov.it/portale/temi/documenti/acquepotabili/parametri/CONDUTTI_VITA.pdf
[https://www.treccani.it/enciclopedia/economie-di-scala_\(Enciclopedia-delle-scienze-sociali\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/economie-di-scala_(Enciclopedia-delle-scienze-sociali)/)
https://www.repubblica.it/green-and-blue/2021/02/13/news/click_and_grow_un_seme_e_un_led_poi_il_rosmarino-287076534/
<https://eu.clickandgrow.com/products/wall-farm-indoor-vertical-garden>
<https://cre.science/it/conoscere/pianta-illuminazione-in-numeri/#:~:text=La%20cosiddetta%20densit%C3%A0%20di%20flusso,distribuzione%20il%20pi%C3%B9%20possibile%20uniforme.>