Politecnico
di Torino

Politecnico di Torino

Dipartimento di **I**ngegneria **Ge**stionale e della **P**roduzione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale
Anno accademico 2021/2022

Tesi di Laurea Magistrale

L'**aeroponica** per una **produzione sostenibile**: sfide, opportunità, criticità

Relatore:

Prof. Fiorenzo Franceschini

Correlatore:

Prof. Luca Mastrogiacomo

Candidato:

Davide Giuseppe Guastamacchia

Abstract

L'**aeroponica** è un'innovativa tecnica di coltivazione fuori suolo che consente di ridurre drasticamente i consumi d'acqua, di usare i fertilizzanti in modo più efficiente, di azzerare il ricorso a pesticidi e di aumentare la produzione a parità di superficie occupata.
In un contesto globale in cui gli effetti del cambiamento climatico appaiono sempre più evidenti, desertificazione, inquinamento e degradazione del suolo sottraggono terreno all'agricoltura, sempre più persone vivono in aree soggette a stress idrico e la popolazione mondiale continua a crescere, le caratteristiche di questa tecnologia prospettano interessanti opportunità per la produzione sostenibile di cibo e di fitoderivati.

Con l'obiettivo di esprimere una stima quantitativa delle prestazioni ecologiche di una coltivazione aeroponica è stata condotta un'Analisi del ciclo di vita di una produzione commerciale di lattuga realizzata in una serra climatizzata nel Torinese.

Il caso studio (cui è dedicato il Capitolo 3 del presente elaborato) è preceduto da una trattazione generale sull'aeroponica (Capitolo 1), basata sulla revisione della letteratura scientifica più recente, e da una descrizione della metodologia applicata con richiami a definizioni e istruzioni operative contenute nelle norme di riferimento (Capitolo 2).

I confini del sistema analizzato includono i processi dalla "culla" all'uscita dal sito di produzione. L'unità funzionale, cui sono riferiti dati e risultati dello studio, è 1 kg di lattuga idonea alla vendita (peso fresco). Le categorie d'impatto trattate includono: cambiamento climatico, eutrofizzazione di acque dolci e marine, acidificazione terrestre, consumo di acqua, uso del suolo e scarsità di risorse fossili e minerarie.
Lo studio si avvale di dati primari raccolti grazie alla collaborazione della startup italiana Agricooltur, la quale gestisce la serra e progetta e commercializza i moduli di coltivazione in essa impiegati.

Al fine di identificare criticità e aree di miglioramento, i risultati d'impatto sono stati analizzati in modo da rilevare le entità dei contributi delle fasi del ciclo produttivo o parti del sistema che li hanno generati. L'ampia copertura temporale dello studio (12 mesi) ha permesso, inoltre, di valutare in che misura gli impatti della produzione varino durante l'anno.

I risultati sono stati, poi, confrontati con quelli di studi analoghi condotti su altre coltivazioni di lattuga fuori suolo e in pieno campo.

Infine, è stato valutato uno scenario alternativo nel quale i consumi diretti di energia elettrica del sistema sono interamente sopperiti da un impianto fotovoltaico.

Abstract (in English)

Aeroponics is an innovative soilless cultivation technique which can drastically reduce water consumption and fertilizer usage, and enhance productivity per unit surface, with low or no use of pesticides.
The effects of climate change become apparent; as a result of desertification, pollution, and soil degradation, agricultural land is shrinking; water stress affects an increasing number of people; world population continues to grow. In such a context, aeroponics seems to offer valuable opportunities for sustainable production of food and phyto-derivatives.

To evaluate the environmental performance of an aeroponic cultivation, a Life Cycle Assessment (LCA) of an air-conditioned greenhouse lettuce production near Turin was performed.

The case study is presented in Chapter 3. Chapter 1 contains a review of aeroponics based on the most recent available related literature. Chapter 2 provides a description of the LCA methodology with references to definitions and work instructions included in the ISO standard.

A “cradle-to-farm gate” approach was used. The functional unit was defined as 1 kg of marketable fresh weight of produce, quantity to which all data and results have been normalized. Impact categories selected include: global warming, freshwater and marine eutrophication, terrestrial acidification, water consumption, land use, mineral and fossil resources scarcity.

Relevant operational data used in the study were collected thanks to the collaboration with Agricooltur, Italian startup that owns the greenhouse and designs the cultivation systems employed therein. In order to identify environmental hotspots and areas of improvement, contributions to impact results have been analyzed.
The 12-month data coverage also made it possible to assess the extent to which impact results vary during throughout the year.

Results have been compared to the findings of other similar studies upon lettuce cultivation in open field and soilless techniques. Moreover, an alternative scenario in which photovoltaics were used as energy source was assessed.

Sommario

Introduzione 10
Obiettivi e metodo 11
Struttura 12

1 L'**aeroponica** 14
1.1 **Definizione e principi di funzionamento** 15
1.2 **Caratteristiche** 16
1.2.1 **Coltivazione senza substrato** 16
1.2.2 **Ambiente di coltivazione** 19
1.2.3 **Razionalizzazione degli spazi** 20
1.3 **Sistemi aeroponici** 22
1.4 **Specie coltivabili** 23
1.5 **Storia** 24
1.6 **Applicazioni** 26

2 L'**Analisi del ciclo di vita** 30
2.1 **Caratteristiche** 32
2.2 **Applicazioni** 33
2.3 **Fasi del metodo** 34
2.3.1 **Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione** 36
2.3.2 **Analisi dell'Inventario del ciclo di vita** 40
2.3.3 **Valutazione degli impatti** 42
2.3.4 **Interpretazione** 45

3 **Caso studio** 46
3.1 Definizione degli **obiettivi** e del **campo di applicazione** 48
3.1.1 **Unità funzionale** 50
3.1.2 **Dati** 51
3.2 **Analisi dell'Inventario del ciclo di vita** 52
3.2.1 Descrizione del **sistema di prodotto** e **dati d'inventario** 53
3.2.2 **Flussi di riferimento** 73
3.3 **Valutazione degli impatti** 78
3.3.1 **Risultati d'impatto** 79
3.4 **Confronto dei risultati con studi analoghi** 85
3.4.1 **Coltivazione aeroponica in fascia climatica mediterranea** 86
3.4.2 **Altri metodi di coltivazione** 88
3.5 **Analisi di sensibilità** 89
3.5.1 **Energia elettrica** 89
3.5.2 **Massa media dei cespi di lattuga** 91
3.5.3 **Fonti per la modellazione del background system** 92

Conclusioni 94
Risultati 94
Limiti dello studio 95
Prospettive future di ricerca 96

Appendice A **Calcolo dei dati d'inventario** 98
A 0.1 **Processi di trasporto** 99
A 1 **Serra *Plant800*** (S0) 99
A 2 **Moduli aeroponici *AeroSmart*** (S1) 102
A 3 **Coltivazione aeroponica** (A) 104
A 3.1 **Composizione soluzione nutritiva** 104
A 3.2 **Interventi di fertirrigazione** 104
A 3.3 Stima dei **consumi di soluzione nutritiva** 105
A 3.4 Stima dei **consumi di energia elettrica dei climatizzatori** 106
Appendice B **Risultati d'impatto del sottosistema Serra *Plant800*** 108
Appendice C **Flussi di riferimento e risultati d'impatto per unità di prodotto** 110
C 1 **Flussi di riferimento** 111
C 2 **Risultati d'impatto** 111
C 2.2 **Risultati mese per mese** 111
Appendice D **Stima del contributo delle esclusioni** 112
Bibliografia e sitografia 115

Indice delle tabelle

Tabella 1 Specie vegetali coltivabili in aeroponica 23
Tabella 2 Esempi lemmi specifici Valutazione degli impatti 43
Tabella 3 Categorie d'impatto intermedio trattate nello studio 49
Tabella 4 Scomposizione del sistema di prodotto analizzato in sottosistemi e processi 52
Tabella 5 Caratteristiche geometriche della serra 54
Tabella 6 Dati d'inventario del sottosistema serra (S0) 56
Tabella 7 Specifiche tecniche d'interesse apparecchiature integrate nel modulo *AeroSmart*. 62
Tabella 8 Dati d'inventario del sottosistema "modulo aeroponico *AeroSmart*" (S1) 63
Tabella 9 Dati d'inventario del processo "Messa a dimora su modulo aeroponico" (A-P1) 65
Tabella 10 Dati d'inventario del processo "Preparazione della soluzione nutritiva" (A-F0) 67
Tabella 11 Specifiche tecniche d'interesse macchine del modulo *AeroFeed*.. 68
Tabella 12 Consumi medi giornalieri di energia elettrica per fertirrigazione (E_{FI}) e riscaldatori sommergibili (E_{RS}) 70
Tabella 13 Consumi medi giornalieri di soluzione nutritiva (per pianta) 70
Tabella 14 Dati d'inventario del processo "Fertirrigazione" (A-F1) 70
Tabella 15 Specifiche tecniche d'interesse dei modelli di riferimento del sistema HVAC 71
Tabella 16 Calcolo consumi di energia elettrica per la ventilazione della serra 71
Tabella 17 Consumo di energia elettrica stimato per riscaldamento e raffrescamento 72
Tabella 18 Dati d'inventario "Climatizzazione e ventilazione della serra" (A-HVAC) 72
Tabella 19 Dati d'inventario "Monitoraggio e controlli automatici della serra" (A-MC) 72
Tabella 20 Dati d'inventario del processo "Coltivazione" (A-A) 73
Tabella 21 Durata media del tempo ciclo su base stagionale 75
Tabella 22 Riepilogo parametri con valori di riferimento (v. r.) (dati medi su 365 giorni) e mese per mese 75
Tabella 23 Riepilogo parametri dipendenti con valori di riferimento (v. r.) e mese per mese .. 75
Tabella 24 Parametri dipendenti 75

Tabella 25 Flussi di riferimento....76
Tabella 26 Flussi di riferimento (valori medi), consumi diretti di acqua....77
Tabella 27 Flussi di riferimento (valori medi), consumi diretti di energia elettrica....77
Tabella 28 Risultati d'impatto del sistema di prodotto rispetto all'UF....79
Tabella 29 Risultati d'impatto (flussi raggruppati "per funzione")....80
Tabella 30 Risultati d'impatto (flussi raggruppati "per tipo")....82
Tabella 31 Risultati d'impatto su base mensile e media anno....83
Tabella 32 Confronto dei risultati con quelli di altri studi LCA (UF: 1 kg di lattuga)....85
Tabella 33 Confronto dei risultati d'impatto con studio di Barla, Salachas & Abeliotis 2020..86
Tabella 34 Confronto consumi di energia elettrica e GWP100 con elaborazioni dati da Barla, Salachas & Abeliotis 2020....87
Tabella 35 Confronto dei risultati d'impatto con studio di Sanyé-Mengual et al. 2015....88
Tabella 36 Confronto dei risultati d'impatto con studio di Bartzas, Zaharaki & Komnitsas 2015 88
Tabella 37 Confronto risultati d'impatto con dati mix energetico più recenti....89
Tabella 38 Risultati d'impatto Scenario alternativo....90
Tabella 39 Risultati d'impatto del sistema al variare di m (*coeteris paribus*)....91
Tabella 40 Confronto GWP per kg di materiale (ecoprofili utilizzati nello studio vs. ecoprofili alternativi)....92
Tabella 41 Confronto contributi al GWP100 del sistema dovuti ai materiali interessati dall'Analisi di sensibilità (ecoprofili utilizzati nello studio vs. ecoprofili alternativi)....93
Tabella 42 Dettagli processi di trasporto in Analisi dell'inventario del ciclo di vita....99
Tabella 43 Specifiche tecniche materiali e dati usati per i calcoli (in grassetto) (S0)....99
Tabella 44 Dettaglio calcoli massa *Ferri d'armatura* (S0-Fond)....100
Tabella 45 Dettaglio calcoli massa *Copertura* in policarbonato (S0-Cop)....100
Tabella 46 Dettaglio calcoli massa *Struttura portante* in alluminio (S0-SP)....101
Tabella 47 Specifiche tecniche materiali e dati usati per i calcoli (in grassetto) (S1)....102
Tabella 48 Dettaglio calcoli massa *Telaio di supporto* in acciaio (S1-Supp)....102
Tabella 49 Dettaglio calcoli massa *Canaletta* in polipropilene alveolare....103
Tabella 50 Dettaglio calcoli massa *Profili di appoggio* in polipropilene....103
Tabella 51 Dettaglio calcoli massa *Piastre di coltivazione* in polipropilene....103
Tabella 52 Dettaglio calcoli massa *Condotta* in polivinilcloruro....103
Tabella 53 Composizione rappresentativa soluzione nutritiva (fertilizzanti per 1 L di acqua) 104
Tabella 54 Concentrazioni equivalenti di azoto, fosforo e potassio (in kg per litro di soluzione nutritiva)....104
Tabella 55 Dati primari sugli interventi di fertirrigazione sulle linee lattuga....104
Tabella 56 Consumi medi di soluzione nutritiva per pianta (per ciclo colturale)....105
Tabella 57 Dettaglio risultati d'impatto Costruzione della Serra Plant800....109
Tabella 58 Dettaglio risultati d'impatto Costruzione della Serra Plant800 (rispetto a 1 m^2 a)109
Tabella 59 Risultati d'impatto stand-alone "Costruzione della Serra *Plant800*"....109
Tabella 60 Flussi di riferimento (UF = 1 cespo di lattuga idoneo alla vendita)....111
Tabella 61 Risultati d'impatto su base mensile (UF = 1 cespo di lattuga idoneo alla vendita) 111
Tabella 62 Dati sulle esclusioni....113
Tabella 63 Stima del contributo delle esclusioni ai risultato d'impatto....114

Indice delle figure

Figura 1 Coltivazione di lattuga (*Lactuca sativa*) in aeroponica. 15
Figura 2 Coltivazione aeroponica di fragole in serra a Policoro (MT) in Basilicata, Italia. 19
Figura 3 Modulo Agricooltur ® MiniHortus nella cucina di un ristorante a Torino 19
Figura 4 Coltivazione outdoor di Nature Crisp in Georgia (USA) 20
Figura 5 Moduli commerciali Hexagro Poty (2020) 20
Figura 6 Terrazza *Cielo Verde* a West Hollywood, California (USA) 20
Figura 7 Sistema con portapiante disposti su piani inclinati (profilo ad A). 20
Figura 8 Sistema con portapiante disposti su piani verticali 20
Figura 9 Serra aeroponica industriale AeroFarms 21
Figura 10 Modulo aeroponico a contenitore in laboratorio di ricerca (1976) 24
Figura 11 Coltivazione aeroponica presso la colonia di Satariya in Israele (1981) 24
Figura 12 Brochure promozionale (1982) del Padiglione *The Land* all'EPCOT Center 25
Figura 13 Esemplare di *Genesis Rooting System* (1983) 25
Figura 14 Esempio di sistema di prodotto tratto dalla norma UNI EN ISO 14040:2006 31
Figura 15 Fasi di un'Analisi del ciclo di vita [UNI 2006] 34
Figura 16 Procedura semplificata Analisi dell'Inventario del ciclo di vita 40
Figura 17 Elementi della fase di Valutazione dell'Impatto del ciclo di vita 42
Figura 18 Selezione di metodi di valutazione degli impatti. 44
Figura 19 Diagramma di flusso del sistema di prodotto analizzato 48
Figura 20 Esempio Tabella Dati d'inventario 53
Figura 21 Vista frontale della serra 54
Figura 22 Interno della serra *Plant800* 54
Figura 23 Posizione della serra Urbancooltur *Plant800* di Cascina Gorrea 55
Figura 24 Illustrazione schematica dell'invenzione tratta dal brevetto 58
Figura 25 Illustrazioni schematiche del recupero della soluzione nutritiva 59
Figura 26 Esploso schematico degli elementi principali di camera di crescita e piastre di coltivazione 60
Figura 27 Illustrazione schematica di moduli a contenitori sovrapposti con luci di assimilazione 60
Figura 28 Piastra di coltivazione sollevata 60
Figura 29 Vaso a rete estratto con radici intatte 60
Figura 30 Moduli aeroponici Aerosmart nella serra Plant800 di Cascina Gorrea 61
Figura 31 Disegno esecutivo delle vasche (moduli a canaletta) 61
Figura 32 Vano pompa e serbatoio 61
Figura 33 Interno del serbatoio (visto dall'alto) 61
Figura 34 Diagramma di flusso del raggruppamento di processi "Piante" (A-P) 65
Figura 35 Germinatoio elettrico commerciale 66
Figura 36 Plantulae di lattuga in cubetti di torba pronte per la messa a dimora 66
Figura 37 Processo di messa a dimora su modulo aeroponico 66
Figura 38 Diagramma ad albero del sistema di prodotto su OpenLCA 74
Figura 39 Contributi percentuali delle classi (raggruppamento "per funzione") ai risultati d'impatto 80
Figura 40 Contributo percentuale delle classi (raggruppamento "per tipo") ai risultati d'impatto 82

Figura 41 Andamento dei risultato d'impatto su base mensile e media anno 83
Figura 42 Quote lattonerie struttura portante 101
Figura 43 Disegno *Telaio di supporto* (S1-Supp) 102
Figura 44 Documentazione foglio di calcolo.....106
Figura 45 Esempio Foglio Durata interventi riscaldamento e raffrescamento.....107
Figura 46 Esempio Foglio Sintesi su base mensile 107

Sigle e acronimi

Sigla/ acronimo	Descrizione	Sigla/ acronimo	Descrizione
AT	Acidificazione terrestre	LCA	**L**ife **C**ycle **A**ssessment
CC	Cambiamento climatico	LCI	**L**ife **C**ycle **I**nventory
CH	Svizzera	LCIA	**L**ife **C**ycle **I**mpact Assessment
com.	Comunicazione	LED	Diodo a emissione di luce (***L**ight-**E**mitting **D**iode*)
com. tel.	Comunicazione telefonica		
d. lgs.	Decreto legislativo	LLC	**L**imited **l**iability **c**ompany
doc. int.	Documento interno	NASA	**N**ational **A**eronautics and **S**pace **A**dministration
dx	Destra		
el	**e**co**I**nvent	OMS	**O**rganizzazione **m**ondiale della **s**anità
EN	Norma europea (***E**uropean **n**orm*)	ONU	**O**rganizzazione delle **N**azioni **U**nite
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile	PAR	Radiazione fotosinteticamente attiva (***P**hotosynthetic **a**ctive **r**adiation*)
		PC	Policarbonato
eq.	Equivalente	PEF	Impronta ambientale dei prodotti (***P**roduct **E**nvironmental **F**ootprint*)
ESG	***E**nvironmental, **S**ocial and corporate **G**overnance*	pH	Potenziale di idrogeno
Eu AD	Eutrofizzazione delle acque dolci	pot.	Potenziale
Eu M	Eutrofizzazione marina	PP	Polipropilene
FAO	Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (***F**ood and **A**griculture **O**rganization of the United Nations*)	PVC	Polivinilcloruro
		R Fo	Risorse fossili
		R Mi	Risorse minerarie
		RER	Continente europeo (codice el)
GDO	Grande distribuzione organizzata	S.I.	Sistema internazionale di unità di misura
GWP	Potenziale di riscaldamento globale (***G**lobal **W**arming **P**otential*)	Suo	Uso di suolo
		sx	Sinistra
IA	**I**ntelligenza **a**rtificiale	UF	**U**nità **f**unzionale
IEA	**I**nternational **E**nergy **A**gency	UNI	Ente italiano di normazione
ISO	Organizzazione internazionale per la normazione		

Simboli

Simbolo	Descrizione	Simbolo	Descrizione
σ	Densità superficiale	⌀	Diametro
ρ	Densità volumica		

Introduzione

L'**aeroponica** è un'innovativa tecnologia mediante la quale è possibile coltivare specie vegetali in assenza di terra o qualsiasi altro tipo di substrato, nebulizzando soluzioni nutritive direttamente sulle radici delle piante, artificialmente sospese in aria su appositi elementi di sostegno.

Praticata in ambiente controllato, svincola la produzione da una serie di limiti e ostacoli tecnici tipici dell'agricoltura (quali: estensione e qualità del terreno; esposizione delle colture a fenomeni meteorologici avversi, agenti patogeni e parassiti; stagionalità e compatibilità climatica delle cùltivar); consente di ridurre drasticamente i consumi d'acqua (fino al 98%[A] inferiori a quelli dei metodi di coltivazione tradizionali), di usare i fertilizzanti in modo più efficiente, di azzerare il ricorso a pesticidi e di aumentare la produzione a parità di superficie occupata[B].

Oggi circa il 95%[C] del cibo destinato all'alimentazione umana dipende dallo sfruttamento del suolo. Agricoltura intensiva, monocolture, uso massiccio di fertilizzanti chimici e antiparassitari, sono causa di inquinamento, degradazione del suolo e perdita di biodiversità. Riscaldamento globale e cambiamento climatico procedono a ritmi sempre più preoccupanti, causando ingenti danni anche alle colture. Nel prossimo futuro far fronte al fabbisogno alimentare di una popolazione in crescita e sempre più inurbata[D], facendo affidamento quasi esclusivamente sull'agricoltura tradizionale, diventerà un'impresa sempre più ardua da realizzare.

In questo contesto, sistemi di coltivazione fuori suolo, come l'aeroponica, potrebbero giocare un ruolo strategico, e nell'implementazione di sistemi produttivi sostenibili, e nella lotta alla fame (2 dei 17 obiettivi di sviluppo inclusi nell'Agenda ONU per il 2030[E]): posizionandosi, rispetto ai metodi più convenzionalmente adoperati per produrre cibo e materie prime a partire dalla terra, come validi complementi, e in determinate situazioni, persino, come alternative da preferire.

Le caratteristiche dell'aeroponica sembrano offrire interessanti opportunità per la sicurezza alimentare e per la creazione di nuovi modelli di produzione, distribuzione e consumo più efficienti e sostenibili, e non solo in ambito agro-alimentare, ma anche in floricoltura e nella sintesi di fitoderivati per i settori industriali nutra-farmaceutico e cosmetico; opportunità che la rendono una tecnologia e un fenomeno innovativo meritevoli d'attenzione e di approfondimento.

Di contro, l'energia sembra essere il prezzo da pagare nel momento in cui si faccia a meno della terra per coltivare[F]: sensori, computer e attuatori per monitoraggio e controllo dei parametri ambientali, apparecchiature per somministrazione di acqua e sostanze nutritive, sistemi per il ricambio dell'aria, eventuale ricorso a illuminazione artificiale e/o climatizzazione dell'ambiente di coltivazione, ecc. richiedono una fornitura costante di energia elettrica (interruzioni prolungate potrebbero causare danni irreversibili alle colture) e nell'insieme possono determinare consumi più o meno rilevanti (con conseguenti impatti sull'ambiente e sui costi di gestione).

Obiettivi e metodo

Nel presente elaborato, a valle di una panoramica – basata sulla revisione della letteratura scientifica più recente – su opportunità e criticità di questa tecnologia, sarà presentato un caso studio, realizzato con la collaborazione di un'impresa italiana operante nel settore, volto a valutare le prestazioni ecologiche di una produzione in aeroponica.
Il caso studio proposto consiste in un'Analisi del ciclo di vita (***L**ife **C**ycle **A**ssessment*) – dalla culla all'uscita dal sito di produzione, di una coltivazione aeroponica commerciale di lattuga (*Lactuca sativa*) realizzata in una serra climatizzata nel Torinese – condotta al fine di discutere l'effettiva sostenibilità di questa tecnologia, di individuare possibili aree di miglioramento e di confrontare i risultati con quelli di studi analoghi su altri metodi di coltivazione.

Le otto categorie d'impatto trattate nell'analisi includono: cambiamento climatico, eutrofizzazione di acque dolci e marine, acidificazione terrestre, consumo di acqua, uso di suolo e sfruttamento di risorse fossili e minerarie.

Struttura

Il corpo della tesi è suddiviso in tre capitoli.

Nel Capitolo 1 viene presentata la tecnologia aeroponica: ne sono illustrati i principi di funzionamento, le caratteristiche che la definiscono, punti di forza e criticità, cenni storici, possibilità d'impiego e opportunità.

Il Capitolo 2 è dedicato alla metodologia dell'Analisi del Ciclo di vita. Dopo averne evidenziato aspetti chiave e possibili applicazioni, sono richiamate definizioni e istruzioni operative dalle norme di riferimento.

Nel Capitolo 3 ("Caso studio") il metodo è applicato per valutare l'impatto ecologico di una produzione orticola in aeroponica. Definiti gli obiettivi e il campo di applicazione dell'analisi, si procede con la compilazione del c.d. "Inventario del ciclo di vita" (§ 3.2) accompagnato da una dettagliata descrizione dei processi e dei componenti del sistema produttivo oggetto dello studio. Nel paragrafo successivo (§ 3.3) sono presentati i risultati d'impatto, commentati con l'ausilio di grafici, tabelle e suddivisi in contributi in modo da evidenziare le fasi del ciclo produttivo o parti del sistema che li hanno generati.
I risultati sono poi confrontati con quelli prodotti in studi analoghi tratti dalla letteratura e dalle banche dati consultate (§ 3.4). Seguono, infine, la valutazione di uno scenario alternativo e altre analisi di sensibilità (§ 3.5).

Nelle Conclusioni, dopo aver brevemente riepilogato motivazioni e caratteristiche dello studio, sono riportati i risultati più rilevanti, identificate le limitazioni riscontrate e suggerite prospettive future di ricerca.

Nelle appendici sono allegati: A) calcoli e note metodologiche sui Dati d'inventario; B) un piccolo approfondimento sui risultati d'impatto del sottosistema serra; C) i risultati d'impatto del sistema analizzato calcolati rispetto a un'unità di prodotto (piuttosto che al kg di prodotto, UF dello studio); D) una stima del contributo degli elementi esclusi dall'analisi.

[A] In NASA 2006, pp. 64-67 è riportato quanto stimato a valle di numerose sperimentazioni (alcune delle quali realizzate in collaborazione con la NASA) da AgriHouse/Aeroponics International: azienda fondata da Richard Stoner II di Genesis Technology Inc., tra le prime imprese al mondo a proporre applicazioni commerciali dell'aeroponica (1983) (vedi anche § 1.5). Benché la fonte citata risalga al 2006, altre pubblicazioni più recenti riportano dati analoghi: 90% (***C**ontrolled **E**nvironment **H**igh-**R**ise **F**arm* in Gopinath, Vethamoni & Gomathi 2017), 95% [AlShrouf 2017], un fabbisogno idrico compreso tra 1/10 e 1/30 di quello che richiederebbe la coltivazione su campo (vale a dire: un potenziale risparmio del 90%-97,7%) [Mbiyu et al. 2012; Tunio et al. 2020]
[B] [NASA 2006; Li et al. 2018; Puccinelli, Pardossi & Incrocci 2021]
[C] [FAO 2015; FAO 2021]
[D] Si prevede che entro metà secolo la popolazione umana mondiale raggiungerà 9,7 miliardi di individui e sarà sempre più concentrata nelle aree urbane (70%) [UNRIC 2020]
[E] [ONU 2015]
[F] [Barla, Salachas & Abeliotis 2020]

1 L’**aeroponica**

L'**aeroponica** è un'innovativa tecnologia mediante la quale è possibile coltivare specie vegetali in assenza di terra o di qualsiasi altro tipo di substrato, nebulizzando soluzioni nutritive direttamente sulle loro radici. È adoperabile nella produzione di cibo, in floricoltura, nella ricerca fitologica, nonché per ottenere dalle piante materie prime d'interesse industriale.

1.1 Definizione e principi di funzionamento

L'**I**nternational **So**ciety for **S**oilless **C**ulture (ISoSC)[1] definisce l'aeroponica come pratica agraria basata sull'uso di «sistemi nei quali le radici delle piante si sviluppano in un ambiente saturo di soluzione nutritiva erogata sotto forma di aerosol» [Acheampong et al. 2020].
In altre definizioni in letteratura, l'aeroponica è descritta come metodo di coltivazione fuori suolo caratterizzato dalla particolare modalità di somministrazione di acqua e nutrienti (nebulizzazione in prossimità delle radici) e nel quale non ci si avvale di alcun tipo di substrato [Souret & Weathers 2000; Komosa 2004; AlShrouf 2017; Lakhiar et al. 2018 a; Eldridge et al. 2020].

In un sistema (o modulo) aeroponico le piante sono sorrette da apposite strutture di sostegno ("**elementi portapiante**") che tengono le radici sospese in aria (da cui deriva il prefisso "aero-" nel nome), all'interno di un ambiente protetto ("**camera di crescita**"[2]) dove possono attingere alle sostanze necessarie al loro sostentamento grazie all'esposizione diretta a getti nebulizzati di soluzione nutritiva erogati attraverso un apposito "**gruppo di fertirrigazione**" comunemente costituito da un serbatoio, una pompa, una condotta e uno o più ugelli nebulizzatori.
Fusti e foglie (*canopia*) si estendono a vista al di sopra degli elementi portapiante per assorbire la radiazione luminosa indispensabile per la fotosintesi clorofilliana; gli apparati radicali sono tenuti al buio nelle c.d. camere di crescita.

Figura 1 Coltivazione di lattuga (*Lactuca sativa*) in aeroponica.
Canopia a vista (a sx) e sede delle radici (sostegno sollevato per lo scatto fotografico) (a dx) [Lakhiar et al. 2018 a]

Il volume della camera di crescita è delimitato da pannelli: i) per evitare di disperdere la sostanza nutritizia nebulizzata; ii) per mantenere in prossimità delle radici livelli di umidità, di concentrazione dei nutrienti e di ossigeno il più possibile omogenei e idonei a un sano sviluppo della pianta; iii) per tenere le radici al riparo dalla luce[3].

---

[1] Associazione internazionale dicata alla ricerca e alla disseminazione del corpus di conoscenze sulle tecniche di coltivazione fuori suolo (o lett. senza suolo), attiva fra il 1955 e il 1999. Cfr. https://uia.org/s/or/en/1100044800

[2] Il lemma "**camera di crescita**" (dall'inglese *growing* o *growth chamber*) qui identifica la sede degli apparati radicali [Mbiyu et al. 2012; Lakhiar et al. 2018; Selvaraj et al. 2019]. Lo stesso lemma, sia in italiano che in inglese, indica anche gli ambienti controllati in cui i moduli potrebbero essere a loro volta collocati [Wikipedia a] o le "camere climatiche" usate in laboratori e vivai per lo sviluppo di piante o microrganismi [N-Wissen; FDM].
In letteratura, la sede delle radici è anche detta *growth box* [Tunio et al. 2020], "camera di nebulizzazione delle radici" (*root misting chamber* [Wagner & Wilkinson 1992]), "sito delle radici" (*root zone*) o "contenitore".

[3] Una sovraesposizione alla luce potrebbe interferire con il loro accrescimento, peggiorarne le capacità di assorbimento, addirittura seccarle. Il buio, d'altra parte, dovrebbe prevenire la diffusione di alghe infestanti (le quali per sopravvivere devono effettuare la fotosintesi), favorita invece dall'ambiente umido della camera di crescita.

La **soluzione nutritiva** (acqua in cui sono disciolte le sostanze necessarie al fabbisogno minerale delle piante) è raccolta allo stato liquido in uno o più serbatoi; per mezzo di una pompa è da questi prelevata per raggiungere la sede degli apparati radicali, dove attraverso ugelli nebulizzatori è diffusa in minuscole gocce (*droplets*) dal diametro aerodinamico nell'ordine di alcune decine di micron [Gopinath, Vethamoni & Gomathi 2017; Lakhiar et al. 2018 a] in interventi di durata e frequenza variabili.
La sospensione in aria di queste finissime gocce (l'aerosol), in parte si deposita sulle radici (bagnatura), conferendo alla pianta l'idratazione e il nutrimento necessari, in parte contribuisce al mantenimento delle condizioni di umidità desiderate in loro prossimità [Eldridge et al. 2020].
La dimensione delle gocce dipende dal tipo di ugelli impiegati [Li et al. 2018; Lakhiar et al. 2018 a]; la relazione tra dimensione delle gocce e rendimento delle piante è tuttora oggetto di studio [Lakhiar et al. 2018 a, 2020; Eldridge et al. 2020; Codignola / Il fatto alimentare 2020]; ricerche analoghe indagano su frequenza e durata ottimali degli interventi di fertirrigazione [Ali et al. 2015; Tunio et al. 2020; Awalina, Erona & Rusnam 2022].
La pompa può essere attivata da un temporizzatore a intervalli prestabiliti o da altri attuatori in presenza di determinati *trigger* (associati p.e. alle condizioni di umidità e temperatura rilevate da appositi sensori posti nelle camere di crescita).

La soluzione nutritiva non assorbita può essere recuperata per essere ricircolata, così da efficientare l'uso di acqua e fertilizzanti [Yuvaraj & Subramanian 2016; AlShrouf 2017; Lakhiar et al. 2018 a]. Per la sanificazione della soluzione in ricircolo possono essere utilizzati filtri e/o altri metodi di disinfezione (p.e. ozono, acqua ossigenata, trattamento con luce ultravioletta) [Minuto & Garibaldi 2004; Aeroponica International 2015].

Le piante possono originare dalla germinazione delle sementi [Aeroponica International 2015; Lakhiar et al. 2018 a] o a partire da piante già sviluppate per moltiplicazione agamica, attraverso taleaggio o propagazione in vitro [Mbiyu et al. 2012; Yuvaraj & Subramanian 2016; Del Valle-Echevarria et al. 2019; Tunio et al. 2020].
La preparazione delle piante può avvenire direttamente sui moduli di coltivazione aeroponici oppure in vivaio. La preparazione in vivaio normalmente dura al più due settimane, periodo a seguito del quale, le piantine sono messe a dimora, nella disposizione più consona al loro accrescimento, sui moduli aeroponici [Aeroponica International 2015].

1.2 **Caratteristiche**

1.2.1 **Coltivazione senza substrato**

Uno dei ruoli che in natura substrati come il suolo esercitano nei confronti di piante, funghi e animali sessili è quello di fornire ad essi un supporto meccanico al quale possano poggiarsi o ancorarsi [Treccani a]: in aeroponica questo compito è assolto da sostegni artificiali; un altro consiste nel provvedere alla c.d. "funzione trofica", ossia di nutrimento [Valli & Schiavi 2000], supplita dalla peculiare erogazione di acqua e nutrienti.

Talvolta, modeste quantità di substrato sono impiegate per la germinazione dei semi (cfr. § 3.2.1.3.1) o per il drenaggio della soluzione nutritiva in eccesso in moduli di coltivazione le cui caratteristiche lo rendano consigliabile [Agrotonomy; HexAgro]; anche in tali casi, tuttavia, il substrato di coltura in cui le radici si espandono e da cui traggono nutrimento rimane essenzialmente l'aria satura di soluzione nutritiva nella camera di crescita.

1.2.1.1 Vantaggi e opportunità

Gli estremamente parsimoniosi consumi di acqua dell'aeroponica ne rappresentano uno dei più importanti punti di forza. L'agricoltura, da sola, è responsabile per circa il 70% dei consumi di acqua dolce globali [World Bank 2018]; molta di questa acqua, impiegata per irrigare i campi, è dispersa nell'ambiente per evaporazione [Britannica a]. In aeroponica, è possibile dosare con precisione le quantità di acqua da somministrare alle piante, l'acqua è direttamente disponibile alle radici e non rimane intrappolata nel substrato, nemmeno in minime quantità, poiché non vi è alcun substrato. In ambiente controllato, inoltre, attraverso appositi sistemi è possibile recuperare vapore acqueo e soluzione nutritiva in eccedenza.

In aeroponica, l'esposizione diretta delle radici ad aria, acqua e nutrienti favorisce l'assorbimento dei macro- e microelementi disciolti nella soluzione nutritiva [NASA 2006; Ali et al. 2015] e assicura alle radici un'elevata disponibilità di ossigeno [Mobini, Ismail & Arouiee 2015; Li et al. 2018]. Le così accresciute capacità di assorbimento minerale e di ossigenazione delle radici possono influire positivamente sulla resa quantitativa e qualitativa del raccolto[4] [Lakhiar et al. 2018 b; ÆssensGrows].

Effettuando adeguati controlli su ambiente di coltivazione, acqua e sostanze utilizzate per preparare la soluzione nutritiva, si può garantire un prodotto esente da metalli pesanti o altre sostanze inquinanti che qualora presenti nel suolo di coltivazione finirebbero inevitabilmente per essere assorbiti in tracce più o meno rilevanti. Questa opportunità può essere sfruttata per produrre frutta e verdura *nickel-free* e senza istamine, a particolare beneficio di soggetti con intolleranze alimentari o allergie [Iannuziello / Fresh Plaza 2021; Biblioteca et al. 2022].

Similmente, l'aeroponica può essere utilizzata per realizzare produzioni biofortificate [Stibilj et al. 2011; Puccinelli, Landi, Maggini et al. 2021]. La c.d. "**biofortificazione**" consiste in un arricchimento del contenuto di nutrienti di prodotti ortofrutticoli, non a valle della raccolta (p.e. applicando additivi o in successive trasformazioni), bensì intervenendo direttamente sulla pianta in fase di coltivazione [Bouis 2011]. L'assenza di substrato facilita l'assorbimento e, congiuntamente al ricircolo della soluzione nutritiva, minimizza le quantità di sostanza usata per la biofortificazione [Puccinelli, Pardossi & Incrocci 2021].

Mentre in agricoltura tradizionale una distribuzione diseguale dei nutrienti nel suolo potrebbe influenzare le concentrazioni di queste sostanze nel raccolto, nei sistemi aeroponici, tutte le sostanze somministrate alle piante vengono dosate affinché possano essere assorbite dalle radici nelle quantità necessarie, senza che debbano competere per l'assorbimento di quanto formerà la linfa grezza di cui hanno bisogno per il loro sostentamento [Mangaiyarkarasi 2020]; è possibile, inoltre, garantire un più elevato livello di riproducibilità del prodotto, talvolta prerequisito dell'industria nutraceutica e alimentare.

[4] In uno studio comparativo condotto su otto varietà orticole (selezionate tra verdure a foglia, erbe e colture da frutto diffuse su scala globale) negli esemplari prodotti in aeroponica sono stati riscontrati livelli di fenoli, flavonoidi e proprietà antiossidanti superiori rispetto a quelli prodotti in campo [Chandra et al. 2014]. Analogamente, un altro studio (Wimmerova et al. 2022) ha rilevato, nelle piante di *Coffea arabica* cresciute in aeroponica, contenuti di caffeina e teobromina e una biomassa maggiore rispetto alle omologhe coltivate in suolo.

L'impresa statunitense Just Greens sostiene di riuscire a incidere sulle proprietà organolettiche (colore, gusto, consistenza…) in modo sistematico e ripetibile, controllando, con l'ausilio dell'intelligenza artificiale, le condizioni al contorno e il mix di nutrienti somministrato alle piante attraverso aeroponica di precisione [AeroFarms]. Ricreare quello che in enogastronomia viene chiamato *terroir* (cioè il complesso mix di interazioni tra condizioni naturali, fisiche e chimiche, e zona geografica che permette la coltivazione di una specifica cùltivar) potrebbe, nel prossimo futuro, diventare una delle sfide per la diffusione dell'aeroponica in mercati più sofisticati[5].

Il fatto che le radici risultino facilmente accessibili rende l'aeroponica un metodo di coltivazione particolarmente utile, sia per approfondire il comportamento di queste ultime (per fini di ricerca o controllo di qualità), sia per raccogliere proteine e metaboliti d'interesse industriale che diverse piante secernono proprio dalle radici ("essudati radicali") [InnCoCell].

Accanto alle opportunità appena enunciate, coltivare fuori suolo e senza substrato presenta ulteriori vantaggi:

- fiori, frutti, o altre parti edibili o d'interesse industriale, si presentano già puliti al momento della raccolta, ovvero senza residui terrosi;
- si evita la dispersione di nutrienti e fitoterapici nei terreni, problema[6] tipicamente legato all'agricoltura intensiva [Harvey / The Guardian 2019; FAO 2019];
- a fine ciclo non vi è substrato esausto da smaltire[7] né terreno da ammendare.

1.2.1.2 **Criticità**

Di contro, la mancanza di substrato rende più suscettibili le piante a variazioni di regime idrico e nutritivo [Tesi 2002]: alterazioni repentine delle condizioni al contorno (in particolare temperatura e umidità) o del dosaggio di soluzione nutritiva (p.e. a causa di un blackout o avarie), potrebbero determinare un deperimento irreversibile delle piante [Lakhiar et al. 2018 a; Li et al. 2018].
Nei giorni più caldi un'interruzione di corrente elettrica di durata superiore a un'ora potrebbe essere fatale [Otazú 2010]. Raccomandabile è pertanto predisporre sistemi di back-up e protocolli d'intervento [Vedantu].

Restano da approfondire: la caratterizzazione delle diverse comunità microbiche che possono instaurarsi all'interfaccia tra radici e aerosol [Eldridge et al. 2020], il modo in cui le piante interagiscono con esse e le eventuali differenze tra tale microflora e quella che nelle coltivazioni in campo popola la rizosfera[8].

---

[5] Piuttosto diffuso nei consumatori è un certo scetticismo sulla sapidità di quanto prodotto in serra e attraverso tecniche di coltivazione fuori suolo. In un'intervista al Gambero Rosso un docente dell'Università di Bologna spiega come con queste tecniche sia possibile sottoporre scientemente a stress salino o luminoso le piante per stimolarle a produrre vitamine, antiossidanti o pigmenti, al fine di ottenere prodotti di qualità [Zordan / Gambero Rosso 2018]

[6] Accumuli eccessivi di fertilizzanti e sostanze inquinanti possono infatti essere causa di un'anormale acidificazione del suolo e provocare eutrofizzazione in mari, specchi e corsi d'acqua limitrofi, intaccare le falde acquifere, alterare il ciclo biogeochimico dell'azoto – minacciando la biodiversità, peggiorando la qualità dell'ambiente e danneggiando, anche gravemente, interi ecosistemi [Britannica b; FAO 2021, p. 15]

[7] Lo smaltimento può essere costoso e problematico. La lana di roccia (tra i substrati più impiegati in idroponica), p.e., non è idonea alla termovalorizzazione, né al conferimento discarica, se non previo trattamento [Cordis 2020]

[8] «Parte del suolo attorno alle radici di una pianta […] sede di importanti interazioni tra pianta e microflora del suolo» [Treccani b]

1.2.2 **Ambiente di coltivazione**

1.2.2.1 **Coltivazioni in ambiente protetto e controllato**

L'aeroponica è comunemente praticata in **ambiente protetto e controllato**, cioè in sistemi chiusi o semichiusi in cui condizioni microclimatiche, quali temperatura, umidità, luce, ecc. possono essere regolate secondo le necessità delle specifiche colture, e le piante sono in qualche misura difese dalla minaccia di eventi meteorologici avversi, parassiti e infestanti.

Figura 2 Coltivazione aeroponica di fragole in serra a Policoro (MT) in Basilicata, Italia. FruitHydroSinni [Iannuziello / Fresh Plaza 2021]

Figura 3 Modulo Agricooltur ® MiniHortus nella cucina di un ristorante a Torino. [Agricooltur]

Le **coltivazioni protette** abilitano una serie di vantaggi.
Primo fra tutti, la protezione del raccolto dalle intemperie. I rischi connessi a fenomeni meteorologici, cui è atavicamente esposta l'agricoltura tradizionale, sono fortemente ridimensionati.
Crescendo in condizioni di quasi-isolamento dall'ambiente esterno, le piante sono, inoltre, meno soggette a malattie e alle aggressioni di muffe e altri infestanti [Lakhiar et al. 2018 b] (non essendo contemplato l'utilizzo di terra o altri substrati eventuali patologie, certamente, non possono propagarsi per mezzo di questi).
Implementando adeguate misure per la lotta biologica (p.e. reti, all'aperto o in serre semiaperte; attenti protocolli di igiene al chiuso), il ricorso a pesticidi può essere idealmente azzerato, l'impiego di fitofarmaci sensibilmente ridotto [NASA 2006; Agrotonomy 2020; Puccinelli, Pardossi & Incrocci 2021].

Intervenendo sul microclima, e con l'eventuale ausilio di luci di assimilazione, è possibile, inoltre, produrre durante tutto l'anno (senza stagionalità) [Lakhiar et al. 2018 a], in maniera indipendente dalla fascia climatica e dalle condizioni meteorologiche esterne, così come riprodurre le condizioni idonee allo sviluppo di specie che, altrimenti, nell'area climatica in cui s'intende operare, non attecchirebbero; il tutto con una certa prevedibilità del raccolto.
Ciò permette di adattare in tempi più rapidi l'offerta alla domanda, limitando così le scorte degli output della produzione per loro natura deperibili (produzione *zero-inventory*). Riattrezzare la produzione (ossia modificare quantità o qualità da coltivare) ha costi relativamente contenuti ed è fattibile in tempi brevi, così si può rispondere più prontamente alla volatilità del mercato [Benke & Tumkins 2017].

1.2.2.2 **Coltivazioni all'aperto**

Coltivazioni aeroponiche all'aperto sono comunque praticabili. Particolarmente indicate per questo scopo sono i moduli di coltivazione a torre (esempi in Figura 4, Figura 5 e Figura 6). All'aperto come al chiuso rimane comunque necessario avere accesso costante a una fornitura d'acqua e di corrente elettrica.

Figura 4 Coltivazione outdoor di **Nature Crisp** in Georgia (USA) [Agrotonomy]

Figura 5 Moduli commerciali **Hexagro Poty** (2020) [Maccotta / Wired 2020]

Figura 6 Terrazza ***Cielo Verde*** a West Hollywood, California (USA) [Agrotonomy]

Benché progettati per giardini e ambiente domestico, possono essere impiegati anche per produrre grandi volumi in contesti organizzati [Agrotonomy 2020] sia all'aperto che al chiuso (come nella serra in Figura 2); nonché per finalità didattiche o in opere d'inverdimento di uffici o altre aree urbane [Hexagro; AeroSpring].

1.2.3 **Razionalizzazione degli spazi**

Disponendo opportunamente i moduli di coltivazione è possibile realizzare varie configurazioni di layout in risposta alle specifiche esigenze della produzione e dello spazio in cui essa è implementata [Aeroponica International 2015; Gopinath, Vethamoni & Gomathi 2017].

Figura 7 Sistema con portapiante disposti su **piani inclinati** (profilo ad A).
Coltivazione aeroponica di foglioline di cavolo riccio (*Brassica oleracea* var. *sabellica*) presso la serra "The Land" nel parco EPCOT Disney World di Orlando, Florida (USA).
Foto: Benjamin D. Esham [Wikimedia Commons 2008]

Figura 8 Sistema con portapiante disposti su **piani verticali** in uno stabilimento della startup americana Plenty a Pasedena, California (USA)
Foto: Spencer Lowell [Repko / CNBC 2022]

Particolarmente promettente è l'opportunità di coltivare su più piani (**orti verticali**) (vedi § 1.2.3.1). Un'altra soluzione consiste nell'inclinare i pannelli su cui sono posizionati gli elementi portapiante, realizzando profili ad A o piani verticali (vedi Figura 7 e Figura 8) (le due soluzioni possono essere eventualmente combinate). La risposta del sistema produttivo cambierà in funzione dell'esposizione alla luce e alla soluzione nutritiva [Tittarelli & Ortolani 2014], tuttavia, a fronte dei dovuti accorgimenti tecnici, è possibile osservare interessanti incrementi della produttività rispetto a quelle che sono le prospettive di una serra tradizionale.

1.2.3.1 **Orti verticali**

Accanto ad altri metodi di coltivazione fuori-suolo (quali idroponica e acquaponica), l'aeroponica è una delle tecnologie mediante le quali è possibile realizzare orti e fattorie verticali.

Figura 9 Serra aeroponica industriale AeroFarms ® negli Stati Uniti d'America. Just Greens, LLC [AeroFarms]

In Despommier 2009 è riportato che in 1 ha di orto verticale è possibile pareggiare la produzione dai 4 agli 8 ha di terra adibita ad agricoltura tradizionale (a seconda della varietà coltivata).
Si riportano un paio di esempi notevoli: presso la vertical farm *Nature Urbaine*, ubicata sul tetto di uno dei padiglioni del polo fieristico Paris Expo Porte de Versailles, si produce in aeroponica più di 1 Mg al giorno di frutta e verdura su un'area di 14 000 m^2 [Bianchini / Inexhibit 2021]; l'impresa statunitense AeroFarms (impianto in Figura 9) dichiara di riuscire a ottenere un rendimento per unità di superficie fino a 390 volte superiore a quello di un'analoga coltivazione in pieno campo.

Il **vertical farming** è un mercato in forte crescita. Attualmente valutato in 4,3 miliardi di dollari, secondo recenti proiezioni potrebbe toccare i 20 entro il 2028 [Kite-Powell / Forbes 2022]; in Barclays 2020 si stima un giro d'affari potenziale di 50 miliardi di dollari. Su di esso si sono concentrati investimenti di fondi e aziende del comparto AgriTech, nonché sforzi in ricerca e sviluppo di importanti player tecnologici (tra cui General Electric, Panasonic, Philips e Grundig) [Gupta & Ganapuram 2019]. A gennaio 2022 il colosso statunitense della distribuzione alimentare Walmart ha siglato un accordo di collaborazione strategica da 400 milioni di dollari con la startup californiana Plenty [Repko / CNBC 2022] che produce ortaggi a foglia in orti verticali aeroponici. Ad oggi si tratta del più grande investimento da parte della GDO su questa tecnologia.

Estensione avveniristica di questa applicazione è lo *skyfarming*, che colloca fattorie verticali all'interno o lungo la superficie di grattacieli detti *farmscrapers* [Germer et al. 2011].

1.3 **Sistemi aeroponici**

Al fine di meglio adattarsi alle esigenze delle specie coltivate, al sito di ubicazione e allo scopo della produzione, negli anni sono stati messi a punto una varietà di sistemi per la coltivazione aeroponica (c.d. sistemi o moduli aeroponici) differenti per:

- forma (a contenitore o canaletta, a superfici inclinate o verticali, a torre, a piramide…)
- dimensioni (per ingombro e numero di piante che possono accogliere);
- caratteristiche del gruppo di fertirrigazione (per numero, tipologia, parametri tecnici, materiali e quant'altro - di serbatoi, ugelli, pompa, tubi…);

Essi possono eventualmente integrare elementi ausiliari quali: sensori, controlli da remoto, carrelli mobili, luci di assimilazione, filtri di aerazione, ventole, elementi riscaldanti, condotte per il ricircolo della soluzione nutritiva non assorbita, sottosistemi per la somministrazione di CO_2, ossigeno, ozono, ecc.

1.4 **Specie coltivabili**

L'aeroponica risulta particolarmente adatta a coltivare alcune piante da fiore e specie orticole a ridotto accrescimento [Tittarelli & Ortolani 2014; De Lucia 2018 a; Puccinelli, Pardossi & Incrocci 2021]. In ambito agroalimentare le cùltivar con cicli colturali più brevi e più alti margini di guadagno sono generalmente preferite in quanto permettono di ripagare più rapidamente i costi d'investimento. L'aeroponica mal si presta, invece, a colture frutticole e cerealicole con cicli più lunghi e piante di dimensioni elevate per cui sistemi *ad hoc* sono ancora in fase di sviluppo [Puccinelli, Pardossi & Incrocci 2021].

In Tabella 1 è riportato un elenco delle specie coltivabili in aeroponica, raggruppate secondo una classificazione informale. Figurano: i) **specie orticole ed erbe**; ii) **specie floricole**; iii) **piante officinali**; iv) specie da cui sono ricavabili **spezie** e **olii essenziali** di pregio (difficilmente ascrivibili alle altre categorie). Le prime sono a loro volta suddivise in base all'organo edule, ovvero per come si presenta il prodotto per il consumo alimentare (a foglia[9], a frutto, a seme, ecc.).

Specie orticole	
a foglia: lattuga (1, 2, 3, 4, 11), radicchio, indivia (2, 3, 4, 11), spinaci (7, 8), cicoria (14), crescione (7) **aromatiche**: basilico (2, 3, 4, 5, 6), rucola, prezzemolo (3, 5, 8), salvia (2, 8), sedano, songino (3), timo, menta, finocchietto, santoreggia (5, 8), origano, rosmarino, alloro, maggiorana, alloro, erba cipollina, dragoncello (5)	
da frutto: pomodoro, peperone, zucchina, melanzana, fragola (2, 3, 10, 11), melone (2, 3, 10), cetriolo (2), anguria, peperoncino (10)	
tuberi: patate (13) e igname (14)	**a bulbo**: cipolla (20)
a fiore (crocifere): cavolfiore, broccoli (2, 3, 10), verza (7), colza (9)	
a seme: senape (8); come micro-ortaggi, sono prodotti germogli di lenticchie, piselli e riso (4).	
Specie floricole	
garofano, rosa, crisantemo, iris, tulipano, narciso, gladiolo, fresia, gerbera (2), borraggine (11)	
Piante officinali (12): echinacea (15, 16), zenzero, withania, valeriana, bardana maggiore, ortica (16)	
Piante per **spezie** o **olii essenziali**: zafferano (17), coriandolo (11), lavanda (18) e canapa (19)	
Fonti[10] (**1**) [He, Qin & Lee 2013; Ali et al. 2015; Barla, Salachas & Abeliotis 2020] (**2**) [Tittarelli & Ortolani 2014] (**3**) [AgriPonic 2016] (**4**) [Agricooltur] (**5**) [Aromi Verdoliva] (**6**) [Puccinelli, Pardossi & Incrocci 2021] (**7**) [AeroFarms] (**8**) [PonicsTech] (**9**) [Verdoliva 2013] (**10**) [Agrotonomy] (**11**) [HexAgro] (**12**) [Cultipharm 2021] (**13**) [Otazú 2010; Mobini, Ismail & Arouiee 2015; Tunio et al. 2020; Wasilewska-Nascimento et al. 2020] (**14**) [Balogun, Maroya & Asiedu 2014; Acheampong et al. 2020; Aighewi et al. 2021] (**15**) [Yuvaraj & Subramanian 2016] (**16**) [Movahedi & Rostami 2020] (**17**) [Souret & Weathers 2000] (**18**) [La Rienca 2014] (**19**) [Ferrini et al. 2021] (**20**) [Mouroutoglou et al. 2021]	

Tabella 1 Specie vegetali coltivabili in aeroponica

L'appellativo "**specie orticola**" (o "pianta ortense") designa le piante erbacee raccolte, solitamente prima della maturazione fisiologica (e quindi prima che inizi la fase di senescenza), per l'alimentazione umana, in parte o interamente, a crudo o previa cottura [De Lucia 2018 b].

Tra le "**specie floricole**" sono elencate le piante da fiore coltivate principalmente a scopo ornamentale (inclusi fiori eduli)[11].

Sono state citate tra le piante officinali le specie che le fonti utilizzate indentificano come tali. L'OMS considera "**pianta officinale**" (o p. medicinale) "ogni vegetale che contenga, in uno o più dei suoi organi (fitocomplesso), sostanze che possono essere utilizzate a fini terapeutici o preventivi, o che sono precursori di emisintesi chemio-farmaceutiche" [Tassinari et al. 2020, p. D-420]. In Italia la loro coltivazione, raccolta e prima trasformazione è disciplinata dal D.lgs. 75/2018.

[9] Deliberatamente le erbe aromatiche sono state assimilate agli ortaggi a foglia

[10] Le fonti riportate sono pubblicazioni scientifiche (1, 6, 13→17, 19), documenti divulgativi (2, 3) o presentazioni agli investitori, siti web, cataloghi o altro materiale prodotto da o su aziende che adoperano l'aeroponica o commercializzano sistemi di coltivazione aeroponici (4, 5, 7→12, 18)

[11] La cicoria è stata inserita tra gli ortaggi a foglia, la lavanda è citata tra gli olii essenziali, sebbene entrambe siano specie trattate anche in floricoltura.

Le varie specie coltivabili possono avere esigenze molto diverse tra loro e anche a seconda dell'oggetto e dello scopo della produzione la complessità del sistema produttivo e dei processi, parimenti, può variare di molto. A ciascuna fase della vita della pianta (o del ciclo colturale) possono corrispondere una o più attività e specifici bisogni.
Per esempio: se l'oggetto della produzione sono cespi d'insalata, il raccolto potrebbe avvenire prima della comparsa di infiorescenze (come nel caso della lattuga), se, invece, si vogliono produrre frutti propriamente detti, allora sarà necessario considerare all'interno del processo produttivo l'impollinazione (artificiale o per via entomogama) e lo sviluppo dei frutti; ancor più diverse saranno le caratteristiche di una produzione che ha per oggetto gli essudati radicali di cùltivar impiegate in ambito farmaceutico o nella cosmesi. Inoltre, nell'arco di un anno una stessa pianta, prima di essere sostituita da una nuova, potrebbe dare più di un raccolto (o più in generale: occasioni per estrarre da essa l'output desiderato), oppure potrebbe essere necessario preparare nuove piante per ogni ciclo produttivo.

1.5 **Storia**

Il primo utilizzo documentato di «una tecnica per approfondire la fisiologia degli apparati radicali di alcune specie vegetali spruzzando varie sostanze nell'aria circostante» risalirebbe al 1910 – descritto dallo scienziato russo Vladimir M. Arcichovskij in un articolo dal titolo "*O vozdušnych kul'turach rastenij*" (<*О воздушных культурах растений*>, traducibile in italiano come "*Sul coltivare piante in aria*") pubblicato l'anno successivo su una rivista specialistica di Agronomia sperimentale [Dadykin 1978]. Un rudimentale sistema aeroponico utilizzato con finalità analoghe è citato in Barker 1922. Vent'anni dopo, in Carter 1942 si promuove la tecnica come pratico modo per esaminare radici di piante vive [Mbiyu et al. 2012; Lakhiar et al. 2018 a].

Figura 10 Modulo aeroponico a contenitore in laboratorio di ricerca (1976) [Zobel et al. 1976]

Figura 11 Coltivazione aeroponica presso la colonia di Satariya in Israele (1981) [Saar 1981]

Nel 1957, presso i laboratori *Earhart* di Pasadena in California, il ricercatore olandese Frits W. Went coltiva con successo piante di caffè e di pomodoro tenendone le radici sospese al buio all'interno di contenitori a tenuta stagna nei quali soluzioni a base d'acqua e sali nutritizi sono somministrate sotto forma di fine nebbia mediante atomizzatori [Zobel et al. 1976; Lakhiar et al. 2018 a; Tunio et al. 2020]. Went conia il termine "aeroponica" [Lakhiar et al. 2018 a], dall'unione di "aeros" <ἀέρος> e "ponos" <πονος>, che in greco antico stanno rispettivamente per "aria" e "lavoro", sulla falsariga delle parole "geoponica" (agricoltura; letteralmente: "lavoro della terra"), e "idroponica", altra tecnica di coltivazione fuori suolo.

L'aeroponica rimane relegata allo studio della struttura delle radici delle piante nei laboratori di ricerca fino al 1966, anno in cui per la prima volta è utilizzata per coltivare piante a fini commerciali [Lakhiar et al. 2018 a; Tunio et al. 2020].

Nel 1982 l'apertura del Padiglione *The Land*, spazio espositivo dedicato alla divulgazione scientifica, presso il parco EPCOT Disney World di Orlando in Florida porta l'aeroponica all'attenzione del pubblico [Battaglia 2017; Lakhiar et al. 2018 a; Tunio et al. 2020]. Ancora oggi è possibile visitare colture dimostrative (vedi Figura 7).
Nel 1983 l'impresa americana GTi introduce sul mercato il *Genesis Rooting System* il primo sistema aeroponico commerciale a ciclo chiuso ad essere venduto su larga scala [*ibidem*].

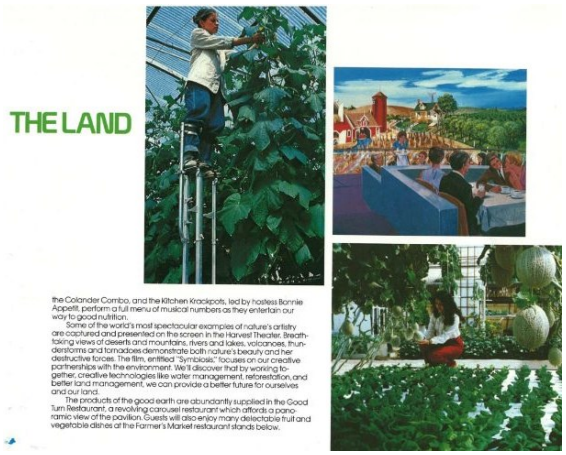


Figura 12 Brochure promozionale (1982) del Padiglione *The Land* all'EPCOT Center di Orlando in cui è possibile notare coltivazioni fuori suolo [Soberman / WDWNT 2020]

Figura 13 Esemplare di *Genesis Rooting System* (1983)

Foto: Richard Stoner II [Wikimedia Commons 2007]

Il potenziale impiego dell'aeroponica nella produzione di cibo in moduli aerospaziali ha suscitato l'interesse della NASA che ha condotto e cofinanziato ricerche in tal senso alle porte del nuovo millennio [NASA 2006; Battaglia 2017].

La storia continua nel paragrafo successivo dedicato alle possibilità d'impiego, prospettive di ricerca e opportunità più promettenti di questa tecnologia.

1.6 **Applicazioni**

Nata in ambiente di ricerca e utilizzata ai suoi albori primariamente al fine di condurre studi d'interesse botanico, dell'aeroponica, dalla prima metà del secolo scorso ad oggi, sono state e sono tuttora oggetto di studio diverse possibili applicazioni tecniche e commerciali in produzioni a vario scopo, sia nell'ambito di progetti di ricerca applicata che di iniziative di mercato, nei settori agroalimentare, farmaceutico, nutraceutico, erboristico, cosmetico [Gavira et al. 2022], in floricoltura e vivaismo ornamentale.

Le opportunità d'impiego di questa tecnologia su scala industriale, fondamentalmente, dipendono dalla possibilità di ottenere per mezzo di essa cibo o materie prime in maniera conveniente (e più conveniente rispetto alle alternative viabili).
Se fino a pochi anni fa l'aeroponica, benché attenzionata da comunità scientifica e un discreto numero di imprenditori-innovatori, era considerata una tecnologia difficilmente scalabile per via degli elevati investimenti iniziali e costi di gestione (in particolare: per integrare capitale intellettuale specializzato richiesto e far fronte ai consumi di energia elettrica); il crescente interesse per pratiche agrarie alternative e fuori suolo ha indotto alcune aziende a sviluppare moduli più economici rispetto al passato [Puccinelli, Pardossi & Incrocci 2021] e software per supportare la produzione [Lakhiar et al. 2018 b].
Progressi nell'efficientamento dei sistemi di illuminazione a LED e di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili potrebbero nel prossimo futuro favorirne ulteriormente la diffusione[12].

Soluzioni domestiche e per il giardinaggio, sia per hobbisti sia per professionisti, sia indoor che outdoor, sono sul mercato da diversi anni [Lakhiar et al. 2020].
Sistemi aeroponici possono essere adoperati, inoltre, per salvaguardare la freschezza di erbe aromatiche e ortaggi a foglia coltivati con la stessa tecnica, mantenendo la pianta viva (ossia non recidendo le radici) fino al momento della vendita o del consumo [Agricooltur]. La startup italiana Agricooltur (che fa da cornice al caso studio presentato nel Capitolo 3 di questo elaborato) commercializza per lo scopo microserre ed espositori di mantenimento [*ibidem*]. HexAgro, un'altra azienda italiana che produce sistemi aeroponici, vende piante già germogliate pronte per essere inserite in moduli per giardinaggio e arredamento [HexAgro].

Recente è il filone di ricerca che studia l'impiego della tecnologia aeroponica in campo farmaceutico [Lakhiar et al. 2018 a; Iliev 2020]. Come già notato in § 1.2.1.2, l'aeroponica facilita l'estrazione degli escreti radicali [InnCoCell] e può incrementare la biosintesi di sostanze d'interesse farmacologico e nutraceutico [Chandra et al. 2014; Wimmerova et al. 2022]; diverse le specie officinali coltivabili con successo [Iliev 2020; Cultipharm 2021]; ancora, secondo uno studio condotto dall'ente pubblico di ricerca italiano ENEA, sostanze necessarie alla produzione di vaccini potrebbero essere ottenute a partire da organismi vegetali coltivati in ambiente controllato con pratiche fuori suolo come l'aeroponica, ottenendo notevoli risparmi sul ciclo produttivo [S. / Teatro Naturale 2021; Sticchi / RAI 2022].

Ancora scarsamente esplorato è l'utilizzo di questa tecnologia per la produzione di biocarburanti, filati o materiale da costruzione, benché tra le specie efficacemente coltivabili in aeroponica figurino, per esempio, colza (*Brassica napus*) e canapa (*Cannabis sativa*) idonee a uno o più di questi scopi.

[12] Gli stessi argomenti che sono utilizzati a supporto del vertical farming in Gupta & Ganapuram 2019 e Barclays 2020 possono essere usati a maggior ragione in favore dell'aeroponica, che si distingue tra le altre tecniche adoperabili nelle *vertical farm* per i limitati consumi d'acqua e per l'alto rendimento del raccolto.

Tra le diverse opportunità abilitate da questa tecnologia, le più promettenti, però, riguardano la **sicurezza alimentare**[13] e la **produzione sostenibile di cibo**.

Proiezioni recenti prevedono che la domanda di cibo, per effetto dell'aumento demografico e dei redditi, aumenterà entro il 2050 almeno del 45% rispetto alle cifre del 2017 [SoCA 2021].
Circa un quarto delle terre coltivabili è stato già dichiarato improduttivo, infertile o inidoneo al proseguimento di attività agricole [Popp et al. 2014]; l'agricoltura intensiva continua a essere causa di inquinamento, degradazione del suolo e perdita di biodiversità [Harvey / The Guardian 2019; FAO 2019]; il cambiamento climatico procede a ritmi sempre più preoccupanti [SoCA 2021; Milman 2021] causando ingenti danni, tra gli altri, anche alle colture [EPA 2017].
Al 2020 sono circa 2 miliardi le persone che non hanno ancora un accesso sicuro all'acqua[14].
Si prevede che entro il 2025 metà della popolazione mondiale vivrà in aree soggette a scarsità d'acqua [UNICEF] e in condizioni di severo stress idrico entro il 2050 [MIT 2014]. Gli effetti del cambiamento climatico (tra cui sempre più frequenti siccità e progressiva desertificazione di aree temperate [SoCA 2021]) e l'inquinamento di fiumi, laghi e falde, non fanno che esacerbare le problematiche connesse all'accesso all'acqua, che negli anni a venire rischiano di essere tra le principali cause di conflitto e di migrazioni di massa [Mercuri / Treccani Atlante 2020].

L'aeroponica è una pratica agraria fuori suolo che consente di ridurre drasticamente i consumi d'acqua, di usare i fertilizzanti in modo più efficiente, di azzerare il ricorso a pesticidi e di aumentare la produzione a parità di superficie occupata.

In contesti ostili – caratterizzati, p.e., da frequenti siccità, limitata disponibilità di aree coltivabili o inquinamento dei suoli – particolarmente interessante per la lotta alla fame e per la sicurezza alimentare è la possibilità di coltivare localmente in aeroponica tuberi dal discreto apporto calorico e nutrizionale, quali patate e igname[15] [Lakhiar et al. 2018 a; Acheampong et al. 2020; Tunio et al. 2020; FAO 2020], così da rendere disponibile ed accessibile cibo fresco e di qualità.

La compatibilità dei sistemi di coltivazione aeroponici con il tessuto urbano potrebbe accorciare alcune filiere (con conseguenti risparmi economici e in termini di emissioni inquinanti e climalteranti) e contribuire a rafforzare e rendere più resilienti le reti di approvvigionamento alimentare[16].
Moduli aeroponici possono essere integrati in mense, luoghi della ristorazione e della distribuzione alimentare. Inoltre, progetti orientati alla **Rigenerazione Urbana** (p.e. la ristrutturazione di edifici in stato d'abbandono, o la riqualificazione di stabilimenti industriali

---

[13] Il lemma **sicurezza alimentare**, che traduce l'inglese **food security**, è qui inteso nell'accezione indicata nella *Dichiarazione di Roma sulla sicurezza alimentare globale* sottoscritta durante il *World Food Summit* del 1996.
Secondo tale definizione (tuttora adottata dalla FAO e comunemente accettata a livello internazionale) «vi è sicurezza alimentare quando tutte le persone, in ogni momento, hanno accesso fisico, [sociale] ed economico ad alimenti sufficienti, sicuri e nutrienti che garantiscano le loro necessità e preferenze alimentari per condurre una vita attiva e sana» [FAO, 1996; Simon, 2012]

[14] Per "accesso sicuro" ("*safely managed drinking services*") s'intende la disponibilità di servizi gestiti in modo tale da assicurare che l'acqua potabile non sia contaminata da batteri fecali e rispetti gli standard dell'OMS stabiliti per le concentrazioni di arsenico e fluoro. Cfr. UNICEF & OMS 2019, p. 29.

[15] L'**igname** (o *yam*) (*Dioscorea rotundata* e *D. alata*), poco diffuso in Europa, è estesamente coltivato nelle fasce climatiche tropicali e temperate di Africa occidentale, Oceania e America centrale; dal sapore e dalla forma simile a quello delle patate dolci, è spesso trattato come alimento di base nella dieta delle popolazioni locali [Treccani c].

[16] Secondo Hati & Singh 2021 la diffusione in contesti urbani di "smart indoor farms" – combinazione di tecniche agricole fuori suolo, tecnologie smart (*cloud computing*, IA…) e sistemi di *energy harvesting* ("energia racimolata") – si tradurrebbe nella creazione di infrastrutture orientate all'efficienza e alla sostenibilità ambientale, indipendenti dalle condizioni climatiche circostanti e in grado di funzionare autonomamente, ovvero una rete di fonti di approvvigionamento alimentare distribuita e, quindi, più resiliente [Gimenez-Escalante & Rahimifard 2018].

dismessi inglobati nel tessuto urbano) potrebbero dar seguito alla creazione di orti cittadini e ulteriori occasioni per avviare attività imprenditoriali che impieghino questa tecnologia.

In Goldstein 2018 si stima che, se ogni città cominciasse a produrre anche solo il 10% del proprio fabbisogno alimentare tramite sistemi di coltivazione *indoor* basati su metodi fuori suolo come l'aeroponica, 881 000 km^2 di suolo[17], attualmente utilizzati per coltivare (circa l'1,8% dei 4,9 miliardi di ettari globalmente destinati all'agricoltura), potrebbero essere convertiti in aree verdi o coinvolti in piani di riforestazione, contribuendo a evitare emissioni di gas serra e ad assorbire anidride carbonica dall'atmosfera.

[17] Si tratta di un'area pari a circa 680 volte la superficie della Città di Roma (primo comune italiano per estensione: 1287,36 km^2 [ISTAT 2011].

2 L'**Analisi del ciclo di vita**

L'**Analisi del ciclo di vita** (in inglese ***Life Cycle Assessment***, da cui l'acronimo LCA) è un metodo strutturato, oggetto di standard internazionale, per valutare il consumo di risorse, il rilascio di emissioni e i potenziali impatti sull'ambiente e sulla salute umana attribuibili a un prodotto nel corso del suo intero ciclo di vita [ISO 2006 a, b; Commissione Europea, JRC-IES 2010].

Le norme internazionali **ISO 14040**:2006 e **ISO 14044**:2006 (e successivi aggiornamenti) recepite e armonizzate a livello nazionale e comunitario, forniscono le definizioni e le linee guida per eseguire questo tipo di studio. In particolare: la ISO 14040 ne presenta princìpi e quadro concettuale di riferimento; la ISO 14044 specifica i requisiti delle analisi ed entra nel merito degli aspetti metodologici [ISO.org a, b].

Nelle norme citate, l'Analisi del ciclo di vita è definita come: «compilazione[18] e valutazione degli elementi in ingresso e in uscita e dei potenziali impatti sull'ambiente di un *sistema di prodotto* attraverso il suo *ciclo di vita*», ove per **ciclo di vita** ("*life cycle*") s'intende l'insieme delle «fasi consecutive e interconnesse che descrivono un *sistema di prodotto*: dall'acquisizione delle materie prime (…) fino allo smaltimento finale» [ISO 2006 a, b § 3.2, 3.1].
Mentre il **prodotto** può essere qualsiasi bene o servizio s'intenda studiare (le indicazioni metodologiche sono di carattere generale e possono essere applicate praticamente ad ogni attività umana), con il lemma **sistema di prodotto** ("*product system*") ci si riferisce all'insieme dei processi (con i rispettivi flussi) che del prodotto modella il ciclo di vita [*ivi* § 3.9, 3.28].
In Figura è rappresentato un generico sistema di prodotto.

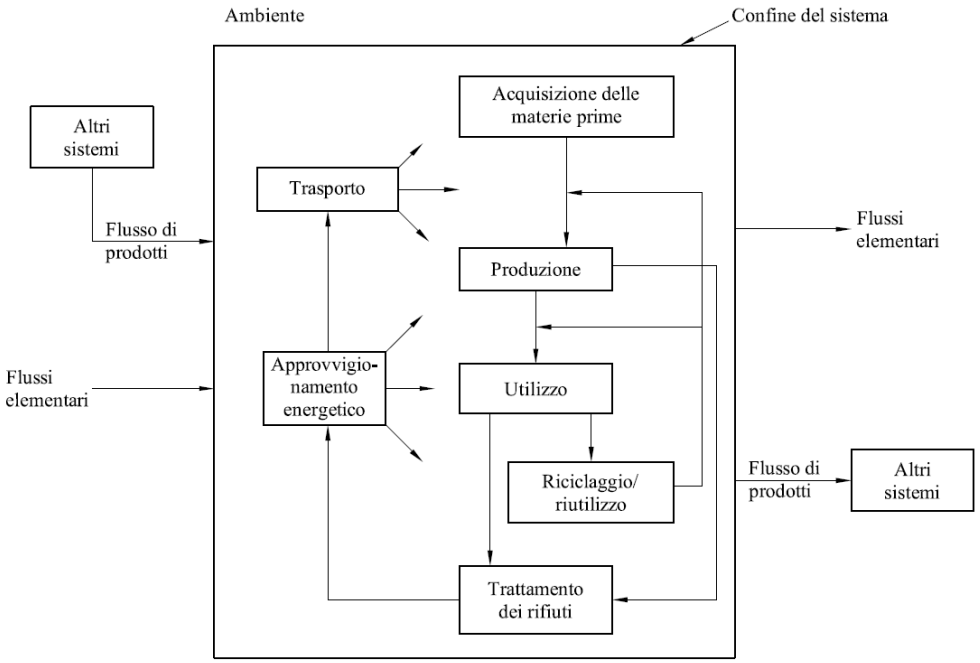


Figura 14 Esempio di **sistema di prodotto** tratto dalla norma UNI EN ISO 14040:2006 [UNI 2006]

[18] Nel testo di riferimento in lingua italiana [UNI 2006 § 3.2] "compilazione" traduce alla lettera l'inglese *compilation* [ISO 2006 a, b § 3.2] inteso come: l'atto di raccogliere informazioni da varie fonti per produrre un elenco o un rapporto (cfr. https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/compilation)

2.1 **Caratteristiche**

L'Analisi del ciclo di vita è un metodo quantitativo, fondato sul sapere scientifico e che consente di coprire un ampio ventaglio di questioni d'interesse ambientale [Hauschild et al. 2018].
Le valutazioni (d'impatti, consumi ed emissioni) sono prodotte a partire dalla ricostruzione delle interazioni tra le parti del c.d. sistema di prodotto e tra quest'ultimo e l'ambiente in termini di flussi di materia e di energia. Una volta identificati e quantificati tali flussi, si procede col determinare i potenziali impatti ad essi riconducibili ("risultati d'impatto"). A questo scopo sono impiegati modelli basati su comprovati nessi di causalità o su evidenze empiriche ("metodi di valutazione degli impatti"); è così possibile trattare in modo oggettivo varie problematiche ecologiche (selezionare "categorie d'impatto") come: cambiamento climatico, esaurimento di risorse non rinnovabili, assottigliamento dello strato di ozono, tossicità ed ecotossicità, uso di suolo, consumo d'acqua dolce, domanda di energia primaria, ecc. In linea di principio, il metodo si presta a considerare tutti gli aspetti dell'ambiente naturale, della salute umana e quelli legati al consumo di risorse, al fine di far emergere, e quindi valutare, il maggior numero di potenziali costi opportunità (*trade-off*) connessi al sistema oggetto dello studio [ISO 2006 a, b].

Il metodo s'interessa dell'intero ciclo di vita del prodotto[19]. Grazie a questa visione d'insieme si può risalire ai processi (o fasi della vita del prodotto) più "impattanti" (cioè, dai cui flussi dipendono i maggiori carichi sull'ambiente) e sui quali, quindi, porre più attenzione e orientare interventi migliorativi, nonché valutare cosa comporta la modifica di parti del sistema sulle altre fasi del ciclo di vita.
L'enfasi del nome sul ciclo di vita segnala l'importanza di trattare questa classe di problemi esaminando i sistemi nella loro interezza. Questo approccio – detto *Life Cycle Thinking* – non solo consente di individuare le parti del sistema di prodotto che presentano le maggiori opportunità di miglioramento, ma soprattutto permette di esplicitare i trade-off associati alle diverse scelte che si possono fare sul prodotto, p.e.: in materia di organizzazione della produzione, rispetto al suo utilizzo e alla gestione del suo fine vita [Life Cycle Initiative].
L'adozione di una prospettiva che del prodotto tenga in considerazione tutta la storia "dalla culla alla tomba" (*cradle to grave*) dà, così, l'opportunità di identificare e di prevenire eventuali **passaggi d'onere ambientale** (in inglese "*burden shifting*") da una fase all'altra del suo ciclo di vita [ISO 2006 a, b § 4.1.2; Commissione Europea, JRC-IES 2010]. Questi si verificano quando gli sforzi fatti per ridurre un noto carico sull'ambiente o per migliorare le prestazioni di un certo processo (o fase del ciclo di vita), di riflesso, causano, come effetto indesiderato, l'insorgere di impatti ambientali (potenzialmente maggiori) nei processi (o nelle fasi) a monte o a valle di quelli oggetto dei provvedimenti migliorativi [Hauschild et al. 2018; NYSP2I 2020]. Oltre che tra diverse fasi del ciclo di vita di un prodotto, passaggi d'onere ambientale possono verificarsi anche da una categoria d'impatto ad un'altra o da un luogo ad un altro [Commissione Europea, JRC-IES 2010]. Con un'Analisi del ciclo di vita si evita che situazioni come queste siano trascurate, si esplicitano e quantificano trade-off, così che sia possa decidere in maniera consapevole per quale soluzione optare.
Naturalmente, l'esito del confronto di un'alternativa con la situazione di partenza potrebbe anche mostrare che il cambiamento produca gli effetti sperati senza danni collaterali o, comunque, dia luogo a una situazione preferibile allo *status quo ante*; in questi casi, allo studio si potrà far riferimento per corroborare la bontà delle soluzioni proposte.

[19] Il metodo può tuttavia essere applicato anche per analizzare parti specifiche del ciclo di vita (vedi § 2.3.0.2)

2.2 **Applicazioni**

La metodologia dell'Analisi del ciclo di vita consente di valutare le prestazioni ecologiche di un sistema produttivo in modo oggettivo e tecnicamente argomentato, fornendone un quadro completo e dettagliato.

Le sue caratteristiche la rendono un potente strumento di ricerca i cui risultati possono essere utilizzati per supportare processi decisionali di istituzioni, aziende e consumatori che intendano intraprendere azioni orientate alla sostenibilità, per programmarle e per monitorarne i progressi.

Si riporta, a titolo esemplificativo, un elenco di situazioni in cui l'Analisi del ciclo di vita può trovare applicazione:

- identificazione delle parti di un sistema di prodotto che contribuiscono maggiormente ai suoi impatti su ambiente, salute umana e/o uso di risorse;
- pianificazione di misure di compensazione e/o di riduzione degli impatti;
- comparazione delle prestazioni di specifici beni o servizi;
- valutazione dei potenziali miglioramenti derivanti da scelte gestionali, progettuali (*eco-design*) o d'acquisto (*green procurement*);
- individuazione di criteri di qualifica delle buone prassi e indicatori di prestazione da monitorare;
- impostazione ex ante di politiche pubbliche o valutazione ex post dei loro effetti;
- integrazione nei sistemi informativi aziendali di una contabilità ambientale permanente, per tenere sotto controllo le emissioni, i consumi delle risorse e gli effetti connessi rispetto a processi interni e altre fasi della filiera produttiva a monte e a valle;
- comunicazione ambientale (dichiarazioni ambientali di prodotto, *green marketing*, bilanci di sostenibilità, strategie ESG);
- ottenimento marchi ecologici (*eco-label*).

Benché gli aspetti economici e sociali non siano direttamente contemplati nel metodo LCA, è possibile trattarli usando tecniche analoghe [ISO 2006 a § A.1.1] come *Life Cycle Costing* (LCC) e Social Life Cycle Assessment (S-LCA) che da esso prendono le mosse [Hauschild et al. 2018 § 6.2.3, § 15, § 16].
Alcuni software utilizzati per condurre studi LCA agevolano l'integrazione di questi strumenti per condurre valutazioni sulla sostenibilità che prendano in considerazione tutte e tre le dimensioni della sostenibilità individuate nella teoria della *triple bottom line* [Kloepffer 2008; Sala, Farioli & Zamagni 2012].

2.3 **Fasi del metodo**

Secondo lo standard internazionale, un'analisi del ciclo di vita si articola nelle seguenti 4 fasi:

1. **definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione**;
2. **analisi dell'inventario**;
3. **valutazione degli impatti**;
4. **interpretazione**.

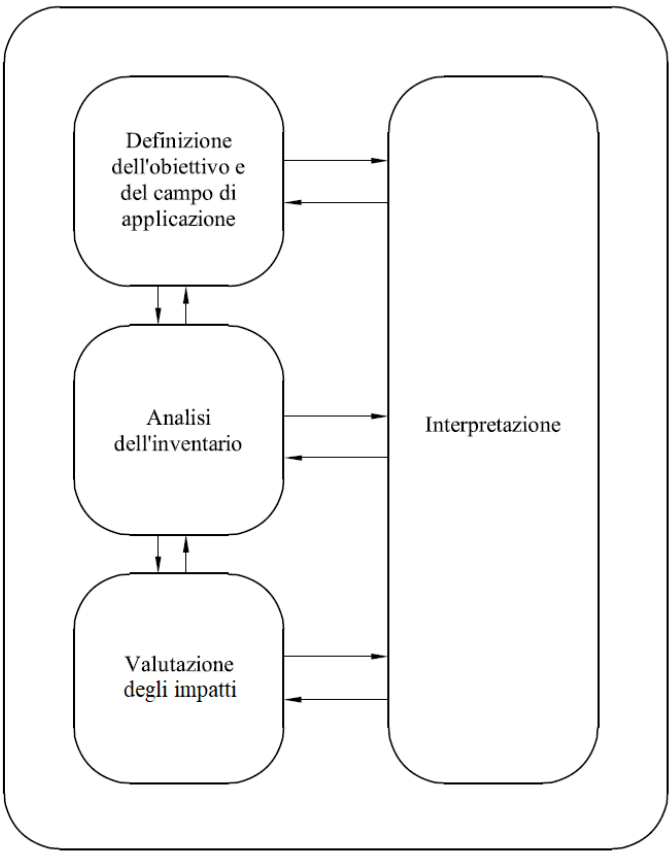


Figura 15 Fasi di un'Analisi del ciclo di vita [UNI 2006]

L'ambizione di trattare in modo completo i sistemi di prodotto e le loro interazioni con l'ambiente si scontra con la loro intrinseca complessità. Condurre un'analisi del ciclo di vita implica la gestione di una massiccia mole di informazioni. Affinché questa complessità sia gestibile, la norma invita per prima cosa a definire obiettivi e campo d'applicazione dello studio, da questi infatti dipenderanno l'estensione e il livello di dettaglio dell'analisi.
L'**obiettivo** ("*goal*") chiarisce le finalità per cui è condotto lo studio e l'uso che s'intende fare dei suoi risultati. Il **campo di applicazione** (o ambito d'indagine; in inglese: "*scope*") specifica i confini del sistema oggetto dello studio, i particolari della sua modellazione, quali categorie d'impatto saranno trattate nella valutazione degli impatti, quali dati si ritengono necessari per conseguire l'obiettivo dello studio.

Nella fase successiva, l'analisi dell'**inventario del ciclo di vita** (***L**ife **C**ycle **I**nventory*), per ciascun processo in cui è scomposto il sistema in esame, sono raccolti i dati su flussi in entrata e in uscita (input e output) al fine di realizzare un quadro completo delle interazioni tra sistema di prodotto e ambiente in termini di consumo di risorse e "rilasci" (qualsiasi forma di scarico o emissione in aria, acqua o suolo; cfr. ISO 2006 a, b § 3.30).

Si procede, poi, alla **valutazione degli impatti** (***L**ife **C**ycle **I**mpact **A**nalysis*) nella quale a partire dalle informazioni raccolte nella fase precedente ("dati d'inventario"), mediante opportuni modelli, si calcolano, per le categorie d'impatto selezionate, i potenziali impatti su ambiente e salute dovuti al consumo di risorse e alle emissioni associate al sistema di prodotto analizzato.

L'ultima fase consiste nell'**interpretazione dei risultati** dell'analisi d'inventario e della valutazione degli impatti. I risultati sono riassunti e discussi per trarre conclusioni e fornire eventuali raccomandazioni per azioni migliorative e studi futuri.

2.3.0.1 Approccio iterativo

Le doppie frecce in Figura 15 indicano che le quattro fasi non sono semplicemente sequenziali, l'Analisi del ciclo di vita è, piuttosto, una tecnica iterativa, nella quale il livello di dettaglio di ciascuna parte dello studio è affinato per passaggi successivi [ISO 2006 a § 4.1.5].

La necessità di compiere determinate scelte operative potrebbe, infatti, non essere chiara fin da subito, bensì emergere in corso d'opera. È comune, ad esempio, aggiornare la modellazione del sistema di prodotto alla luce di nuove informazioni o di risultati imprevisti, confrontarsi con difficoltà nel reperimento dei dati e dover per questo motivo introdurre nuove assunzioni, ridiscutere il perimetro dell'analisi, persino gli obiettivi dello studio [ISO 2006 a § 5.2.1.2; ISO 2006 b § 4.2.1, § 4.3.3.4, § 4.4.2.4].

2.3.0.2 Studi dell'inventario del ciclo di vita e analisi limitate a parti del ciclo di vita

Ci sono casi in cui l'obiettivo dell'analisi può essere conseguito limitando lo studio all'analisi dell'inventario (LCI) e all'interpretazione dei suoi risultati (si esclude, cioè, la fase di valutazione degli impatti). A questo tipo di studi ci si riferisce con il nome di "**studi dell'inventario del ciclo di vita**" (studi di LCI) [UNI 2006]. Le istruzioni contenute nelle norme citate restano valide anche per questi ultimi [ISO 2006 a].

Rilassando i requisiti sui confini del sistema, le norme possono essere applicate anche a studi di analisi dell'inventario e/o di valutazione degli impatti ambientali che, non sono analisi del ciclo di vita propriamente dette, in quanto, pur condividendone approccio metodologico e finalità, s'interessano solo di alcune parti del ciclo di vita del prodotto [ISO 2006 a § A.1.2].
In questa fattispecie rientrano:

- studi ***cradle-to-gate*** ("dalla culla al cancello"): dall'estrazione delle risorse all'uscita dal sito di produzione;
- studi ***gate-to-gate*** ("dal cancello al cancello"): dall'ingresso nel sito di produzione (o di un certo sottosistema) all'uscita dallo stesso;
- studi su parti specifiche del ciclo di vita (per esempio sulla gestione dei rifiuti, sottosistemi, assiemaggi o componenti di un prodotto).

2.3.1 **Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione**

Questa prima fase rappresenta fondamentalmente la pianificazione iniziale di uno studio LCA:

- si rendono note le motivazioni per le quali lo studio è intrapreso, il pubblico cui è destinato e l'utilizzo previsto dei suoi risultati[20];
- si definiscono il sistema oggetto dello studio, le sue funzioni e i suoi confini;
- si selezionano le categorie d'impatto da trattare (e rispettivi metodi di valutazione degli impatti);
- si stabiliscono una o più unità di riferimento (dette "unità funzionali") cui rapportare input, output e impatti del sistema;
- sono indicati per ciascuna categoria di dati da trattare modalità di raccolta e requisiti di qualità.

Secondo la norma definire l'**obiettivo** ("*goal*") di un'analisi del ciclo di vita significa proprio esplicitare quanto al primo punto dell'elenco sopra. Nel Paragrafo 3.2 è proposta una panoramica di potenziali finalità per cui può essere impostato uno studio di questo tipo.

Il c.d. **campo di applicazione** (in inglese "scope"), invece, è individuato dalle attività descritte nei punti successivi; esse meglio specificano l'ambito d'indagine al fine di verificare che estensione e livello di dettaglio ("ampiezza e profondità") dello studio siano compatibili con l'obiettivo stabilito e che consentano di conseguirlo [ISO 2006 a § 5.2.1.1].

Come anticipato, l'Analisi del ciclo di vita è una tecnica iterativa. Man mano che si raccolgono dati e informazioni, vari aspetti del campo di applicazione possono richiedere di essere modificati allo scopo di soddisfare l'obiettivo originale dello studio [ISO 2006 a § 5.2.1.2]. Ciò può essere dovuto proprio all'emergere di informazioni aggiuntive, ma anche a limitazioni impreviste o a vincoli di varia natura [ISO 2006 b § 4.2.3.1] (p.e.: v. sulle risorse stanziate per il progetto, o v. posti sull'uso di alcuni dati a tutela della proprietà industriale).

2.3.1.1 **Confini del sistema**

Nel definire il sistema oggetto dello studio, le norme richiedono di stabilire per esso dei confini ("*system boundaries*"), cioè di decidere quali processi includere nell'analisi [ISO 2006 b § 4.2.3.3]. Le decisioni sui confini del sistema possono influenzare notevolmente i risultati di un'LCA: soltanto dei processi inclusi nell'analisi saranno infatti rendicontati flussi e calcolato il rispettivo impatto ambientale.

Il sistema di prodotto è un modello degli elementi chiave del sistema reale che s'intende studiare[21]. La scelta degli elementi del sistema reale che si andranno a modellare va fatta in relazione all'obiettivo dello studio.

La norma 14040 indica che «non è necessario spendere risorse per quantificare elementi che non alterano significativamente le conclusioni globali dello studio» [ISO 2006 a § 5.2.3].
Ma come si può determinare a priori se quanto omesso altererà in modo significativo i risultati dello studio? La risposta a questo interrogativo risiede nell'approccio iterativo del metodo…

[20] In particolare, se i risultati dello studio saranno utilizzati per esprimere **asserzioni comparative** da divulgare al pubblico, questo va esplicitato in questa fase [ISO 2006 a § 5.2.1.1]. In questi casi la norma ISO 14044 prevede requisiti aggiuntivi [ISO 2006 b § 4.4.5]

[21] cfr. definizione data nell'introduzione del Capitolo 2

Per le informazioni che comportano ricerche più dispendiose, è possibile adottare come punto di partenza dati generici, eventualmente frutto di assunzioni, approssimazioni o stime ritenute ragionevoli e in seguito valutare mediante analisi d'incertezza e sensibilità l'incidenza della loro variabilità sui risultati dello studio e rivedere di conseguenza i confini del sistema [ISO 2006 b § 4.3.3.4].

Nella pratica è pressoché inevitabile trascurare dei particolari e limitare i confini dell'indagine, rispetto a quelli che richiederebbe uno studio ideale. Ogni passo indietro nella filiera produttiva di un bene richiederebbe di ricostruire la storia di ogni elemento coinvolto; se si prendessero in considerazione confini ideali, a forza di andare a ritroso, si renderebbe necessario ricostruire buona parte della storia industriale [Hauschild et al. 2018 § 8.6]. Rispetto al prodotto oggetto di studio, della moltitudine di processi unitari che idealmente andrebbero considerati all'interno dei confini dell'analisi, di fatto solo una piccola parte dà un contributo quantitativamente rilevante nel calcolo dei suoi potenziali impatti [*ibidem*].

Oltre che dall'obiettivo, le decisioni in merito ai confini del sistema possono dipendere da altri fattori, quali: *limitazioni* impreviste che potrebbero presentarsi in corso d'opera (queste circostanze andrebbero rese note e le modifiche apportate giustificate[22]); *ipotesi* (p.e. in uno studio comparativo possono essere tralasciati processi o fasi che si assume non presentino differenze nell'una o nell'altra alternativa); *criteri di esclusione* (da esplicitare in questa fase) [ISO 2006 a, b]. Criteri di esclusione ("*cut-off criteria*") potrebbero essere stabiliti sulla base del contributo relativo di massa, energia sul totale o rilevanza ambientale degli input o degli output del sistema[23] [ISO 2006 b § 4.2.3.3.3].

2.3.1.2 **Unità funzionali**

Tutti i risultati di un'LCA sono rapportati a una o più unità di riferimento ("**unità funzionali**") esplicative del prodotto e delle sue funzioni [ISO 2006 a § 3.20, § 5.2.1; ISO 2006 b § 4.4.1]. L'unità funzionale (UF) stabilisce il riferimento rispetto al quale i flussi in ingresso e in uscita del sistema e, infine, i relativi impatti ambientali[24] sono "normalizzati" in senso matematico.
Per comparare prodotti o processi differenti è fondamentale che proprietà e funzioni dei sistemi trattati siano sufficientemente simili e di conseguenza che le unità funzionali adoperate siano confrontabili: questa c.d. "equivalenza funzionale" è condizione necessaria affinché sia possibile tracciare dei paragoni tra sistemi.
Ad esempio, se il prodotto in questione è una bottiglia o un contenitore, una UF adatta a descriverne la funzione potrebbe essere la sua capacità espressa in litri, così che sia possibile confrontare così imballaggi fatti in diversi materiali o adoperando diversi processi produttivi. Nello studio di sistemi agricoli, poiché la principale funzione di questi ultimi è la produzione di alimenti, è comunemente utilizzata come UF la massa di prodotto idoneo alla vendita (generalmente espressa in kg o tonnellate); un'altra UF opportuna potrebbero essere i metri quadri o ettari per anno di superficie coltivabile, oppure l'apporto nutrizionale di quanto prodotto.

[22] Vedi anche § 2.3.1.3.4
[23] Ad esempio, una regola appropriata, basata su uno di questi criteri, potrebbe trascurare input, output o processi la cui massa (o parimenti l'energia o il contributo al calcolo di un indicatore d'impatto) risulti inferiore a una certa percentuale del totale (p.e. l'1%), purché cumulativamente contribuiscano per meno di una seconda soglia (p.e. il 5%) del totale.
[24] Come si legge sulla norma: «i "potenziali impatti ambientali" sono espressioni relative, in quanto correlate all'unità funzionale di un sistema di prodotto» [UNI 2006]

2.3.1.3 **Dati**

I dati da trattare nella successiva fase di Analisi dell'inventario del ciclo di vita, nonché i loro requisiti di qualità, dipendono dall'obiettivo e dal campo di applicazione dello studio [ISO 2006 b § 4.2.3.6.1]. I dati in questione riguardano input e output di ciascun processo all'interno dei confini di sistema e possono comprendere: materie prime, prodotti, elementi ausiliari[25], sottoprodotti[26], rifiuti solidi, acque reflue, ogni altra forma d'emissione in aria, acqua o suolo (eventualmente anche in termini di radiazioni, rumore, odori).

2.3.1.3.1 **Fonti**

I dati possono raccolti sul campo (*dati primari*), p.e., effettuando misurazioni dirette, somministrando questionari, conducendo esperimenti, analizzando reportistica interna o altra documentazione dei siti di produzione o schede tecniche di macchinari; provenire da fonti terze (*dati secondari*), quali letteratura scientifica o banche dati; ancora, possono essere stimati per mezzo di modelli o in ultima istanza affidandosi al giudizio di esperti.

2.3.1.3.2 ***Foreground system*** vs. ***background system***

Nella pianificazione della raccolta dati, può essere utile distinguere all'interno dei confini del sistema: il c.d. "*foreground system*"[27], costituito dai processi unitari specifici del sistema oggetto dello studio e per cui si ha accesso diretto alle informazioni; e il "background system", insieme complementare, di cui, invece, fanno parte processi più generici (come, ad esempio, trattamento dei rifiuti, fornitura di energia elettrica o di altre commodity) e per i quali non si ha accesso diretto alle informazioni.

Mentre per la modellazione del foreground system si può generalmente contare su dati primari (p.e. forniti dal committente/parte interessata dello studio o raccolti direttamente da chi pratica lo studio), il background system tipicamente è descritto facendo riferimento a banche dati di LCI, contenenti dati medi di settore rappresentativi dei processi su una certa scala geografica [Hauschild et al. 2018 § 8].

[25] Nello standard internazionale "*ancillary inputs*": macchinari o materiali - come imballaggi, lubrificanti, additivi, ecc. - impiegati in un processo, pur non facendo fisicamente parte di uno dei suoi output [ISO 2006 a, b § 3.16]

[26] «sostanze o oggetti derivante da un processo di produzione, il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanze o oggetti» [Direttiva 2008/98/CE] che, anziché essere trattati come rifiuti, sono adoperati come input di altri sistemi di prodotto.

[27] Raramente sono utilizzate le traduzioni "sistema di/in primo piano" (per *foreground system*) e "sistema di/in secondo piano" (per *background system*). Cfr. definizioni contenute nella raccomandazione 2013/179/UE su Impronta ambientale dei prodotti (PEF) [Gazzetta Ufficiale UE 2013, p. 21].

2.3.1.3.3 **Requisiti di qualità**

I requisiti di qualità dei dati dovrebbero comprendere indicazioni sulla loro:

- *copertura* e *rappresentatività* (valutazione qualitativa su quanto un certo insieme di dati rifletta le caratteristiche della "popolazione" interessata; N.B.: a seconda degli scopi dello studio può essere preferibile utilizzare dati più o meno generici o specifici)
  - temporale (anzianità dei dati ed estensione del periodo della raccolta dati),
  - geografica (possono essere specifici di un sito di produzione o aggregati, p.e., su scala regionale, nazionale, continentale o globale)
  - tecnologica (si può far riferimento a tecnologie specifiche, a casi limite[28] o a una combinazione di tecnologie[29])
- *precisione* (variabilità, p.e. in termini di scarto quadratico medio)
- *riproducibilità* (valutazione qualitativa su quanto le informazioni su metodo e valori trovati permettano a un esecutore esterno di riprodurre i risultati dello studio)
- *fonte*
- *incertezza* (indicazione sul fatto che i dati siano frutto di misure, calcoli o stime) [ISO 2006 b § 4.2.3.6.2].

2.3.1.3.4 **Trattamento dei dati mancanti**

Nei casi in cui dati rispondenti ai requisiti stabiliti nella *Definizione di obiettivo e campo di applicazione* siano non disponibili, difficili o impossibili da reperire (per esempio, a causa di vincoli di riservatezza o per la limitatezza delle risorse a disposizione dello studio), la norma ISO 14044 suggerisce di impiegare valori calcolati da processi che impiegano tecnologie simili, valori non-nulli altrimenti giustificati, o valori nulli purché motivati [ISO 2006 b § 4.2.3.6.3].

Il trattamento dei dati mancanti deve essere in ogni caso documentato. Per garantire una corretta interpretazione dei risultati, la norma raccomanda trasparenza, principio guida per l'esecuzione di ogni fase dello studio [ISO 2006 a]. Assunzioni ed eventuali omissioni andranno sempre dichiarate e giustificate.

[28] Scenario peggiore (*worst case*) o migliore tecnologia disponibile (***B**est **A**vailable **T**echnology*, *state-of-the-art*).

[29] Per modellare la fornitura di energia elettrica, per esempio, si può far riferimento al mix di fonti energetiche con cui è prodotta l'energia elettrica fornita attraverso la rete nazionale o mix medi derivanti da indagini statistiche su settori industriali specifici (p.e. fornitura di energia elettrica, produzione di cemento); ancora si può distinguere il "consumption/market mix" (mix al consumatore finale) dal "production mix" di un Paese (discorso analogo si può fare per dati su materie prime, manufatti e altri servizi: p.e. i dati rappresentativi della produzione di alluminio in Europa potrebbero differire da quelli rappresentativi dell'alluminio effettivamente utilizzato nel continente (in parte proveniente da produzioni locali e in parte importato da altre parti del mondo).

2.3.2 **Analisi dell'Inventario del ciclo di vita**

La fase di **Analisi dell'Inventario del ciclo di vita** consiste nella identificazione e quantificazione dei flussi di materia e di energia in ingresso e in uscita attraverso i processi del sistema di prodotto (*flussi intermedi*[30]) e tra quest'ultimo e l'ambiente (*flussi elementari*[31]).

Operativamente, completata una prima stesura della *Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione* dello studio, come primo passo è opportuno tracciare un diagramma di flusso che chiarisca in quali *processi unitari*[32] è suddiviso il sistema di prodotto e quali relazioni intercorrono tra loro [Hauschild et al. 2018 § 9.2]; si procede quindi con la raccolta dei dati e la loro validazione; infine, si calcolano i flussi, rispetto a ciascun processo unitario e all'unità funzionale dello studio (*flussi di riferimento*).

L'elenco dei flussi elementari in ingresso e in uscita rispetto al sistema di prodotto, costituiscono i **risultati dell'Inventario del ciclo di vita** (in breve "risultati d'inventario"), a partire dai quali, nella fase successiva dell'Analisi (*Valutazione degli impatti*) saranno calcolati i potenziali d'impatto per ciascuna delle categorie d'impatto selezionate per l'Analisi [ISO 2006 a § 3.24].

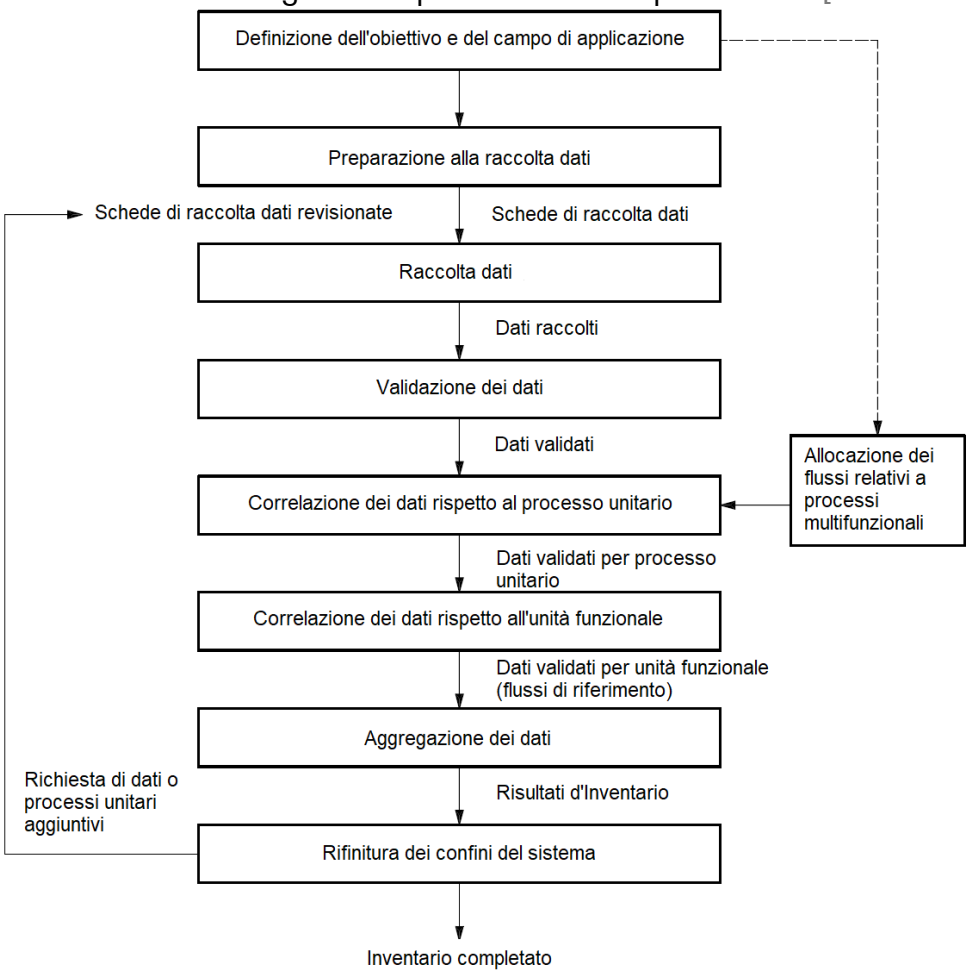


Figura 16 Procedura semplificata Analisi dell'Inventario del ciclo di vita (tradotto e adattato da ISO 2006 b, p. 12)

[30] Cfr. ISO 2006 a, b § 3.22

[31] Materia o energia che tal quale entra nel o esce dal sistema allo studio senza alcuna previa trasformazione o trattamento di sorta [*ivi* § 3.12]

[32] È detto processo unitario l'«elemento più piccolo considerato nell'Analisi dell'Inventario del ciclo di vita per il quale sono quantificati dati in ingresso e in uscita» [UNI 2006 § 3.34]

In Figura 16 sono rappresentati i passaggi previsti dalla norma ISO 14044.

L'Analisi dell'Inventario è condotta attraverso un processo iterativo: via via che i dati sono raccolti e si conosce meglio il sistema oggetto di studio, potrebbero emergere nuovi requisiti o limitazioni sulla disponibilità dei dati o sul loro uso, per cui potrebbe rendersi necessaria una modifica delle procedure di raccolta dati o dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio [ISO 2006 a § 5.3.1] (vedi *Rifinitura dei confini del sistema* e *schede di raccolta dati revisionate* in Figura 17).

La raccolta dati interessa ciascun processo unitario incluso nei confini del sistema.
I dati da raccogliere sono quelli cui si è fatto riferimento in § 2.3.1.3 e sottoparagrafi.

È consigliato far precedere alla raccolta dati un'attività di pianificazione (*preparazione alla raccolta dati*) nella quale preparare *schede di raccolta dati* e selezionare preventivamente le fonti che si andranno a consultare per ciascuna voce d'inventario in accordo con i requisiti sui dati definiti nel campo di applicazione dello studio.

Considerata la potenzialmente vastissima mole di dati da gestire e fonti da consultare, allo scopo di raggiungere una comprensione ordinata e coerente del sistema di cui si sta producendo il modello, di limitare fraintendimenti e di evitare doppi conteggi, la norma ISO 14044 raccomanda di adottare le seguenti misure (cfr. ISO 2006 b § 4.3.2):

- disegnare un diagramma di flusso in cui siano delineati tutti i processi unitari che si andranno a modellare e le loro interrelazioni;
- descrivere ogni processo unitario, evidenziando i fattori che influenzano input e output;
- elencare i flussi e dati pertinenti associati alle condizioni operative di ciascun processo unitario;
- specificare le unità di misura, procedure di raccolta dati e tecniche di calcolo utilizzate;
- indicare delle istruzioni per documentare chiaramente eccezioni, irregolarità ed ogni altra criticità legata ai dati forniti.

Durante il processo di raccolta dati occorrerà effettuare verifiche sulla validità dei dati, per assicurarne correttezza e completezza e per controllare che soddisfino i requisiti di qualità per l'applicazione prevista. Le c.d. attività di *validazione dei dati* possono includere bilanci di massa ed energia, confronti con altre fonti, analisi specifiche, ripetizione delle misure se necessario.

Nell'elaborazione dei dati e nel calcolo dei flussi, procedure ed assunzioni vanno specificate in modo chiaro ed esplicito, spiegate e applicate nel corso dell'analisi in maniera coerente [ISO 2006 b § 4.3.3].

L'**allocazione**[33] è la procedura mediante la quale, nei casi in cui un processo (o il sistema) abbia come output più prodotti (*processo* o *sistema multifunzionale*), i flussi in ingresso e in uscita del processo (o i processi che compongono il sistema) sono ripartiti, secondo opportuni criteri, fra i diversi prodotti.

[33] Cfr. ISO 2006 a, b § 3.17. Per un approfondimento di questo aspetto (che non è stato necessario considerare nel caso studio proposto in questa tesi) si rimanda a quanto indicato nelle norme ISO 14040 (ISO 2006 a § 5.3.4) e ISO 14044 (ISO 2006 b § 4.3.4).

2.3.3 **Valutazione degli impatti**

La fase di **Valutazione degli impatti** (o *Valutazione dell'impatto del ciclo di vita*[34]; in inglese "*Life Cycle Impact Assessment"*, da cui l'acronimo LCIA) è finalizzata a comprendere e valutare la portata e la significatività dei potenziali impatti – su ambiente, salute umana e problematiche legate all'uso di risorse naturali – riconducibili al sistema di prodotto oggetto dell'analisi [ISO 2006 a, b § 3.4; Commissione Europea, JRC-IES 2011].

In questa fase, a ciascuno dei flussi associati ai processi inclusi nei confini del sistema di prodotto – calcolati nella precedente fase di *Analisi dell'Inventario del ciclo di vita* – sono attribuiti i rispettivi impatti. Il diagramma in Figura 17 illustra i passaggi necessari.

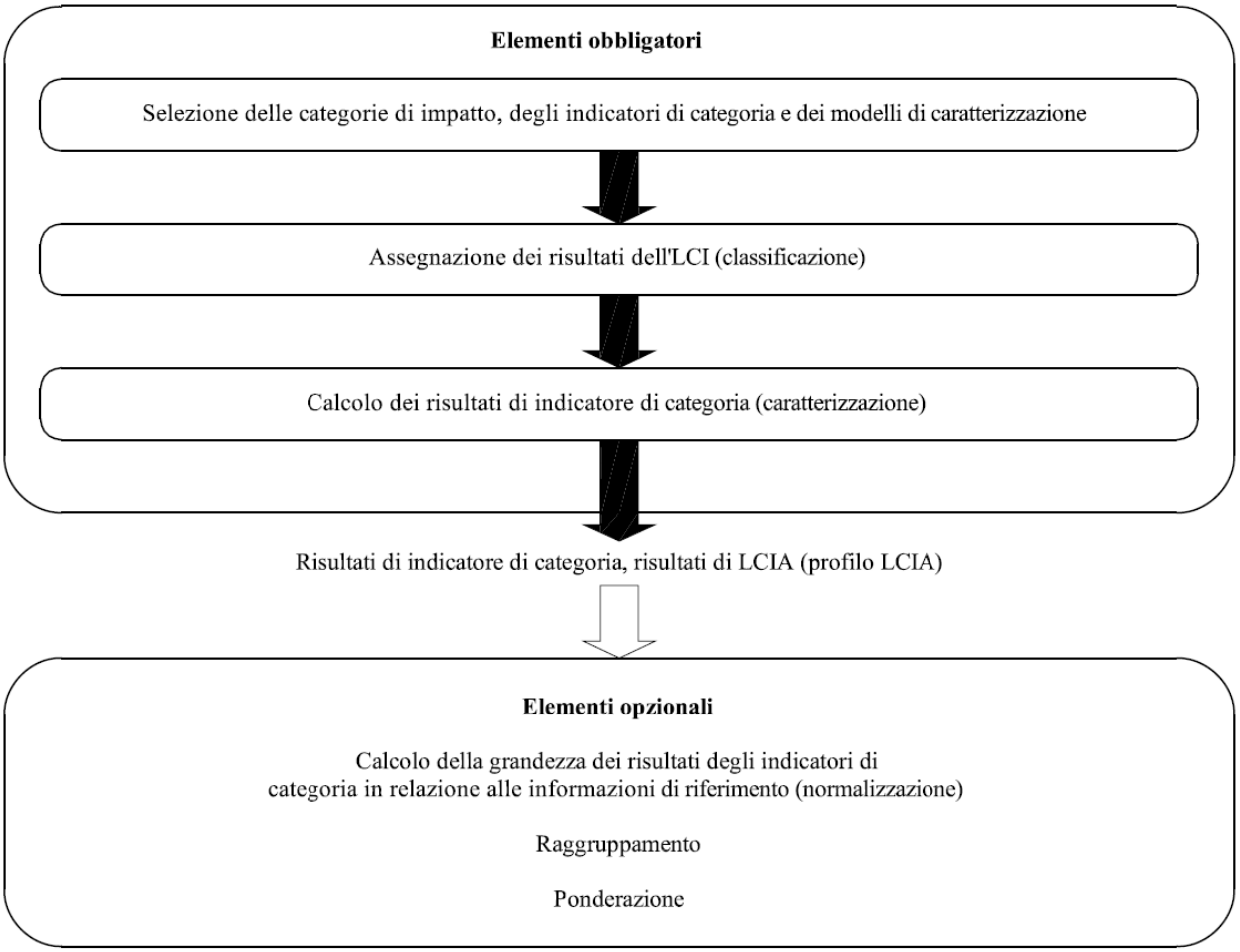


Figura 17 Elementi della fase di Valutazione dell'Impatto del ciclo di vita [UNI 2006]

Le norme distinguono passaggi obbligatori e facoltativi [ISO 2006 b § 4.4.1].
I passaggi obbligatori sono:

1) la selezione delle categorie d'impatto e dei rispettivi indicatori di categoria e modelli di caratterizzazione;
2) l'assegnazione dei flussi – individuati e quantificati nella precedente fase di Analisi dell'Inventario – alle categorie d'impatto che si è deciso di trattare ("Classificazione");
3) il calcolo dei risultati ("Caratterizzazione").

Facoltativamente possono seguire: "Normalizzazione", "Raggruppamento" e "Ponderazione".

[34] Cfr. UNI 2006 § 5.4

2.3.3.1 **Selezione** delle **categorie d'impatto**, degli **indicatori** di categoria e dei **modelli di caratterizzazione**

Per **categoria d'impatto** s'intende una classe che rappresenta i problemi ecologici d'interesse ai quali possono essere assegnati i risultati d'inventario [ISO 2006 a, b § 3.39].
Possibili categorie d'impatto possono essere: cambiamento climatico, eutrofizzazione, riduzione dell'ozonosfera, acidificazione, tossicità, ecotossicità, radioattività, esaurimento di risorse non rinnovabili, uso di suolo, ecc.
La rilevanza ambientale di ciascuna sostanza – i cui flussi elementari in ingresso o in uscita del sistema di prodotto sono stati rendicontati nell'Inventario del ciclo di vita – può variare considerevolmente; attraverso la Valutazione degli impatti, l'interpretazione dei dati d'inventario è agevolata traducendo tali flussi elementari (i risultati d'inventario) in un'ennupla di **indicatori di categoria**: rappresentazioni quantificabili delle categorie d'impatto [ISO 2006 a, b § 3.40].
Questa traduzione è mediata dall'uso dei c.d. "**fattori di caratterizzazione**", che precisano, sulla base di specifici modelli ("modelli di caratterizzazione"), quanto un'unità di specifica sostanza contribuisca a determinare un certo impatto [ISO 2006 a, b § 3.37; Huijbregts et al. 2017 § 1.1].

A ciascuna categoria d'impatto possono essere assegnati uno o più indicatori di categoria.
I relativi fattori di caratterizzazione e i risultati d'impatto possono essere espressi in termini assoluti (cioè nella stessa unità di misura dell'indicatore di categoria) o in termini relativi, rispetto all'impatto associato a una quantità di una sostanza di riferimento ("unità di riferimento").

Per chiarire le definizioni appena date in Tabella 2 sono riportati degli esempi per ciascun lemma.

Lemma	**Esempio**
Categoria d'impatto	*Cambiamento climatico*
Indicatore di categoria	*Forzante radiativo* [W/m^2]
Modello di caratterizzazione	*Modello baseline a 100 anni* prodotto dal Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (IPCC)
Fattore di caratterizzazione	*Potenziale di riscaldamento globale a 100 anni*[35] [kg CO_2 eq./kg sostanza] p.e. 27,9 kg CO_2 eq./kg CH_4 emesso
Unità di riferimento	kg CO_2 eq.[36]

Tabella 2 Esempi lemmi specifici Valutazione degli impatti (basato su ISO 2006 b, Tabella 1)

La norma ISO 14044 prevede che: la selezione delle categorie d'impatto da trattare, dei relativi indicatori di categoria e modelli di caratterizzazione sia coerente con gli obiettivi e il campo di applicazione definiti per lo studio [ISO 2006 b § 4.4]; le categorie siano selezionate in modo da evitare ridondanze e doppi conteggi e che non si omettano impatti significativi [Hauschild et al. 2018 § 10.2]. Nel caso in cui lo studio sia finalizzato alla pubblicazione di asserzioni comparative è prescritto l'uso di indicatori scientificamente e tecnicamente validi, pertinenti ai problemi che s'intende studiare, preferibilmente accettati a livello internazionale [ISO 2006 b § 4.4.5].

[35] I fattori di caratterizzazione sono stabiliti confrontando il forzante radiativo a 100 anni di 1 kg di ciascuna sostanza ritenuta rilevante (gas climalteranti a effetto serra) con quello calcolato per 1 kg di anidride carbonica.
N.B.: un'altra maniera di esprimere i fattori di caratterizzazione potrebbero essere darli in termini assoluti cioè nella stessa unità di misura dell'indicatore di categoria (forzante radiativo).
[36] Da rapportare alla quantità di sostanza nei fattori di caratterizzazione (p.e. kg CO_2 eq./kg CH_4) o all'unità funzionale nei risultati d'impatto (p.e. kg CO_2 eq./kWh di energia fornita all'utilizzatore).

Nel corso degli anni sono stati sviluppati una serie di **metodi di valutazione degli impatti**: set di principi, modelli e fattori di caratterizzazione per calcolare i risultati d'impatto per una o più specifiche categorie d'impatto [Commissione Europea, JRC-IES 2011] pronti per l'uso.

In Figura 18 è riportata una panoramica di alcuni dei metodi più diffusi tra quelli pubblicati a partire dall'anno 2000.

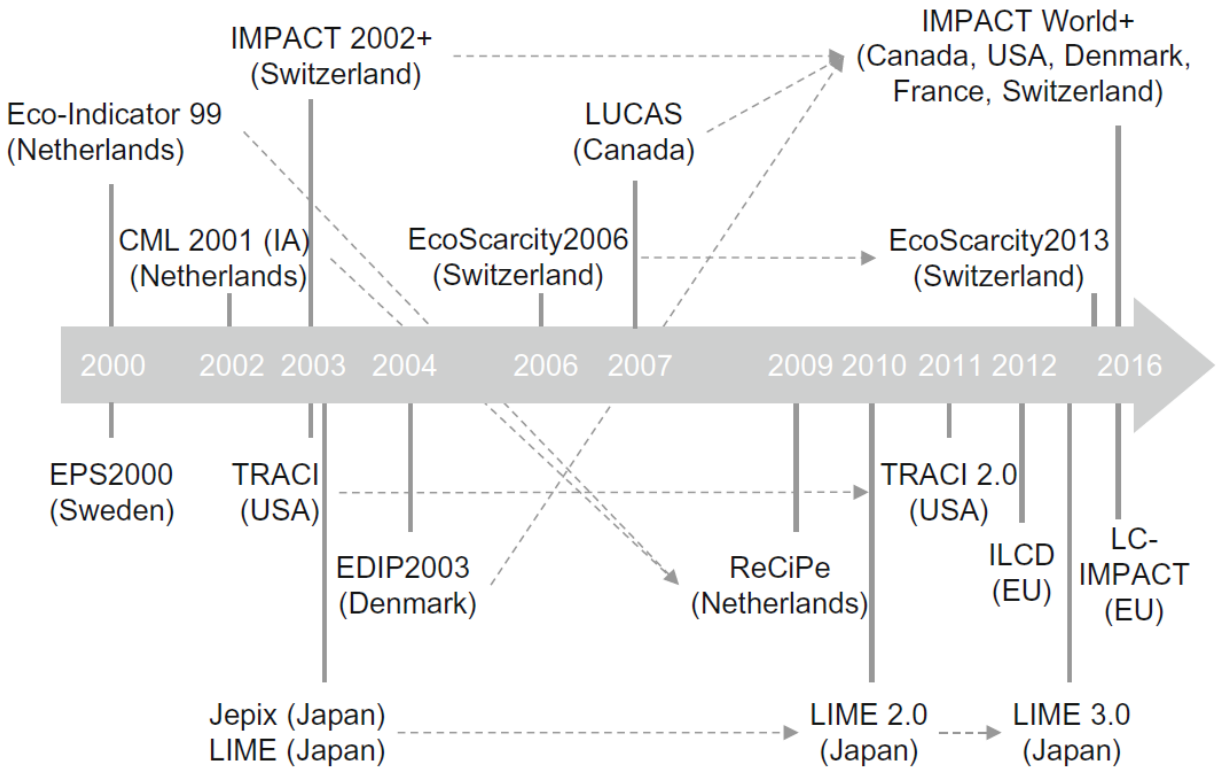


Figura 18 Selezione di metodi di valutazione degli impatti pubblicati a partire dall'anno 2000 [Rosenbaum 2017]. In parentesi sono indicati stato o regione di origine. Le frecce discontinue mettono in relazione i metodi con le loro versioni aggiornate.

2.3.3.2 **Classificazione**

La **classificazione** consiste nell'assegnazione dei risultati d'inventario alle categorie d'impatto selezionate per lo studio.
Il consumo di una certa risorsa o l'emissione di una certa sostanza (flussi elementari) possono essere assegnati a nessuna categoria, a una sola categoria o a più categorie.
Sulla base della classificazione, nel passaggio successivo (caratterizzazione) sono calcolati gli indicatori di categoria.

Questo passaggio richiede una conoscenza approfondita degli impatti associati a ciascuna delle sostanze coinvolte nel sistema; nella pratica, è tipicamente gestito dal software utilizzato per condurre l'analisi [Hauschild et al. 2018 § 10.2.2].

2.3.3.3 **Caratterizzazione**

L'ultimo passaggio obbligatorio è la **caratterizzazione**. Tutti i flussi elementari risultati d'inventario "classificati" entro (assegnati a) una specifica categoria d'impatto sono moltiplicati per i rispettivi fattori di caratterizzazione e sommati per formare il valore risultante dell'indicatore di categoria (risultato d'impatto).

2.3.3.3 **Passaggi facoltativi**

Opzionalmente, alla caratterizzazione è possibile far seguire delle elaborazioni sui risultati ottenuti finalizzate a facilitarne l'interpretazione.
Le norme prevedono tre fattispecie di seguito illustrate brevemente: normalizzazione, raggruppamento e ponderazione.

La **normalizzazione** introduce per gli indicatori di categoria dei metri di paragone (valori di riferimento), p.e.: il carico medio annuo di uno specifico settore industriale o sistema economico entro certi confini geografici o su scala globale, oppure i risultati di altre analisi del ciclo di vita, impatti corrispondenti a uno scenario base o a un sistema di prodotto alternativo.
Il **raggruppamento** consiste nell'aggregazione di alcune o tutte le categorie d'impatto in uno o più gruppi.
La norma distingue due possibili procedure di raggruppamento [ISO 2006 b § 4.4.3.3]:

- in base a caratteristiche delle categorie (p.e. impatti imputabili a emissioni / impatti imputabili all'uso di risorse; impatti su scala locale/regionale/globale);
- in base al livello di priorità attribuito alle categorie (gerarchie soggettive).

La **ponderazione** (o pesatura) è il processo di conversione dei risultati d'impatto in un unico o più indicatori compositi (p.e. impronta ecologica, eco-punteggi), utilizzando coefficienti (pesi, "fattori di danno" e simili) stabiliti secondo decisioni (scelte di valore) fondamentalmente arbitrarie [ISO 2006 b § 4.4.3.4] (sebbene i coefficienti possano essere determinati sulla base di teorie scientifiche o criteri oggettivi, la scelta del criterio rimane soggettiva).

2.3.4 **Interpretazione**

L'**Interpretazione del ciclo di vita** ha per obiettivo quello di presentare i risultati dell'Analisi del ciclo di vita (o dello studio di LCI[37]) in modo comprensibile, completo e coerente, in conformità con quanto indicato nella *Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione* [ISO 2006 a § 5.5].

La fase di **Interpretazione del ciclo di vita** comprende:

- l'identificazione delle criticità del sistema esaminato, basata sui risultati d'inventario e sui risultati d'impatto;
- una valutazione sulla completezza, coerenza e sensibilità di tali risultati [ISO 2006 b § 4.5.1.1].

Possono eventualmente seguire revisioni delle altre fasi dello studio e un procedimento iterativo di riesame [ISO 2006 a, *ivi*].
Le risultanze dell'interpretazione possono essere enunciate sotto forma di conclusioni, indicazioni sulle limitazioni dello studio e raccomandazioni indirizzate a decisori, ricercatori e altri portatori d'interesse [*ibidem*].

[37] Vedi § 3.3.0.2

3 Caso studio

Come visto nel Capitolo 1, l'**aeroponica** sembra offrire interessanti opportunità per la **produzione sostenibile** di cibo [Lakhiar et al. 2018 a] e di fitoderivati [Chajra et al. 2020; Iliev 2021]. Tuttavia, nonostante un numero crescente di pubblicazioni su questi temi [Puccinelli, Pardossi & Incrocci 2020], dati e studi specifici sull'impatto ambientale di questa tecnologia scarseggiano[38] [CIP 2013; Armanda, Guinée & Tukker 2019; Barla, Salachas & Abeliotis 2020].

Il caso studio proposto in questo lavoro di tesi consiste in un'**Analisi del ciclo di vita** di una coltivazione aeroponica di lattuga (*Lactuca sativa*).

La lattuga è una specie orticola a foglia diffusissima in tutto il mondo e sulla cui coltivabilità in aeroponica esiste una piuttosto ampia letteratura scientifica. Non a caso, è uno degli ortaggi più presenti negli assortimenti delle imprese che adottano questa tecnologia in ambito agroalimentare: giungendo a maturazione commerciale nell'arco di cicli relativamente brevi, aiuta a recuperare in tempi contenuti gli investimenti sui beni capitali; la sua coltivazione in serra non comporta particolari difficoltà tecniche: le piante non si sviluppano in altezza e non è prevista una fase di impollinazione, i cespi, infatti, sono pronti per essere venduti ben prima della fioritura.

Grazie alla collaborazione della startup innovativa italiana **Agricooltur** è stato possibile raccogliere per lo studio dati su un sistema produttivo reale: una delle serre *The Plant* gestite dall'azienda, la quale progetta e produce anche i moduli per la coltivazione *AeroSmart* in esse impiegati.

I primi tre paragrafi di questo capitolo riprendono le fasi operative del metodo (cui è dedicato il Capitolo 2) previste dalle norme di riferimento ISO 14040 e ISO 14044. L'Analisi dell'Inventario del ciclo di vita (§ 3.2) è accompagnata da una dettagliata descrizione del sistema di prodotto, entro i cui confini d'indagine sono stati inclusi la serra e i moduli *AeroSmart*, di cui è illustrato il funzionamento.
A un confronto dei risultati ottenuti con quelli di studi analoghi e all'Analisi di sensibilità sono dedicati i restanti paragrafi. L'interpretazione del ciclo di vita è contenuta nelle conclusioni del lavoro di tesi nel Capitolo finale.

[38] Scandagliando la letteratura scientifica sull'argomento attraverso i principali motori di ricerca (*Google Scholar*, *ProQuest*, *ResearchGate*) e le banche dati collegate alla Biblioteca del Politecnico di Torino (tra cui *Scopus* e *Web of Science*) – alla data di stesura di questa tesi – sono stati trovati i risultati di soltanto due Analisi del ciclo di vita (LCA) aventi per oggetto colture aeroponiche:

- il primo è uno studio sul potenziale di riscaldamento globale di una coltura di lattuga in Grecia (Barla, Salachas & Abeliotis 2020);
- l'altro (Wimmerova et al. 2022) è uno studio compativo, in cui sono confrontate le prestazioni ecologiche della produzione di caffeina di due colture di *Coffea arabica*, una in suolo e l'altra in aeroponica, rispetto a 14 categorie d'impatto (tra cui uso del suolo, consumo d'acqua, riscaldamento globale ed eutrofizzazione).

Si segnala un terzo studio su una coltivazione aeroponica di micro-ortaggi (germogli di piselli) in container attualmente in fase di revisione paritaria (Schmidt Rivera et al. 2022).

3.1 Definizione degli **obiettivi** e del **campo di applicazione**

Il caso studio proposto consiste in un'**Analisi del ciclo di vita** (*Life Cycle Assessment*) di una coltivazione aeroponica di lattuga realizzata in una serra climatizzata in Nord Italia sui sistemi aeroponici modulari *AeroSmart* prodotti dalla startup italiana Agricooltur.

Allo scopo di arricchire il discorso che lega produzione e consumo sostenibili e aeroponica, il presente studio si propone di:

- presentare una panoramica sull'entità dei potenziali impatti ambientali di una produzione orticola commerciale che si avvale di questa innovativa pratica agraria;
- identificare le attività o parti del sistema che contribuiscono in misura maggiore agli impatti ambientali della produzione;
- confrontare i risultati prodotti con quelli di studi analoghi condotti su colture di lattuga in pieno campo e fuori suolo;
- valutare mediante analisi di sensibilità come variano i risultati d'impatto modificando in parte il modello; in particolare, in uno scenario alternativo ideale in cui i consumi diretti di energia elettrica del sistema di prodotto sono interamente sopperiti da un impianto fotovoltaico anziché dal mix di fonti energetiche nazionale.

L'**ambito** d'indagine dello studio comprende le fasi del ciclo di vita dalla "culla" all'uscita dal sito di produzione (studio "*cradle-to-gate*").

I **confini del sistema** includono: la produzione (🏭) e il trasporto (🚚) delle materie prime e dei componenti necessari alla coltivazione (compresi i beni capitali, come serra e moduli aeroponici) e i consumi diretti di acqua (💧) e di energia elettrica (⚡) per fertirrigazione, climatizzazione e ventilazione della serra e monitoraggio e controlli automatici.

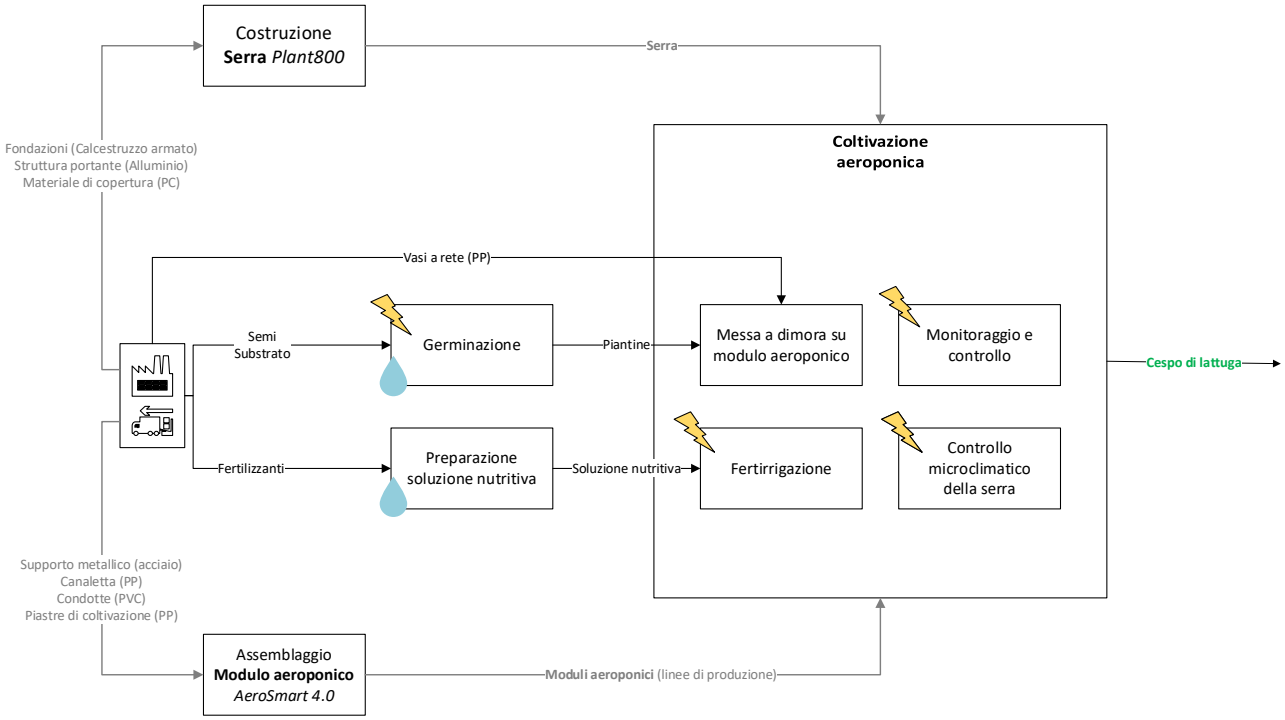


Figura 19 Diagramma di flusso del **sistema di prodotto** analizzato

Legenda | Le frecce rappresentano i **flussi**, i rettangoli i **processi**. I flussi relativi ai beni capitali (flussi d'infrastruttura) sono riportati in grigio scuro, il prodotto in uscita dal sistema di prodotto in **grassetto verde**.
Il rettangolo più a sinistra, con al suo interno le icone 🏭 e 🚚, rappresenta la parte del ***background system*** che include i processi di **produzione** e **trasporto** degli input del sistema; i processi per cui sono stati quantificati **consumi diretti** di **acqua** (💧) e/o di **energia elettrica** (⚡) presentano le rispettive icone sul lato sx, per tali processi si sottintende un collegamento in ingresso con i rispettivi processi di fornitura d'acqua e/o energia elettrica.
Abbreviazioni | PP: polipropilene; PVC: polivinilcloruro; PC: policarbonato.

L'analisi è stata condotta con l'ausilio dell'applicativo, gratuito e a codice sorgente aperto, *OpenLCA* versione 1.11.0 [GreenDelta 2022 a].

Come **metodo di valutazione degli impatti** è stato adottato "ReCiPe 2016 per categorie d'impatto intermedio", contenuto nel pacchetto *OpenLCA LCIA methods* versione 2.1.3 [Greendelta 2022 b].
Tra i tre approcci alternativi proposti dal metodo è stato selezionato l'approccio "gerarchico" (H), basato sul più ampio consenso scientifico sulla plausibilità dei meccanismi d'impatto e delle estensioni degli orizzonti temporali cui riferire i calcoli [Huijbregts et al. 2017 § 1.3].

Le **categorie d'impatto** trattate nello studio sono 8: cambiamento climatico, eutrofizzazione di acque dolci e marine, acidificazione terrestre, consumo di acqua, uso del suolo e scarsità di risorse non rinnovabili fossili e minerarie.

Categoria d'impatto intermedio	Sigla	Unità di riferimento
Cambiamento climatico	CC	kg CO_2 eq. (GWP100)
Eutrofizzazione delle acque dolci	Eu A	kg P eq.
Eutrofizzazione delle acque marine	Eu M	kg N eq.
Acidificazione terrestre	AT	kg SO_2 eq.
Consumo di acqua	Acq	m^3 acqua
Uso del suolo	Suo	m^2 × anno coltivati eq.
Scarsità delle risorse fossili	R Fo	kg petrolio eq.
Scarsità delle risorse minerarie	R Mi	kg Cu eq.

Tabella 3 Categorie d'impatto intermedio trattate nello studio con unità di riferimento associate ai rispettivi fattori di caratterizzazione in ReCiPe 2016 v1.1 [Huijbregts et al. 2017 § 1.4]

Per l'analisi, sono state prese in esame le coltivazioni delle tre varietà *Fiore d'Insalata SalaNova*® (*babyleaf* a cappuccio, foglia verde e foglia rossa, e *babyleaf* a foglia di quercia) in produzione tra agosto 2021 e luglio 2022 presso la serra Urbancooltur *Plant800* di Cascina Gorrea (44° 52' 57'' N; 7° 37' 7'' E) nel Torinese.

La copertura temporale di 12 mesi ha permesso di notare differenze nella durata dei cicli colturali (su base stagionale) e nei consumi di soluzione nutritiva e di energia elettrica (su base mensile). In fase di valutazione degli impatti, ai risultati prodotti utilizzando i valori medi calcolati sull'intero periodo di osservazione di 365 giorni sono stati affiancati quelli ottenuti utilizzando i dati su base mensile, ciò allo scopo di valutare in che misura queste differenze facciano variare gli impatti ambientali della produzione durante l'anno.

Le tre varietà colturali in produzione sono trattate nello studio in maniera indistinta: tutte e tre afferiscono alla stessa specie (*Lactuca sativa*); le sementi provengono dallo stesso fornitore; avendo fabbisogni di luce e acqua simili, il processo produttivo non cambia e i lotti delle tre cultivar possono essere coltivati sulla stessa linea di produzione; inoltre, i rilievi agronomici forniti dall'azienda non mostrano particolari differenze nelle rese.

Poiché la produzione esaminata non se ne avvale, controllo fitosanitario e illuminazione artificiale non sono trattati nello studio: infatti, in condizioni ordinarie, nelle serre Urbancooltur non viene fatto uso di pesticidi né di altri fitofarmaci; inoltre, l'azienda ha comunicato che, per la lattuga, i livelli di radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) rilevati nella serra non hanno reso necessario l'utilizzo di luci di assimilazione.

3.1.1 **Unità funzionale**

L'**unità funzionale** (UF) scelta per lo studio, in relazione alla quale sono rapportati dati e risultati dell'analisi, è 1 kg di prodotto idoneo alla vendita.

In questo tipo di studi (LCA di produzioni agroalimentari), comunemente, si fa riferimento al "peso fresco"[39] della parte edibile della pianta, che, nel caso della lattuga, coincide con la sua *parte epigea* (dal colletto in su); non include, dunque, il peso dell'apparato radicale della pianta, che ne costituisce, invece, la c.d. *parte ipogea*.
Tuttavia, una particolarità della produzione esaminata è che i cespi di lattuga destinati alla vendita lasciano il sito di produzione con le radici ancora integre. I moduli aeroponici impiegati, infatti, permettono di estrarre le piante dalle piastre di coltivazione senza reciderne le radici. Mantenendo le radici idratate, le piante possono continuare il loro ciclo vegetativo anche durante le fasi di trasporto e conservazione. Il taglio può, quindi, essere posticipato fino al momento immediatamente precedente il consumo; in questo modo, il prodotto conserva il più a lungo possibile intatte le sue proprietà organolettiche.
Misurare la massa della sola parte epigea (così come sottrarre quella delle radici alla massa della pianta intera) implicherebbe la resezione delle radici.
Un'altra particolarità della produzione è che il prezzo di ciascun ordine è formato in base alla numerosità dei cespi, piuttosto che in funzione del loro peso (com'è, invece, prassi più comune). Quest'ultimo, pertanto, non viene misurato ordine per ordine. Le eventuali pesate, d'altra parte, includerebbero la massa delle radici (la cui entità è generalmente non trascurabile).

Per il calcolo dei flussi riferimento, il peso della produzione è stato stimato moltiplicando il numero di pezzi prodotti (al netto degli scarti) per la massa media della parte epigea delle piante coltivate, calcolata a partire dai rilievi agronomici a campione condotti internamente dall'azienda.

[39] **Peso fresco** (in inglese "*fresh weight*" o anche "*wet weight*"): massa dell'alimento tal quale, incluso il suo contenuto d'acqua. Talvolta contrapposto al *peso secco* ("*dry weight*"), misurato sul residuo post disidratazione del campione.

3.1.2 **Dati**

I flussi in ingresso e in uscita sono stati quantificati a partire da rilevazioni effettuate sul posto, progetti esecutivi, schede tecniche, documentazione interna dell'azienda e comunicazioni dirette con il suo staff. In aderenza al principio di trasparenza raccomandato dalle norme, tutte le assunzioni sono segnalate.

I flussi relativi ai beni capitali (c.d. "flussi d'infrastruttura") sono stati allocati sulla produzione tenendo conto della vita utile di ciascun componente (cfr. Antón 2004 § 4.3.3.1).

I set di dati d'inventario (ecoprofili) utilizzati per la modellazione dei processi appartenenti al *background system* (processi di produzione e trasporto degli input e forniture di energia elettrica e acqua) sono stati selezionati fra le voci del database *Agribalyse* 3.0.1 [Agribalyse 2020] e gli ecoprofili estratti da *ecoInvent* 3.5 (2018), consultabili gratuitamente su *Agribalyse* grazie ad accordi di sublicenza tra le parti [Greendelta 2020][40].

Nei confini del sistema, sono stati considerati esclusivamente i trasporti dal sito di produzione (magazzino o punto vendita) del fornitore di primo livello alla serra. La modellazione dei trasporti a monte più rilevanti è generalmente già trattata negli ecoprofili utilizzati per descrivere i processi di produzione delle materie prime e dei componenti provenienti dal background system.

Per i processi di trasporto sono stati utilizzati ecoprofili generici rappresentativi del trasporto merci su gomma in Europa[41] (unità funzionale: massa per distanza in tonnellate per chilometro). Le indicazioni sulla distanza dei fornitori di primo livello sono state indicate dall'azienda, o – nota la loro ubicazione precisa – calcolate su Google Maps (vedi Appendice A § 0.1). Come massa trasportata è stata considerata la stessa attribuita all'input (a valle degli eventuali processi di trasformazione), non include quindi il peso degli imballaggi, assunto trascurabile.

[40] In un primo momento, per la modellazione dei processi di produzione di alcuni componenti, sono state prese in considerazione delle fonti alternative: gli ecoprofili più recenti prodotti dalle associazioni di categoria *Plastics Europe* [Plastics Europe 2019 a, b, c], *European Aluminium Association* [EAA 2018] e *World Steel Association* [World Steel 2020]. Alla fine, a causa dei numerosi problemi di incompatibilità con il metodo di valutazione degli impatti adottato (ReCiPe 2016 in *OpenLCA LCIA methods* v. 2.1.3) – dovuti alla nomenclatura e alla mappatura dei flussi elementari utilizzata negli ecoprofili alternativi – al costo di rinunciare alla potenzialmente migliore rappresentatività temporale e tecnologica dei processi del background system offerta da questi ultimi, si è optato per gli ecoprofili di Agribalyse. Un'analisi di sensibilità dei risultati dello studio rispetto alla scelta degli ecoprofili per modellare il background system è riportata in § 4.5.3.

[41] Per trasporti effettuati con furgoni con massa a pieno carico non superiore alle 3,5 tonnellate è stato utilizzato il set di dati etichettato "*transport, freight, light commercial vehicle* – Europe without Switzerland", in tutti gli altri casi il più generico "*market for transport, freight, lorry, unspecified* – RER"; entrambi dalla selezione di ecoprofili di ecoInvent su Agribalyse 3.0

3.2 **Analisi dell'Inventario del ciclo di vita**

Il sistema di prodotto analizzato può essere scomposto nei seguenti sottosistemi:

1) la **serra** *Plant800*;
2) i **moduli aeroponici** *AeroSmart* nella serra (ovvero le linee su cui si realizza il ciclo produttivo);
3) la **coltivazione aeroponica** di lattuga.

I primi due costituiscono l'**infrastruttura di produzione**. Il terzo coincide con l'insieme dei processi in cui si articola la produzione di lattuga: dall'acquisizione di materie prime e componenti necessari, fino all'uscita del prodotto finito dalla serra.
La suddivisione appena proposta sarà adottata nel prosieguo dell'elaborato, al fine di presentare i dati raccolti e i risultati dell'analisi in modo ordinato.
Il sottosistema "Coltivazione aeroponica", per via della sua complessità, è stato ulteriormente suddiviso in processi o loro raggruppamenti (vedi Tabella 4).

Sigla		Sottosistema, processo o raggruppamento di processi
S0		**Serra** *Plant800*
S1		**Moduli aeroponici** *AeroSmart*
A		**Coltivazione aeroponica**
	P	**Piante** "Germinazione" (P0) "Messa a dimora su modulo aeroponico" (P1)
	F0	**Soluzione nutritiva** "Preparazione soluzione nutritiva" (F0)
	F1	**Fertirrigazione** include: consumi di soluzione nutritiva e consumi diretti di energia elettrica per la nebulizzazione della soluzione nutritiva e per riscaldamento del serbatoio durante i mesi invernali
	HVAC	**Controllo climatico della serra** Consumi diretti di energia elettrica per riscaldamento, raffrescamento e ventilazione della serra
	MC	**Monitoraggio e controllo** Consumi diretti di energia elettrica

Tabella 4 Scomposizione del sistema di prodotto analizzato in sottosistemi e processi

3.2.0.1 **Esclusioni**

Altre apparecchiature (sensori, riscaldatori sommergibili, pompe, climatizzatori, ventole e computer) ed elementi ausiliari (come filtri, guarnizioni e condotte idrauliche secondarie), inizialmente inclusi nei confini del sistema, sono stati successivamente esclusi dal computo finale a causa dell'impraticabilità di risalire alle quantità di materiali e di energia coinvolte nel sistema di prodotto o delle difficoltà riscontrate nel reperire dati sufficienti a ricostruire i processi di fabbricazione di ciascun elemento e a valutare, per ogni categoria d'impatto selezionata per l'analisi, gli impatti ad essi associati.
La norma ISO 14040 indica che «non è necessario spendere risorse per quantificare elementi che non alterano significativamente le conclusioni globali dello studio» [UNI 2006 § 5.2.3].
Le ricerche effettuate per stimare almeno gli ordini di grandezza dei flussi e dei rispettivi impatti relativi alle esclusioni ritenute più rilevanti (vedi Appendice D) suggeriscono che gli impatti di questi componenti, rapportati all'unità funzionale, producono nel complesso un contributo modesto, tale da non alterare le conclusioni dello studio. Benché a taluni possano essere attribuiti impatti in termini assoluti non trascurabili, anche questi, ammortizzati sulla produzione corrispondente agli anni della loro vita utile, non modificano sensibilmente i risultati dello studio.

3.2.1 Descrizione del **sistema di prodotto** e **dati d'inventario**

In questa sezione, a ciascuno dei sottoinsiemi in cui è stato suddiviso il sistema di prodotto (vedi Tabella 4) è dedicato un paragrafo contenente una descrizione della sua controparte nel sistema reale, i particolari della sua modellazione e le tabelle con i relativi dati d'inventario.

3.2.1.0.1 **Legenda delle Tabelle Dati d'inventario**

		Flusso in ingresso	**Quantità**		**Note**
(1)	(2)	**Nome input** (3) "Etichetta ecoprofilo" [Fonte] (4)	1,00E+03 (5)	kg (6)	(7)
		Nome input | Trasporto "market for transport, freight, lorry, unspecified - RER" (el)	1,00E+01	t km	1 t × 10 km
		Nome altro input (specificazione) "Polycarbonate, production mix, at producer, Technology mix, …" [Plastics Europe 2019 a]	7,00E-03	kg	†
		Nome altro input | Lavorazione aggiuntiva su altro input "Extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline - FR" (el) † annotazione richiamata nella cella Note del flusso nella terza riga (8)	3,91E+03	kg	
		Energia elettrica (specificazione) "market for transport, freight, lorry, unspecified - RER" (el)	2,16E+01	kWh	1,87 t × 11,6 km
		Flusso in uscita	**Quantità**		
		Nome output	**1**	kg	

Figura 20 Esempio Tabella Dati d'inventario

Elenco dei simboli adottati nelle tabelle con i dati d'inventario

Classificazione dei flussi

Icona	Tipo di flusso
	Flusso elementare
	Flusso di prodotto **Output di processi di produzione** o lavorazione **di componenti o materie prime** (dal background system)
	Flusso di prodotto **Output di processi di trasporto**
	Flusso di prodotto Output di processi di fornitura d'acqua (**Consumo diretto di acqua**)
	Flusso di prodotto Output di processi di fornitura di energia elettrica (**Consumo diretto di energia elettrica**)

N.B. Tutti i flussi cui è stata assegnata una di queste icone sono flussi in uscita da processi del background system e flussi in ingresso nei processi del foreground system.

Legenda dettagliata tabelle con i dati d'inventario

	Descrizione
(1)	Colonna facoltativa utilizzata per indicare a quale gruppo o processo appartiene il flusso nella riga
(2)	Icona per indicare tipo di flusso secondo la classificazione a sinistra
(3)	Nome input
(4)	Ecoprofilo utilizzato per modellazione processo del background system (a capo, allineato a destra); si riferisce al flusso nella stessa cella o a quelli immediatamente sopra con lo stesso nome input; tra virgolette "..": l'etichetta dell'ecoprofilo/voce di database, così come appare sulla fonte [Fonte] **(el)** è usato per non ripetere **(ecoInvent)** [Agribalyse 2020] quando già citato nella stessa tabella
(5)	Quantità in notazione scientifica (tre cifre significative)
(6)	Unità di misura S.I.; altre sigle: **h** = ora/-e; **gg** = giorno/-i, **a** = anno/-i; **t** = tonnellata (1 Mg = 1000 kg); **pz** = pezzo/-i
(7)	Note, simboli per richiamare annotazioni che mettono in relazione più flussi (8)
(8)	Annotazioni richiamate con simboli come † o ‡ in (7)

3.2.1.1 **Serra *Plant800*** (S0)

La serra **Urbancooltur *Plant800***, analizzata nel presente caso studio, è ubicata presso Cascina Gorrea, tra i Comuni di Carignano e di Osasio, a circa 30 km dal capoluogo piemontese.

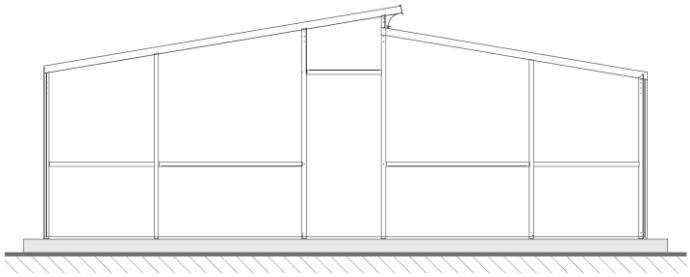


Figura 21 Vista frontale della serra
[Agricooltur, disegno 1]

Caratteristica	Dimensioni
Larghezza	8 m
Lunghezza	46 m
Altezza parete	2 m
Altezza al colmo	2,5 m
Superficie del pavimento	368 m^2
Perimetro del pavimento	108 m
Volume della serra	831,22 m^3
Superficie tetto	362,61 m^2
Superfici disperdenti (N, S)	92 m^2
Superfici disperdenti (O, E)	18,07 m^2
Inclinazione delle falde	8,4°

Tabella 5 Caratteristiche geometriche della serra
[Riva 2021]

Plant800 presenta una struttura a padiglione a falde piane spioventi, sorretta da pareti verticali. Il materiale di copertura è policarbonato alveolare trasparente, scelto per le sue proprietà ottiche e termiche e per la sua economicità. Le lastre di copertura, dello spessore di 20 mm, sono sostenute da profilati in alluminio, verniciato per prolungarne la vita utile.
La struttura portante è ancorata a fondazioni continue a platea in calcestruzzo armato C25/30, estese per circa 465 m^2 e profonde 18 cm; esse conferiscono alla serra stabilità e la isolano dal terreno, contribuendo a ridurre le dispersioni termiche.

Figura 22 Interno della serra *Plant800*

La serra si estende per 8 m in larghezza e 46 m in lunghezza, occupando una superficie di 368 m^2. Al suo interno sono operativi, per tutto l'anno, quattro moduli aeroponici a canaletta (*AeroSmart*), adibiti alla coltivazione di piante da insalata, erbe aromatiche e micro-ortaggi. Ciascun modulo costituisce una linea di produzione in grado di ospitare 200 piastre di coltivazione (60 cm x 40 cm cadauna). In questa configurazione l'area coltivabile totale all'interno della serra è di 192 m^2.

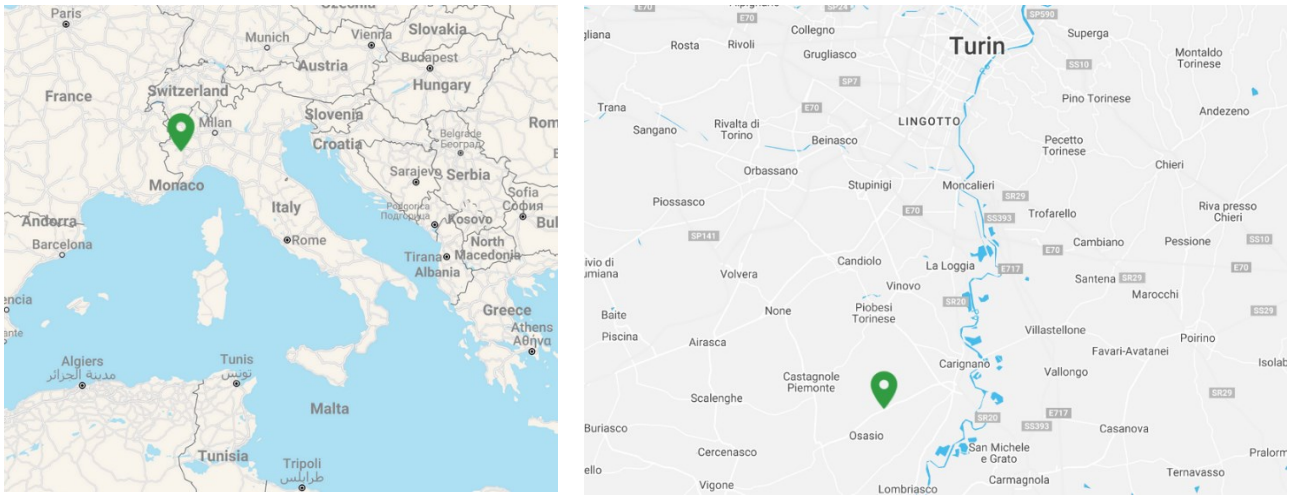


Figura 23 Posizione della serra Urbancooltur *Plant800* di Cascina Gorrea (44° 52' 57'' N; 7° 37' 7'' E)

La serra è provvista di un impianto elettrico in bassa tensione allacciato alla rete nazionale. Temperatura e umidità all'interno sono monitorate attraverso termoigrometri connessi a un sistema di controllo automatico in grado di azionare, in presenza di determinate condizioni ambientali o a cadenze temporali prestabilite, climatizzatori e ventole.
Al fine di mantenere nell'ambiente controllato le condizioni microclimatiche desiderate e di ridurre al minimo il rischio di contaminazioni, la serra è essenzialmente chiusa, cioè priva di aperture nella copertura, eccezion fatta per le piccole serrande, protette da appositi filtri, ricavate in prossimità delle ventole di estrazione e di immissione per mezzo delle quali è possibile il rinnovo dell'aria.

Il rabbocco dei serbatoi per la fertirrigazione è anch'esso automatizzato. I serbatoi (uno per linea) sono dotati di sensori di livello e collegati a un sistema di alimentazione centralizzato (modulo *AeroFeed*), collocato in un vano adiacente alla serra. AeroFeed alimenta i serbatoi dei moduli aeroponici in Plant800 e negli altri due tunnel ad essa attigui (ma non trattati nel presente studio) dedicati ai progetti di ricerca e sviluppo di Agricooltur e a produzioni minori.

Una descrizione del modulo di alimentazione AeroFeed è contenuta nel sottoparagrafo dedicato alla preparazione della soluzione nutritiva (§ 3.2.1.3.2).

I **dati d'inventario** relativi alla serra (in Tabella 6) si riferiscono ai processi di produzione, trasformazione e trasporto dei materiali necessari alla sua costruzione e sono suddivisi in tre gruppi: fondazioni (Fond), struttura portante (SP) e copertura (Cop).

I calcoli effettuati per quantificare i flussi sono riportati in dettaglio in Appendice A § 1.

		Flusso in ingresso	Quantità		Note
Fond		Suolo occupazione, "area artificiale" [42]	5,52E+03	m^2 a	368 m^2 × 15 a
Fond		**Calcestruzzo** "market for concrete, normal - CH" [43] (ecoInvent) [Agribalyse 2020]	6,62E+01	m^3	
Fond		**Armatura in acciaio** "Reinforcing steel production – RER" (el)	1,98E+03	kg	
Fond		Armatura in acciaio | Trasporto "market for transport, freight, lorry, unspecified - RER" (el)	5,16E+01	t km	1,98 t × 26 km
SP		**Alluminio** "aluminium production, primary, ingot - IAI Area, EU27 & EFTA" (el)	2,25E+03	kg	
SP		Alluminio | Estrusione "section bar extrusion, aluminium – RER" (el)	2,25E+03	kg	
SP		Alluminio | Trasporto "market for transport, freight, lorry, unspecified - RER" (el)	6,97E+01	t km	2,25 t × 31 km
Cop		**Policarbonato** "polycarbonate production – RER" (el)	1,99E+03	kg	†
Cop		Policarbonato | Estrusione "Extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline - FR" (el) † richiede 1 kg di materia prima per 0,94 kg di prodotto finito	1,87E+03	kg	
Cop		Policarbonato | Trasporto "market for transport, freight, lorry, unspecified - RER" (el)	2,16E+01	t km	1,87 t × 11,6 km
		Flusso in uscita	**Quantità**		
		Serra	**1**	pz	

Tabella 6 Dati d'inventario del sottosistema serra (S0)

Per la serra (e per tutti i suoi componenti) è stata assunta una vita utile di 15 anni[44].

Il flusso elementare corrispondente all'**occupazione di suolo** dovuta alla serra è stato calcolato come prodotto della superficie del pavimento per gli anni di vita utile della serra.

Il volume di **calcestruzzo** impiegato è stato calcolato come prodotto della superficie occupata dalle fondazioni (368 m^2) per la loro profondità (0,18 m) (al lordo dei ferri d'armatura). I dati d'inventario sul calcestruzzo si riferiscono a calcestruzzo premiscelato le cui caratteristiche sono in linea con le specifiche di progetto della serra oggetto dello studio [ecoInvent 2007]. L'ecoprofilo, che si riferisce al mercato svizzero, è stato scelto, tra le alternative a disposizione su Agribalyse 3.0, come approssimazione migliore per il calcestruzzo utilizzato in Italia ed Europa (cfr. Antón et al. 2014).

[42] Il metodo di LCIA ReCiPe 2016 per la categoria di punto intermedio "uso del suolo" distingue sei possibili tipi di occupazione/destinazioni d'uso: silvicoltura, pascolo, colture annuali, colture permanenti, colture "a mosaico" e aree artificiali (urbane o industriali, reti stradali e ferroviarie, discariche) [Huijbregts et al. 2017 § 12.3.1] – è stata selezionata quest'ultima.

[43] Il set di dati include il trasporto al consumatore finale [ecoInvent a]

[44] In Antón et al. 2014 è assegnata una vita utile di 15 anni a fondazioni in calcestruzzo e strutture portanti in alluminio, di 10 alle coperture in policarbonato. Nel presente studio anche la vita utile del materiale di copertura è stata portata a 15 anni, considerati i 25 indicati dal fornitore delle lastre utilizzate nella loro dichiarazione ambientale di prodotto [Dott. Gallina a], si tratta di un'assunzione conservativa

I **ferri d'armatura**, in acciaio al carbonio laminato a caldo (B 450 C), includono 96 barre longitudinali, di diametro 12 mm e lunghezza assunta pari alla profondità della platea, e reti elettrosaldate, a maglie quadrate di lato 15 cm, di cavi nervati di diametro 8 mm per un'estensione complessiva assunta pari a quella della platea.
I pesi specifici di barre (più propriamente, la massa per metro lineare) e reti (massa per unità di superficie) utilizzati per i calcoli, sono stati ricavati da cataloghi di fornitori italiani che offrono prodotti con geometrie e caratteristiche analoghe[45].

La massa del **materiale di copertura** è stata calcolata moltiplicando la densità superficiale del policarbonato alveolare per la superficie totale della copertura (ca. 600 m^2) ricavata dalle quote nei disegni esecutivi di Plant800.
L'ecoprofilo selezionato per la materia prima si riferisce al mix di tecnologie usate in Europa per la produzione di policarbonato in granuli; come miglior approssimazione del processo di trasformazione del granulato in lastre, tra gli ecoprofili a disposizione su Agribalyse, è stato selezionato quello sulla "lavorazione di termoplastiche, per estrusione o termoformatura" in Francia.

Le quantità in Tabella 6 si riferiscono alla costruzione di una serra con le stesse caratteristiche di Plant800.
Per il calcolo dei flussi di riferimento ciascuna quantità è stata moltiplicata per un coefficiente <$\mathbf{k}$>, funzione della vita utile <$\mathbf{v}$> del componente cui è associato il flusso (espressa in anni), secondo la formula:

$$\boldsymbol{k}(v) = \frac{1}{\frac{\boldsymbol{v} * 365}{\boldsymbol{t}_c} * \boldsymbol{p}(t_c)}$$

dove <$\mathbf{t_c}$> (tempo ciclo) è il tempo medio di stazionamento sulla linea di un'unità di produzione (pianta) espresso in giorni, ossia la durata media di un ciclo colturale al netto del periodo di germinazione; <$\mathbf{p}(t_c)$> è la produzione media (in kg) realizzata in un tempo ciclo $\mathbf{t_c}$ (vedi anche formula di $\mathbf{p}$ in § 4.2.1.3). In Tabella 21 sono riportati valori di $\mathbf{t_c}$ su base stagionale; per il calcolo di $\mathbf{k}$ è stata usata la media sull'intero periodo di osservazione di 365 giorni.
Il coefficiente $\mathbf{k}$, così calcolato, equivale al reciproco della produzione media corrispondente al numero di cicli ($\frac{\boldsymbol{v}*365}{\boldsymbol{t}_c}$) teoricamente realizzabili durante la vita utile del componente.

Sono stati esclusi dall'analisi: l'impianto elettrico; bulloni, viti, tasselli e staffe di collegamento; le guarnizioni tra profili d'incastro e lastre di copertura; il consumo di energia elettrica e l'allocazione degli strumenti utilizzati per le operazioni di montaggio (p.e. trapani avvitatori, fresatrice per lastre di copertura triangolari); il processo di verniciatura delle parti in alluminio; il trasporto del policarbonato dal sito di produzione del granulato a quello di trasformazione in lastre di copertura; tutti gli imballaggi.

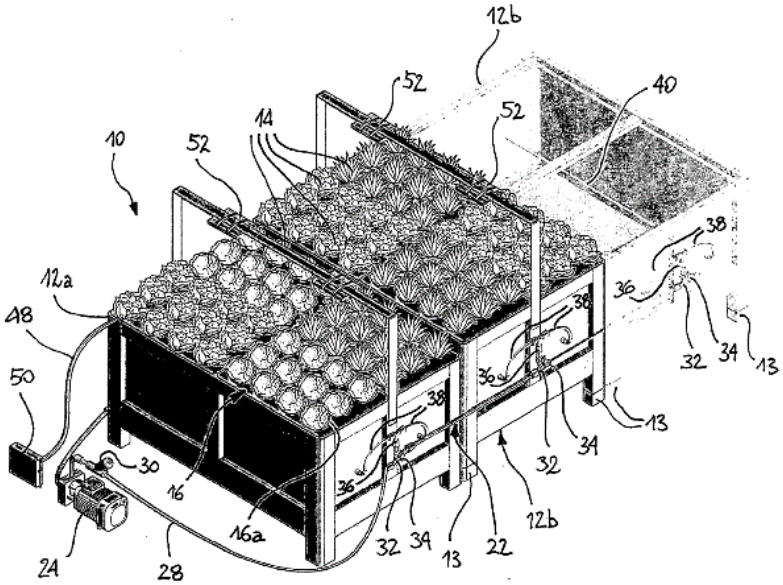
Una stima indicativa dell'impatto associato agli elementi ritenuti più rilevanti tra quelli esclusi è riportata in Appendice D.

[45] Vedi Tabella 44 in Appendice A § 1

3.2.1.2 **Moduli aeroponici *AeroSmart*** (S1)

AeroSmart è un sistema aeroponico modulare per la coltivazione, il trasporto e l'esposizione di prodotti vegetali, brevettato[46] e prodotto dalla startup italiana Agricooltur.

Esso comprende: dei contenitori chiusi (**camere di crescita**), i cui coperchi fungono da elementi portapiante ("**piastre di coltivazione**"), e un **gruppo di fertirrigazione**, costituito da: un serbatoio, una pompa, una condotta di aspirazione e una condotta di mandata, cui sono collegati gli ugelli per la nebulizzazione della soluzione nutritiva nelle camere di crescita.



#	Elemento
12a	Serbatoio
12b	Camera di crescita
13	Elementi di supporto
14	Piante
16	Piastre di coltivazione
22	Condotta di mandata (pompa-ugelli)
24	Pompa
28	Condotta di aspirazione (serbatoio-pompa)
30	Filtro
32	Valvole ugelli
36 **38**	Ugelli nebulizzatori (lungo la condotta 22)
50	Modulo per ozonizzazione (opzionale)
52	Luci di assimilazione (opz.)

Figura 24 Illustrazione schematica dell'invenzione tratta dal brevetto [Divià, Boniforte, Baglione, Ferrero & Tosco 2019, p. 11] con legenda di alcuni degli elementi rappresentati

AeroSmart può essere eventualmente corredato di **elementi opzionali**, come: luci di assimilazione, un modulo per l'ozonizzazione della soluzione nutritiva, valvole e/o condotte idrauliche aggiuntive (per il lavaggio delle vasche o per differenziare gli interventi di fertirrigazione), sensori e collegamenti a sistemi elettronici di controllo.
In Figura 24, un'illustrazione schematica dell'invenzione brevettata ne mostra gli elementi principali e alcuni di quelli opzionali appena citati.

Nei moduli Aerosmart implementati nelle serre Urbancooltur e nei container trasportabili *Hortus* le camere di crescita sono ricavate da agri-bins[47] opportunamente modificati ("moduli a contenitori") o da vasche assemblate in modo da realizzare un'unica più lunga canaletta ("moduli a canaletta") (cfr. Figura 24 e Figura 31).
I tubi di mandata, gli ugelli nebulizzatori e i relativi connettori formano il canale idraulico principale che collega i contenitori disposti in serie o che attraversa la canaletta, a seconda della configurazione adottata. In un intervento di fertirrigazione, la soluzione nutritiva nel serbatoio è prelevata dalla pompa attraverso la condotta di aspirazione per raggiungere quella di mandata e quindi gli ugelli. Uno o più elementi filtranti sono frapposti tra aspirazione e mandata per disinfettare la soluzione e trattenere impurità grossolane. Il getto nebulizzato di soluzione nutritiva all'interno della camera di crescita irrora gli apparati radicali delle piante alloggiate sulle piastre.

[46] Brevetto europeo 3 649 849 B1 (2021) [Divià, Boniforte, Baglione, Ferrero & Tosco 2019]
[47] «Un ***bins*** (o ***agri-bins*** o **cassa-pallet**) è un contenitore impilabile ad uso agricolo adibito a stoccaggio, trasporto e conservazione […] dei prodotti ortofrutticoli.» [Wikipedia b]

È comune che parte della soluzione erogata dagli ugelli durante l'intervento di fertirrigazione non venga assorbita dalle radici delle piante e precipiti sul fondo delle camere di crescita. La soluzione precipitata può essere recuperata, collocando all'altezza del fondo (o sotto i contenitori) un **canale di scolo**, che scarichi nel serbatoio, e degli **elementi di supporto** (piedini o telai, preferibilmente regolabili in altezza) (vedi elemento #13 in Figura 24) che mantengano il fondo di ciascun contenitore (o quello della canaletta) a un'altezza h_1 maggiore o uguale rispetto al pelo libero della soluzione contenuta nel serbatoio (h_0). Il dislivello fa sì che, per il principio dei vasi comunicanti, la soluzione precipitata non si accumuli sul fondo delle camere di crescita ma, passando per il canale di scolo, torni nel serbatoio (cfr. Divià, Boniforte, Baglione, Ferrero & Tosco 2019, § 0027, § 0038, § 0039). La soluzione così recuperata può essere ricircolata, previo filtraggio, nei successivi interventi di fertirrigazione.

Come serbatoio può essere utilizzato il primo dei contenitori della serie (quello più vicino al vano pompa, così da minimizzare la lunghezza della condotta di aspirazione), posizionandolo più in basso rispetto agli altri ($h_0 \leq h_1$) (vedi contenitore #12a connesso agli elementi #24 e #28 e contenitori #12b nella rappresentazione in Figura 5). Nei moduli a canaletta, il canale di scolo può essere omesso, mettendo le vasche in pendenza e in diretta comunicazione con il serbatoio, fintantoché $h_0 \leq h_1$ la soluzione precipitata a fondo canaletta vi scivolerà dentro (vedi Figura 25, disegno a dx).

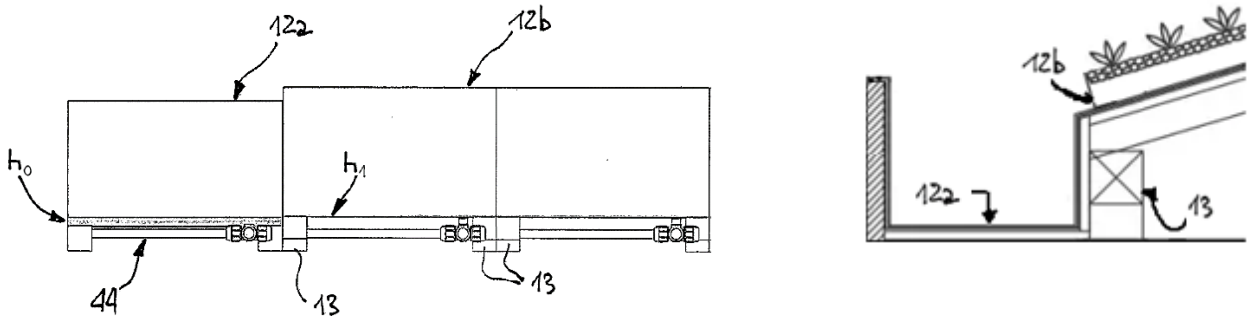


Figura 25 Illustrazioni schematiche del recupero della soluzione nutritiva.
A sx: camere di crescita (#12b) su elementi di supporto (#13) collegati a serbatoio (#12a) dal canale di scolo (#44) (adattamento da Divià, Boniforte, Baglione, Ferrero & Tosco 2019, p. 14). A dx: canaletta (#12b) in pendenza (accentuata a scopo illustrativo) mediante elementi di supporto (#13) in comunicazione con il serbatoio (#12a).

Scegliendo opportunamente h_0 e h_1, per mezzo degli elementi di supporto è possibile agevolare le operazioni di messa a dimora e di raccolta delle piante, portando le piastre di coltivazione a un'altezza più confortevole per gli operatori.

In Figura 26 sono rappresentate schematicamente le piastre di coltivazione: sui coperchi (#16) dei contenitori (#12) sono praticati dei fori (#18), sedi dei vasi (#20) contenenti le piante (#14). I vasi presentano delle piccole fessure: le radici delle piante spontaneamente vanno ad occupare questi spazi e ad estendersi verso la camera di crescita, così da poter trarre, dall'ambiente saturo di soluzione nutritiva al suo interno, l'idratazione e il nutrimento necessari al sostentamento della pianta.

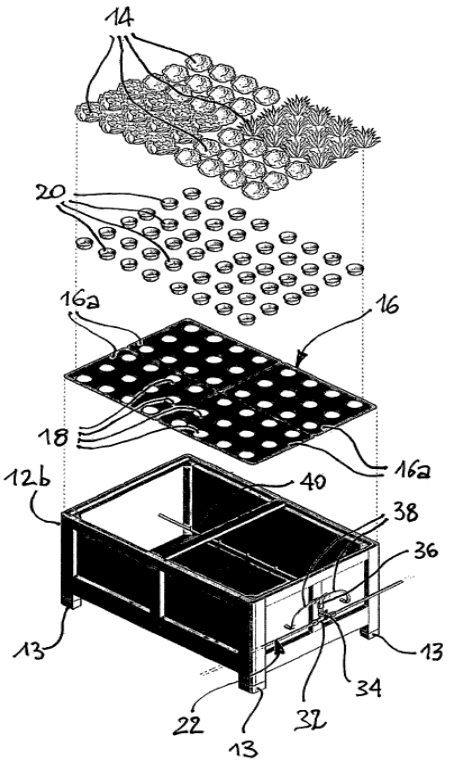


Figura 26 Esploso schematico degli elementi principali di camera di crescita e piastre di coltivazione
[Divià, Boniforte, Baglione, Ferrero & Tosco 2019, p. 12]

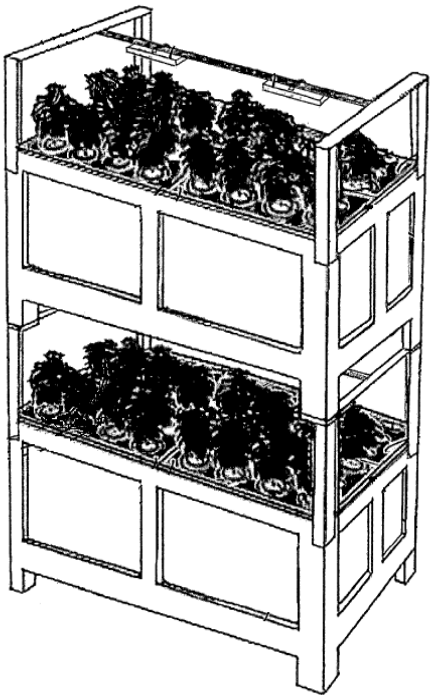


Figura 27 Illustrazione schematica di moduli a contenitori sovrapposti con luci di assimilazione [*ivi*, p. 16]

Sia i vasi che le piastre possono essere estratti dal modulo senza dover recidere le radici delle piante (vedi Figura 28 e Figura 29). Mantenendo le radici idratate, le piante possono continuare il loro ciclo vegetativo anche durante trasporto ed esposizione.

Figura 28 Piastra di coltivazione sollevata
[Agricooltur]

Figura 29 Vaso a rete estratto con radici intatte
[Agricooltur]

In Figura 27 è proposta una configurazione diversa in cui i contenitori sono sovrapposti per realizzare coltivazioni su più piani.

Nella serra Plant800 di Cascina Gorrea sono installati quattro moduli AeroSmart gemelli, a ognuno dei quali corrisponde una linea produttiva.

Figura 30 Moduli aeroponici Aerosmart nella serra Plant800 di Cascina Gorrea

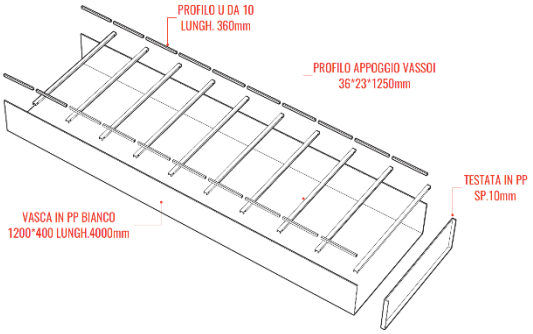


Figura 31 Disegno esecutivo delle vasche (moduli a canaletta) [Agricooltur, disegno 1]

Ciascun modulo è costituito da 10 vasche in polipropilene alveolare bianco idoneo al contatto con alimenti, alte 40 cm, larghe 1,2 m e lunghe 4 m (cfr. Figura 31), unite a formare un'unica canaletta. La linea può ospitare fino a 200 piastre di coltivazione (vassoi), disposte su 100 file. Su una piastra può essere alloggiato un numero variabile di vasi (e quindi di piante) a seconda del numero di fori ricavati su di essa. Le piastre utilizzate per le coltivazioni di lattuga oggetto di questo studio presentano 12 fori di diametro 7 cm. In questa configurazione, l'area coltivabile della serra (192 m^2) può produrre fino a 9600 cespi di lattuga (2400 per linea) in cicli colturali della durata di circa un mese. Le piastre sono assicurate alla canaletta per mezzo di profili di appoggio in polipropilene (100 elementi orizzontali e 200 verticali).

Un'estremità della canaletta è chiusa con un pannello in polipropilene (testata) (vedi Figura 31), l'altra comunica con un serbatoio (in una configurazione simile a quella rappresentata Figura 25, disegno a dx). Metà del serbatoio è collocata sotto la prima fila di piastre di coltivazione poggiate sulla canaletta, l'altra metà è delimitata dall'interfaccia con il vano pompa e da un coperchio di plastica rigida (cfr. Figura 32). Il serbatoio ha una capacità di circa 250 L. Quando il livello di soluzione contenuto nel serbatoio raggiunge una certa soglia minima, il sistema di alimentazione AeroFeed provvede al rabbocco in maniera automatica.

Figura 32 Vano pompa e serbatoio

Figura 33 Interno del serbatoio (visto dall'alto)

Ciascuna linea è equipaggiata con una pompa centrifuga Pedrollo FCR 200/4 alimentata con un motore elettrico trifase ad alto rendimento (IE3) [Pedrollo]. La pompa è collocata nel vano ispezionabile, adiacente al serbatoio, visibile in Figura 32.
Nei mesi invernali (da dicembre a marzo) un riscaldatore sommergibile mantiene la temperatura della soluzione nutritiva nel serbatoio intorno ai 20 ° C. In Figura 33 è possibile intravedere il riscaldatore, aderente alla parete tra due dei tubi di mandata.

Ad ogni intervento di fertirrigazione: la pompa preleva la soluzione nutritiva dal serbatoio; questa passa, prima per i due filtri in serie tra aspirazione e mandata, quindi per i quattro tubi in polivinilcloruro all'interno della canaletta, fino a raggiungere gli 800 ugelli montati su di essi e, infine, sotto forma di aerosol bagnare gli apparati radicali delle piante messe a dimora sulla canaletta. Gli ugelli nebulizzatori hanno una portata volumetrica di 7,5 L/h. Per ridurre le perdite idrauliche e garantire l'uniformità di bagnatura, sono adoperati ugelli salvagoccia, i quali si aprono solo quando il fluido raggiunge la pressione desiderata.

Q.tà	Elemento	Materiale	Massa	Potenza	Distanza fornitore
1	**Elettropompa** centrifuga multigirante (2900 giri al minuto, portata max 200 L/min)	Acciaio inossidabile	20,1 kg	1,5 kW	338 km
1	**Riscaldatore sommergibile**	-	-	400 W	-

Tabella 7 Specifiche tecniche d'interesse apparecchiature integrate nel modulo *AeroSmart*. Quantità riferite alla singola linea di produzione. Dati elettropompa da scheda tecnica [Pedrollo]

Le vasche sono sostenute da telai di supporto in acciaio regolabili in altezza (visibili in Figura 30). Man mano che ci si allontana dal serbatoio, le vasche sono disposte ad altezze via via crescenti. Grazie alla leggera pendenza, così creata, la soluzione non assorbita, precipitata sul fondo delle vasche, è convogliata verso il serbatoio.

In Tabella 8 sono riportati i **dati d'inventario** relativi ai processi di produzione, trasformazione e trasporto dei materiali necessari all'assemblaggio di una linea di produzione; i flussi sono suddivisi in tre gruppi: telaio di supporto (TS), contenitore (Cont) e condotta (Tub).
I dettagli dei calcoli sono riportati in Appendice A § 2.

		Flusso in ingresso	Quantità		Note
Sup		Telaio di supporto | **Acciaio** "steel production, converter, low-alloyed – RER" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]	3,62E+02	kg	
Cont		Canaletta | **Polipropilene**	1,53E+02	kg	†
Cont		Profili di appoggio per le piastre | Polipropilene	4,19E+01	kg	†
Cont		Piastre di coltivazione | Polipropilene "polypropylene production, granulate – RER" (el)	1,41E+02	kg	†
Tub		Condotta | **Polivinilcloruro** "polyvinylchloride production, suspension polymerisation – RER" (el)	2,61E+01	kg	‡
Sup		Telaio di supporto | Acciaio | Lavorazione "metal working, average for steel product manufacturing - RER" (el)	3,62E+02	kg	
Cont		**Estrusione plastiche** "Extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline - FR" (el) † richiede 1 kg di materia prima per 0,94 kg di prodotto finito	3,15E+02	kg	
Tub		**Estrusione plastiche (tubi)** "extrusion, plastic pipes – RER" (el) ‡ richiede 1 kg di materia prima per 0,996 kg di prodotto finito	2,60E+01	kg	
Sup		Telaio di supporto | Acciaio | Trasporto	1,12E+01	t km	362 kg × 31 km
Cont		Polipropilene | Trasporto	3,15E+01	t km	316 kg × 100 km
Tub		Condotta | Polivinilcloruro (PVC) | Trasporto "market for transport, freight, lorry, unspecified – RER" (el)	2,60E+00	t km	26 kg × 100 km
		Flusso in uscita	**Quantità**		
		Linea di produzione (modulo aeroponico a canaletta)	**1**	pz	

Tabella 8 Dati d'inventario del sottosistema "modulo aeroponico *AeroSmart*" (S1)

Per l'estrusione di lastre e profili in polipropilene è stato usato lo stesso ecoprofilo (basato sul mercato francese) già usato per l'estrusione del policarbonato (cfr. Tabella 6) (non essendo disponibili, sulle risorse consultate, dati sull'Italia o sul continente europeo).
Per modellare il processo di produzione del polivinilcloruro (materia prima per le condotte idrauliche), potendo scegliere tra due ecoprofili i quali si riferiscono a metodi di produzione alternativi, in mancanza di informazioni più specifiche, si è assunto che il materiale sia stato ottenuto mediante polimerizzazione in sospensione; ciò, considerato che la maggior parte della produzione mondiale di PVC è realizzata con tale metodo [Kovacic & Andricic 2005].

Le quantità in Tabella 8 (in parte elaborate a partire dai dati in Figura 31) si riferiscono a una singola linea di produzione.
Per il calcolo dei flussi di riferimento, ciascuna quantità è stata moltiplicata per il numero di linee installate nella serra (4) e per il coefficiente <k>, funzione della vita utile <v> del componente cui è associato il flusso, introdotto nel paragrafo sul sottosistema serra (§ 3.2.1.1).
È stata assunta una vita utile di 5 anni per i componenti del contenitore (Cont), di 10 anni per condotta (Tub) e telaio di supporto (TS).

Pompa, riscaldatore e ugelli sono stati esclusi dal computo finale (vedi § 4.2.0.1). Per una valutazione approssimativa dell'entità del loro contributo si rimanda all'Appendice D.

3.2.1.3 **Coltivazione aeroponica** (A)

Il sottosistema Coltivazione aeroponica (A), illustrato nei prossimi sottoparagrafi, comprende:

- i processi a monte della messa a dimora delle piantine sul modulo aeroponico (germinazione, acquisizione di sementi, substrato di germinazione e vasi a rete);
- l'acquisizione (produzione e trasporto) dei fertilizzanti e la preparazione della soluzione nutritiva;
- il processo vero e proprio di coltivazione sulla linea (A-A): esso include la fertirrigazione delle piante sui moduli aeroponici e i consumi diretti di energia elettrica per il controllo climatico e monitoraggio e controlli automatici della serra.

I processi presentati nei prossimi sottoparagrafi, e i relativi dati quantitativi, si riferiscono alla produzione delle tre varietà di lattuga coltivate presso la serra Urbancooltur Plant800 di Cascina Gorrea. Sulle quattro linee al suo interno, oltre alla lattuga (il cui sistema di prodotto è oggetto di questo caso studio) sono coltivate anche altre specie orticole (erbe aromatiche e micro-ortaggi) che, per crescere, richiedono condizioni di temperatura, umidità e illuminazione compatibili con quelle della lattuga. La quota parte di piastre di coltivazione dedicate alle altre specie varia durante l'anno a seconda dell'offerta pianificata dall'azienda; la lattuga è coltivata per tutto l'anno con almeno una linea interamente dedicata ad essa.
Per evitare di dover allocare i flussi d'infrastruttura e i consumi di energia elettrica dovuti a climatizzazione, ventilazione, monitoraggio e controllo della serra su più prodotti (problema della multifunzionalità del sistema), tutti i flussi di riferimento sono stati calcolati assumendo che l'intera capacità produttiva della serra ($\boldsymbol{c_p}$ = 9600 pezzi[48]) sia sfruttata 365 giorni l'anno per produrre esclusivamente lattuga.

Normalmente, la messa di dimora di nuove piantine avviene ogni 7 giorni. La germinazione dei semi è organizzata di conseguenza.
La durata di un ciclo colturale (inteso come tempo di stazionamento della pianta sulla linea) varia da un minimo di 18 giorni a un massimo di 52; i cicli più brevi sono realizzati in estate, i più lunghi in inverno [Agricooltur, doc. int. 1; Agricooltur, rilievi agronomici]. La durata media è di 30 giorni. I dati su base stagionale sono riportati in Tabella 21.

La percentuale di scarti di produzione dichiarata dall'azienda, per la lattuga, si aggira intorno al 5% dei pezzi prodotti [Agricooltur, com. tel. del 19 agosto 2022]. Per i calcoli, si è dunque considerata una produzione utile di 9120 unità per ciclo colturale.

Il parametro $\boldsymbol{p}(t_c)$ introdotto precedentemente vale quindi:

$$\boldsymbol{p}(t_c) = \boldsymbol{c_p} * (1 - \boldsymbol{scarti}) * \boldsymbol{m} = 9600 * (1 - ,05) * \boldsymbol{m} = 9120 * \boldsymbol{m}$$

con <**m**> (massa media della parte epigea delle piante prodotte) e <**scarti**> (percentuale di pezzi scartati, data come numero compreso tra 0 e 1).

La produzione media annua risultante equivale a circa 138 tonnellate per ettaro (mettendo al denominatore solo l'area effettivamente coltivabile la resa sale a 264 t/ha).

[48] 4*200*12 = 9600 (4 linee di produzione da 200 piastre di coltivazione ciascuna, 12 vasi a rete per piastra di coltivazione, 1 pianta per vaso a rete)

3.2.1.3.1 **Piante** (A-P)

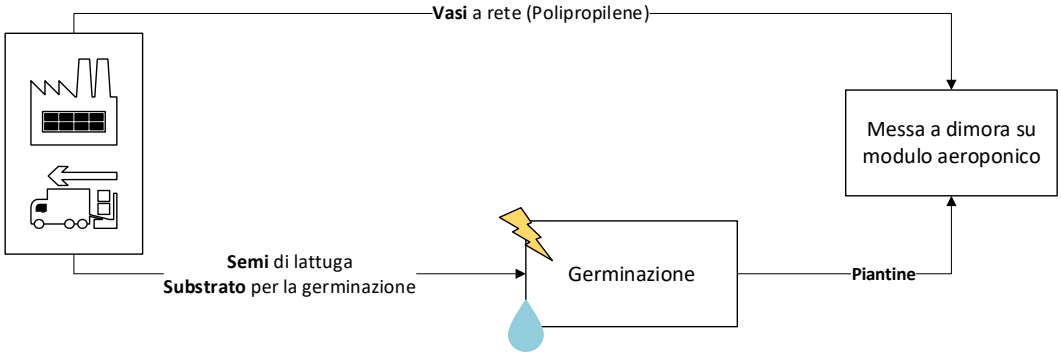


Figura 34 Diagramma di flusso del raggruppamento di processi "Piante" (A-P)

La parte del sistema di prodotto descritta in questo paragrafo include i processi di "Germinazione" (A-P0) e di produzione e trasporto dei vasi a rete (V), i cui output costituiscono gli input del processo "Messa a dimora su modulo aeroponico" (A-P1).

		Flusso in ingresso	Quantità		Note
P0		**Semi** di lattuga "Lettuce, seeds, conventional, at production site/kg – FR" [Agribalyse 2020]	1,59E-06	kg	
P0		**Acqua** (germinazione) "market for tap water – Europe without Switzerland" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]	6,44E-02	L	
P0		**Energia elettrica** (germinazione) "market for electricity, low voltage – IT" (el)	8,90E-04	kWh	
P0		**Substrato** per la germinazione (torba) "peat production – NORDEL" (el)	2,40E-02	kg	
P0		Substrato per la germinazione | Trasporto "transport, freight, light commercial vehicle – Europe without Switzerland" (el)	4,54E-04	t km	24 g × 18,9 km
V		**Vaso a rete** | Polipropilene (PP) "polypropylene production, granulate – RER" (el)	5,03E-03	kg	†
V		Vaso a rete | Stampaggio a iniezione, plastiche "injection moulding – RER" (el) † richiede 1 kg di materia prima per 0,994 kg di prodotto finito	5,00E-03	kg	
V		Vaso a rete | Trasporto "transport, freight, light commercial vehicle – Europe without Switzerland" (el)	9,45E-05	t km	5 g × 100 km
		Flusso in uscita	**Quantità**		
		Piantina in vaso a rete, pronta per essere messa a dimora su modulo aeroponico AeroSmart	1	pz	

Tabella 9 Dati d'inventario del processo "Messa a dimora su modulo aeroponico" (A-P1)

Le quantità in Tabella 9 si riferiscono a una singola piantina e un singolo vaso a rete.
Per il calcolo dei flussi di riferimento, i flussi di ciascuna istanza d'inventario sono da moltiplicare per il parametro dipendente <**pzkg**>, che stima il numero di pezzi necessario a produrre 1 kg di prodotto idoneo alla vendita, in funzione della massa media assunta per un'unità idonea alla vendita ($\boldsymbol{m}$) e della percentuale di scarti di produzione ($\boldsymbol{scarti}$), secondo la formula:

$$\boldsymbol{pzkg} = \frac{1}{\boldsymbol{m}\,(1 - \boldsymbol{scarti})}$$

Per lo studio sono state prese in esame le coltivazioni delle varietà *Fiore d'Insalata* SalaNova® (babyleaf a cappuccio e a foglia di quercia). Le confezioni di semi di lattuga SalaNova® contengono 17 600 semi per oncia [Johnny Seeds]. Un'oncia Avoirdupois (1 oz) è pari a 0,028349523125 kg [Walker et al. 2019, p. 442]. La massa media di un seme, dedotta dai dati trovati, è di circa 1,6 mg. Imballaggio e trasporto delle sementi sono esclusi dall'analisi. Da ogni seme germoglia una pianta (in mancanza di dati specifici si è assunto un tasso di successo del 100%).

La germinazione avviene in vivaio: dal momento in cui il seme è posto nelle condizioni idonee acché si inneschino i processi biologici che portano allo sviluppo della plantula alla messa a dimora di quest'ultima sul modulo aeroponico vi trascorre un tempo generalmente compreso tra una e tre settimane (quando la plantula ha messo le prime 2-3 foglie vere; vedi Figura 36 e Figura 37).
I semi in germinazione sono imbibiti e innaffiati manualmente. Poiché a temperature inferiori ai 2 ° C la germinazione è inibita e sopra i 23 ° C i semi potrebbero entrare in termodormienza [Fiume 2014], nei giorni più freddi sono impiegati germinatoi elettrici (contenitori in plastica provvisti di tappeto riscaldante, cfr. Figura 35), mentre in estate può essere necessario raffrescare il vivaio.

Figura 35 Germinatoio elettrico commerciale [Garland]

Figura 36 Plantulae di lattuga in cubetti di torba pronte per la messa a dimora

Figura 37 Processo di messa a dimora su modulo aeroponico (serra Plant800, febbraio 2022)

Sulla fase di germinazione non sono stati raccolti dati quantitativi primari. Le quantità di acqua e di energia elettrica, per l'innaffiatura e per il controllo climatico del semenzaio, necessari alla germinazione di un seme di lattuga, sono ricavati a partire dai dati d'inventario dei processi "*Lettuce seedling for autumn crop, conventional* - FR" e "*Lettuce seedling for winter crop, conventional* - FR" (media aritmetica) in Agribalyse 3.0 [Agribalyse 2020]. I dati si riferiscono alla produzione in serre da vivaio in Francia e sono qui usati come approssimazione della produzione dei vivai in Nord Italia.

I semi sono fatti germinare in cubetti di torba pressata di lato 3 cm (vedi Figura 36 e Figura 37).
La massa del substrato per la germinazione è stata calcolata moltiplicando la densità apparente di una miscela secca a pH neutro di torbe di sfagno (300 kg/m^3, cifra indicativa) per il volume del cubetto (il risultato è in linea con i valori misurati su alcuni campioni).

Il fornitore di sementi e substrato è ubicato a Moncalieri (TO). Per i processi di trasporto si è considerato l'utilizzo di un furgone con massa a pieno carico non superiore alle 3,5 tonnellate e una distanza percorsa di 18,9 km.

I vasi a rete utilizzati (massa misurata: 5 g) richiamano le fuscelle tipicamente impiegate nella produzione casearia (cfr. Figura 29 e Figura 37). Sono realizzati in polipropilene (PP) idoneo al contatto con alimenti mediante stampaggio a iniezione. Hanno forma cilindrica: sono profondi 3,5 cm, presentano un diametro inferiore di 7 cm e uno superiore di 8.
La sporgenza a corona circolare sulla parte superiore permette l'ancoraggio dei vasi alle sedi presenti sulle piastre di coltivazione sui moduli AeroSmart. I vasi presentano fori quadrati lungo la superficie laterale e fori circolari sulla base, rispettivamente di lato e diametro 5 mm; attraverso tali fori gli apparati radicali delle piante si estendono spontaneamente dal cubetto di torba verso l'ambiente umido della camera di crescita per assorbire la soluzione nutritiva nebulizzata.

3.2.1.3.2 **Soluzione nutritiva** (A-F0)

Il processo “Preparazione della soluzione nutritiva” (A-F0) include i contributi degli ingredienti della soluzione nutritiva: acqua demineralizzata e fertilizzanti (processi di produzione e trasporto).

	Flusso in ingresso	Quantità		Note
	Acqua demineralizzata “market for water, deionised, from tap water, at user – Europe without Switzerland” (ecoInvent) [Agribalyse 2020]	1,00E+00	kg	
	Fertilizzante | Nitrato di potassio “Potassium nitrate, at regional plant (WFLDB 3.5) – RER” [Agribalyse 2020]	4,10E-04	kg	
	Fertilizzante | Nitrato di calcio “Calcium ammonium nitrate (27% N), at plant (WFLDB 3.5) – RER”	1,80E-04	kg	
	Fertilizzante | Fosfato monoammonico “Monoammonium phosphate (52% P2O5 8.4% N), at plant (WFLDB 3.5) – RER”	1,80E-04	kg	
	Fertilizzante | Solfuro di potassio “potassium sulfate production – RER” (el) † ecoprofilo riferito al contenuto di K_2O; 48% di 7,00E-05 kg (cfr. Tabella 53)	3,36E-05	kg	†
	Fertilizzante | Trasporto “transport, freight, light commercial vehicle – Europe without Switzerland” (el)	6,80E-06	t km	0,84 g × 8,1 km
	Flusso in uscita	**Quantità**		
	Soluzione nutritiva	**1**	L	

Tabella 10 Dati d'inventario del processo “Preparazione della soluzione nutritiva” (A-F0)

I dati in Tabella 10 si riferiscono a 1 L di soluzione nutritiva in serbatoio linea, utilizzata come input del processo “Fertirrigazione” (A-F1) descritto nel paragrafo successivo.

Per il calcolo dei flussi di riferimento, le quantità in Tabella 10 sono state moltiplicate per un coefficiente <**F**> (per com'è definito, in L/UF), stima della quantità di soluzione mediamente consumata per ottenere 1 kg di prodotto idoneo alla vendita. **F** è calcolato secondo la formula:

$$\boldsymbol{F = sol * pzkg * t_c}$$

<**sol**> è il consumo medio giornaliero di soluzione nutritiva per pianta, i cui valori determinati su base mensile sono riportati in Tabella 13.

Per la preparazione della soluzione nutritiva è utilizzata acqua demineralizzata in cui vengono successivamente disciolti i macroelementi (azoto, fosforo e potassio) e microelementi (magnesio, ferro, manganese, zinco e boro) più indicati per lo sviluppo ottimale delle piante.

I dati in Tabella 10 sono ricavati dalla ricetta della miscela base formulata da Agricooltur già in uso tra agosto 2020 e gennaio 2021 su linee sperimentali a rabbocco manuale [Agricooltur, doc. int. 2021] e sono rappresentativi delle concentrazioni di nutrienti nella soluzione nutritiva attualmente impiegata nelle linee dedicate alla produzione di lattuga nella serra Plant800 [Agricooltur, com. del 23 maggio 2022] (vedi anche Appendice A § 3.1).

Per la modellazione dei processi di produzione dei fertilizzanti inorganici sono stati utilizzati gli ecoprofili del **W**orld **F**ood **L**CA **D**ata**b**ase versione 3.5 [Nemecek et al. 2019] inclusi in Agribalyse 3.0, tranne che per il solfuro di potassio, per il quale è stato usato un ecoprofilo tratto da ecoInvent.

Il fornitore dei fertilizzanti è ubicato a Carignano (TO). Per i processi di trasporto, si è considerato l'utilizzo di un furgone con massa a pieno carico non superiore alle 3,5 tonnellate e una distanza percorsa di 8,1 km.

Dall'analisi sono stati esclusi i prodotti (microelementi) utilizzati in concentrazioni minori o uguali ai 5 centigrammi per litro e l'acido nitrico usato per correggere il pH della soluzione.

L'acqua demineralizzata è ottenuta in loco attraverso un sistema di deionizzazione a osmosi inversa con filtro a membrana. L'acqua in ingresso, proveniente dalla fornitura idrica locale, ha una conducibilità elettrica di circa 700 µS/cm [49]; una volta processata, è condotta in una cisterna da 1000 L in polietilene lineare a bassa densità (LLDPE) *food-graded* (distanza del fornitore: ca. 500 km). La cisterna è collegata al modulo di alimentazione AeroFeed mediante condotta in PVC.

Per semplificare l'analisi, per l'acqua demineralizzata è stata utilizzata la voce del database ecoInvent sulla produzione in Europa di acqua demineralizzata a partire da acqua di rubinetto: il set di dati include i flussi di infrastruttura e i consumi di energia elettrica associati [Agribalyse 2020]; i dettagli della configurazione impiantistica adottata da Agricooltur (cisterna, condotte e filtri), pertanto, sono esclusi dalla trattazione, in favore di una schematizzazione del processo di validità generale.

Il modulo di alimentazione ***AeroFeed*** è costituito da un'elettropompa da 250 W e cinque pompe dosatrici, un pH-metro e un misuratore di conducibilità elettrica. Le condotte che collegano le sue parti e il modulo con le linee di produzione, in Plant800 e tunnel adiacenti, sono in polivinilcloruro rigido. Il sistema è connesso agli altri controlli automatici della serra.

Q.tà	Elemento	Materiale	Massa	Potenza	Distanza fornitore
1	**Elettropompa** multistadio orizzontale	Acciaio inossidabile	6,68 kg	250 W (nom.)	370 km
5	**Pompa dosatrice** elettromagnetica multifunzione	Polivinilidenfluoruro	4,1 kg	< 19 W (max)	52,1 km

Tabella 11 Specifiche tecniche d'interesse macchine del modulo *AeroFeed*.
Dati da schede tecniche [Calpeda; ATA 2016].

Le macchine e i sensori di AeroFeed, così come la condotta che collega i vari elementi ai moduli AeroSmart e il vano macchine, sono stati esclusi dal computo finale (vedi § 3.2.0.1).
Una valutazione approssimativa dell'entità del contributo di pompe e condotte è proposta in Appendice D.

AeroFeed eroga l'acqua ai serbatoi delle linee di produzione (uno per linea) attraverso le rispettive condotte di mandata; un sensore di livello interrompe l'alimentazione del serbatoio quando è raggiunto il 95% della sua capacità massima (230 L); all'acqua demineralizzata sono aggiunte, in proporzioni definite, apporti di due diverse miscele di acqua concimata con fertilizzanti minerali (internamente chiamate: M1 ed M2), preparate dal personale specializzato di Agricooltur.
Le miscele sono contenute in taniche da 20 L in polietilene ad alta densità (HDPE) per uso alimentare (di massa di poco inferiore a 1 kg ciascuna; distanza del fornitore: 170 km) collegate

[49] Pari a 0,7 dS/m. Valori di riferimento per la lattuga in Lakhiar et al. 2018 § Tab. 1: 0,8 ÷ 1,2 dS/m.
L'aggiunta dei fertilizzanti può provocare un rapido aumento della conducibilità elettrica oltre il range individuato. La demineralizzazione porta la conducibilità elettrica dell'acqua, in cui saranno poi sciolti i sali, a valori di partenza nell'ordine dei nanosiemens per centimetro; sono virtualmente azzerati i contenuti di cloro (che in concentrazioni superiori alle 2 ppm potrebbe danneggiare le piante [Tunio et al. 2020]) degli altri c.d. "ioni zavorra", scarsamente assorbiti dalle colture e che contribuiscono al problema dell'accumulo di residui solidi sugli ugelli nebulizzatori e della loro conseguente ostruzione.

con piccoli tubi flessibili in PVC morbido alle pompe dosatrici. Le taniche e i tubi sono riutilizzati per almeno un anno (questi elementi non sono stati inclusi nell'analisi).

Nei moduli AeroSmart si realizza una **fertirrigazione a ciclo semi-chiuso**. Tra un intervento di fertirrigazione (ciclo di nebulizzazione) e l'altro:

1. la soluzione non assorbita dalle piante precipita sul fondo delle canalette;
2. essendo le canalette disposte in pendenza, la soluzione è convogliata nel serbatoio della linea per essere ricircolata;
3. il mix, così ottenuto, di soluzione vergine non ancora nebulizzata (accumulata nel serbatoio al primo rabbocco) e di soluzione non assorbita ivi convogliata, previo passaggio in due filtri disposti in serie, è utilizzato per l'intervento di fertirrigazione successivo e così via.

Il mantenimento di concentrazioni di nutrienti costanti nella soluzione contenuta nei quattro serbatoi è gestito in modo automatico da AeroFeed.
A intervalli temporali prestabiliti, una quantità campione di soluzione viene aspirata dal serbatoio della linea per passare attraverso un sensore che ne monitora conducibilità elettrica e pH, parametri attraverso i quali è possibile determinare se le concentrazioni di nutrienti nel frattempo sono cambiate. In base ai valori rilevati il sistema provvede automaticamente a calcolare e aggiungere nuovi apporti di M1 ed M2, utili a ripristinare i valori desiderati nella soluzione nel serbatoio di linea.
Quando il serbatoio raggiunge un livello inferiore ai 70 L, AeroFeed procede a rabboccarlo con nuova acqua demineralizzata, dopodiché un nuovo campione di soluzione viene prelevato dal serbatoio per il monitoraggio e la correzione della soluzione.

Una modica quantità di acido nitrico è aggiunta, all'occorrenza, per correggere il pH della soluzione (come nel caso delle due miscele di acqua concimata, una tanica di acido nitrico è collegata a un'apposita pompa dosatrice).

Ogni 7 giorni, la soluzione residua nei serbatoi viene scaricata per procedere al lavaggio di vasche e canalette. Per ridurre al minimo sprechi, nelle 24 ore che precedono questa operazione manutentiva, il rabbocco automatico dei serbatoi di linea è sospeso, in modo tale da minimizzare la quantità di soluzione scaricata; pur contenendo un residuo di nutrienti esiguo (la soluzione è considerata esausta), essa può essere riutilizzata un'ultima volta per l'irrigazione delle colture in pieno campo circostanti. Nel presente studio la quantità di soluzione esausta scaricata è stata posta uguale a zero.

Il processo di lavaggio delle canalette è stato escluso dallo studio.

3.2.1.3.3 **Fertirrigazione** (A-F1)

Il processo "Fertirrigazione" (A-F1) include i consumi di soluzione nutritiva e di energia elettrica per la fertirrigazione.

Le pompe sono collegate al sistema di controllo automatico della serra. Il software regola la durata e la frequenza degli interventi di fertirrigazione (nebulizzazioni) in funzione delle condizioni di temperatura e umidità relativa all'interno della serra.
I consumi di energia elettrica giornalieri delle quattro pompe <E_{FI}> (espressi in kWh al giorno) sono calcolati, mese per mese, secondo la formula:

$$\boldsymbol{E_{FI}} = 4 * \boldsymbol{P} * \boldsymbol{f} * \frac{\boldsymbol{d}}{3600}$$

dove <P> è la potenza della pompa (1,5 kW), <f> la frequenza media degli interventi di fertirrigazione (numero di interventi giornalieri) e <d> la durata media di un intervento di fertirrigazione espressa in secondi (fissata pari a 25 secondi per tutti i mesi dell'anno). Per frequenza e durata sono stati utilizzati dati primari forniti dall'azienda (cfr. Tabella 55 in Appendice).

Nei mesi invernali (da dicembre a marzo) su ciascuna linea è utilizzato un riscaldatore sommergibile per mantenere la temperatura della soluzione nutritiva nel serbatoio a 20 ° C. I consumi di energia elettrica dovuti ai riscaldatori sommergibili <E_{RS}> sono stati stimati assumendo che in un'ora l'apparecchiatura assorba la potenza nominale (400 W) per 15 minuti e rimanga in stand-by per i restanti 45 minuti (cfr. Algone; Bills Wiz).

	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
f [intv./gg]	13	22	52	30	90	96	96	87	82	44	24	15
E_{FI} [kWh/gg]	0,52	0,91	2,17	1,25	3,75	4,00	4,00	3,63	3,42	1,83	1,00	0,61
E_{RS} [kWh/gg]	9,6	9,6	9,6	-	-	-	-	-	-	-	-	9,6

Tabella 12 Consumi medi giornalieri di energia elettrica per fertirrigazione (E_{FI}) e riscaldatori sommergibili (E_{RS})

In Tabella 13, sono riportati i consumi giornalieri di soluzione nutritiva per una pianta su base mensile, frutto di elaborazioni di dati primari e assunzioni discusse con il personale dell'azienda (vedi anche Appendice A § 3.3).

	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
sol. nutritiva [mL/(pianta*gg)]	29	29	36	36	36	40	40	40	39	41	36	30

Tabella 13 Consumi medi giornalieri di soluzione nutritiva (per pianta)

In Tabella 14, i consumi medi di energia elettrica e soluzione nutritiva, calcolati considerando l'intero periodo di osservazione di 365 giorni.

	Flusso in ingresso	**Quantità**	
⚡	**Energia elettrica** per interventi di fertirrigazione	2,26E+00	kWh
⚡	Energia elettrica per riscaldatore sommergibile "market for electricity, low voltage – IT" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]	3,18E+00	kWh
	Soluzione nutritiva "Soluzione nutritiva" (A-F0), cfr. Tabella 10	3,62E-02	L/pianta
	Flusso in uscita	**Quantità**	
	Fertirrigazione	**1**	gg

Tabella 14 Dati d'inventario del processo "Fertirrigazione" (A-F1)

3.2.1.3.4 **Climatizzazione e ventilazione della serra** (A-HVAC)

L'impianto per il **controllo climatico** (riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria) della serra Plant800 consiste di 12 climatizzatori split con inverter (unità residenziali da 12 000 BTU/h caricati con fluido refrigerante R32) e 12 ventole per il rinnovo dell'aria (10 v. di immissione, 2 v. di estrazione).

Dei termoigrometri dislocati lungo il perimetro interno della serra rilevano, minuto per minuto, temperatura e umidità relativa all'interno. I climatizzatori, le ventole e i termoigrometri sono collegati al sistema di controllo della serra che ne gestisce il funzionamento in modo automatico. I climatizzatori si accendono in modalità raffrescamento quando la temperatura interna della serra <**T**> raggiunge i 30 °C e restano accesi finché la temperatura non scende sotto i 29 °C. Da ottobre a maggio, i climatizzatori provvedono anche al riscaldamento della serra, che viene attivato quando T<18 °C e disattivato quando T raggiunge i 20 °C.
Gli interventi di ventilazione possono essere programmati, impostando regole su durata <d> e frequenza <f>, eventualmente differenziate in base alla fascia oraria, o avviati in presenza di determinate condizioni di umidità relativa o temperatura.

Per la stima dei consumi di energia elettrica delle apparecchiature sono state utilizzate le potenze nominali dei modelli in Tabella 15. Il climatizzatore di riferimento è stato scelto tra quelli effettivamente installati nella serra. I modelli delle ventole sono quelli suggeriti in Riva, 2021.

Q.tà	Elemento	Massa	Potenza
12	**Climatizzatore** mono split con inverter LG DC12RH	9,1 kg (unità interna) 34,1 kg (unità esterna)	0,93 kW (raffrescamento) 0,98 kW (riscaldamento)
10	**Ventola di immissione** Aspira AFM 250/4 MF	7,4 kg	0,18 kW
2	**Ventola di estrazione** VORTICEL EHP ES 404 M	9 kg	207,9 W (max)

Tabella 15 Specifiche tecniche d'interesse dei modelli di riferimento del sistema HVAC della serra Plant800. Dati da schede tecniche [LG a; LG b; Fantini Cosmi; Vortice].

In Tabella 17, sono riportati, su base mensile, i consumi di energia elettrica stimati per il riscaldamento e il raffrescamento della serra. Per calcolarli, le regole di accensione e spegnimento dei climatizzatori, citate sopra, sono state incrociate con i dati storici sulla temperatura interna della serra (forniti dall'azienda) (granularità: al minuto) per ottenere la durata di ciascun intervento di riscaldamento e raffrescamento; tali durate sono state poi moltiplicate per il numero di unità installate e per la potenza assorbita, in riscaldamento o in raffrescamento a seconda del caso, indicata sulla scheda tecnica del modello di climatizzatore di riferimento.

I consumi imputabili alla ventilazione <E_V> (in kWh al giorno) sono stati calcolati, assumendo valida per tutto l'anno la programmazione impostata a fine febbraio 2022 in Tabella, utilizzando la formula $\boldsymbol{E_V = \frac{(f_{F1}d_{F1}+f_{F2}d_{F2})*(n_{imm.}P_{imm.}+n_{estr.}P_{estr.})}{60}}$ (con durate **d** in minuti, **n** e **P**, rispettivamente, numerosità e potenza nominale delle ventole di immissione e di estrazione, cfr. Tabella 15).

Fascia oraria	**Frequenza** [intv./gg]	**Durata** [min/intv.]	[kWh/intv.]	**Consumo** [kWh/gg]
Fascia **1** (dalle 10 alle 17)	10	5	0,185	1,85
Fascia **2** (dalle 18 alle 8)	10	3	0,111	1,11
Ventilazione				**2,95**

Tabella 16 Calcolo consumi di energia elettrica per la ventilazione della serra

	Consumi energia elettrica climatizzatori					
	su base mensile [kWh/mese]			**Medie giornaliere** [kWh/gg]		
	RISC	RAFFR	Totale	RISC	RAFFR	Totale
luglio 2022	0,00E+00	4,27E+03	4,27E+03	0,00E+00	1,38E+02	1,38E+02
giugno 2022	0,00E+00	3,54E+03	3,54E+03	0,00E+00	1,18E+02	1,18E+02
maggio 2022	1,90E+02	2,56E+03	2,75E+03	6,13E+00	8,25E+01	8,87E+01
aprile 2022	3,56E+03	2,14E+03	5,70E+03	1,19E+02	7,14E+01	1,90E+02
marzo 2022	5,59E+03	7,59E+02	6,35E+03	1,80E+02	2,45E+01	2,05E+02
febbraio 2022	5,60E+03	2,46E+02	5,85E+03	2,00E+02	8,79E+00	2,09E+02
gennaio 2022	7,10E+03	1,23E+01	7,11E+03	2,29E+02	3,97E-01	2,29E+02
dicembre 2021	7,48E+03	0,00E+00	7,48E+03	2,41E+02	0,00E+00	2,41E+02
novembre 2021	2,24E+03	3,22E+01	2,27E+03	7,46E+01	1,07E+00	7,56E+01
ottobre 2021	6,08E+02	7,69E+02	1,38E+03	1,96E+01	2,48E+01	4,44E+01
settembre 2021	0,00E+00	1,20E+03	1,20E+03	0,00E+00	4,01E+01	4,01E+01
agosto 2021	0,00E+00	1,71E+03	1,71E+03	0,00E+00	5,50E+01	5,50E+01
Medie periodo di osservazione			**4,13E+03**	8,86E+01	4,72E+01	**1,36E+02**

Tabella 17 Consumo di energia elettrica stimato per riscaldamento (RISC) e raffrescamento (RAFFR) della serra. Dettagli sul metodo di stima in Appendice A § 3.4

In Tabella 18 sono riportati i valori medi calcolati sull'intero periodo di osservazione di 365 giorni.

	Flusso in ingresso	**Quantità**	
⚡	**Energia elettrica** per climatizzazione	1,36E+02	kWh
⚡	Energia elettrica per ventilazione "market for electricity, low voltage – IT" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]	2,95E+00	kWh
	Flusso in uscita	Quantità	
	Fertirrigazione	1	gg

Tabella 18 Dati d'inventario del processo "Climatizzazione e ventilazione della serra" (A-HVAC)

3.2.1.3.5 **Monitoraggio e controlli automatici** (A-MC)

Questo processo include i consumi diretti di energia elettrica necessari per il funzionamento del sistema automatico di monitoraggio e controllo della serra.

Il componente principale del sistema è un computer industriale tipo panel con schermo tattile, montato su una colonnina nel corridoio antistante agli accessi alle linee di produzione. Ad esso sono collegati il modulo di alimentazione AeroFeed, le quattro linee di produzione (moduli AeroSmart), l'impianto HVAC e i termoigrometri all'interno e all'esterno della serra.
Il computer resta acceso 24 ore al giorno, 7 giorni su 7. Assumendo trascurabili i consumi relativi a sensori ed attuatori, i consumi del sistema <E_{MC}> coincidono con quelli del computer, stimati moltiplicando la potenza assorbita (1,5 A × 24 V DC) per 24 h/gg (vedi Tabella 19). Il modello utilizzato come riferimento per i calcoli è l'HT-2150 assemblato dall'azienda italiana ASEM.

	Flusso in ingresso	**Quantità**	
⚡	**Energia elettrica** (computer) "market for electricity, low voltage – IT" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]	8,64E-01	kWh
	Flusso in uscita	**Quantità**	
	Monitoraggio e controllo	**1**	gg

Tabella 19 Dati d'inventario del processo "Monitoraggio e controlli automatici della serra" (A-MC)

3.2.2 **Flussi di riferimento**

In questo paragrafo sono riepilogati i dati e i procedimenti per il **calcolo dei flussi di riferimento**[50].

Per semplificare la modellazione sul software OpenLCA, è stato creato un unico processo di sistema "Coltivazione" (A-A), cui sono collegati, direttamente o indirettamente, tutti gli elementi coinvolti nel sistema di prodotto analizzato e il cui output è 1 kg di lattuga (vedi Figura 38).

I processi P1, F1, HVAC ed MC del sottosistema A sono stati accorpati ad A-A: anziché creare sul software quattro processi distinti e collegare ad A-A i loro output, i loro input sono stati trattati come input di A-A (cfr. Figura 19).
In Tabella 20 sono indicati tutti gli elementi in ingresso di A-A con i rispettivi flussi di riferimento in forma parametrica nella colonna "Quantità".

	Flusso in ingresso		**Quantità**	**Note**
	Serra		$\mathbf{k}(15)$	Output di S0 (vedi Tabella 6)
	Moduli aeroponici | Contenitore		$\mathbf{4\ k}(5)$	Voci d'inventario contrassegnate in Tabella 8 con la sigla "Cont"
	Moduli aeroponici | Telaio di supporto e condotta		$\mathbf{4\ k}(10)$	Voci d'inventario contrassegnate in Tabella 8 con le sigle "TS" e "Tub"
	Piantine		$\mathbf{pzkg}$	Input di A-P1; Voci d'inventario contrassegnate in Tabella 9 con la sigla "P0"
	Vasi a rete		$\mathbf{pzkg}$	Input di A-P1; Voci d'inventario contrassegnate in Tabella 9 con la sigla "V"
	Soluzione nutritiva		$\mathbf{F}$	Output di A-F0 (vedi Tabella 10); Input di A-F1
	Energia elettrica "market for electricity, low voltage – IT" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]	Fertirrigazione	$\mathbf{E_{FI} * t_c / p}$	Input di A-F1
		Riscaldatore sommergibile	$\mathbf{E_{RS} * t_c / p}$	Input di A-F1
		Ventilazione	$\mathbf{E_V * t_c / p}$	Input di A-HVAC
		Climatizzazione	$\mathbf{E_{Clima} * t_c / p}$	Input di A-HVAC
		Monitoraggio e controllo	$\mathbf{E_{MC} * t_c / p}$	Input di A-MC
	Flusso in uscita		**Quantità**	
	Lattuga		1 kg	Output del sistema prodotto

Tabella 20 Dati d'inventario del processo "Coltivazione" (A-A)

I flussi di riferimento indicati per serra e moduli aeroponici tengono conto dell'allocazione dell'infrastruttura sulla produzione rispetto agli anni di vita utile di ciascuno dei componenti coinvolti. In Tabella 21 è richiamata la formula del coefficiente $\mathbf{k}$ introdotto in § 3.2.1.1 e sono riportati i valori di $\mathbf{k}$ per 5, 10 e 15 anni di vita utile.

La massa media di un cespo di lattuga idoneo alla vendita è stata assunta pari a 44,1 g [Agricooltur, rilievi agronomici] (vedi anche § 3.1.1).

[50] Si cita la definizione di **flusso di riferimento** contenuta nelle norme ISO 14040 e ISO 14044: «misura di quanto richiesto in uscita dai processi, in un dato sistema di prodotto, per soddisfare la funzione espressa dall'unità funzionale», nel caso specifico la produzione in aeroponica di 1 kg di lattuga idonea alla vendita. Cfr. UNI 2006 § 3.29; ISO 2006 b § 3.29

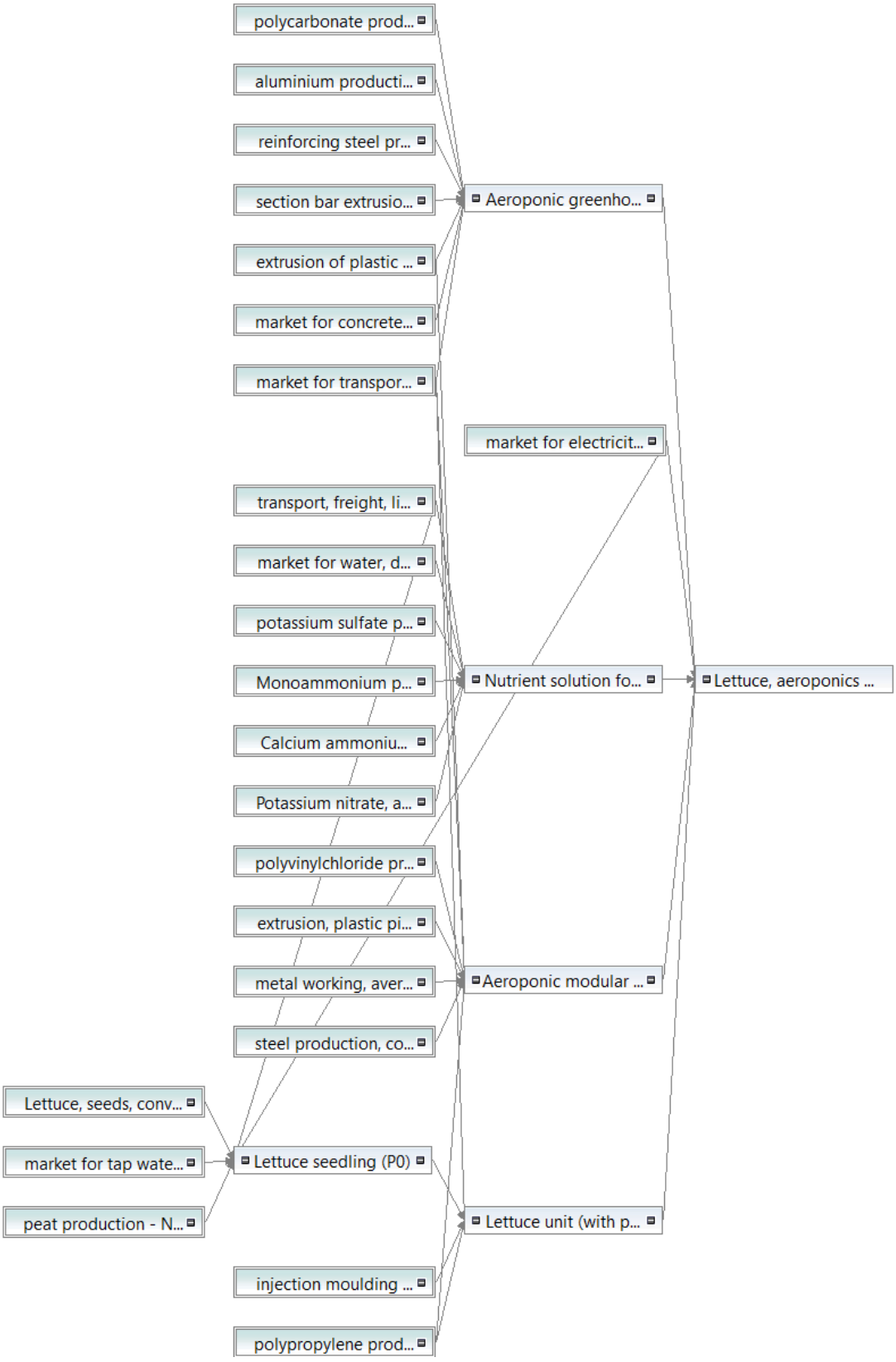


Figura 38 Diagramma ad albero del sistema di prodotto su OpenLCA

In Tabella 21 sono indicate le durate minime, medie e massime del tempo ciclo $\mathbf{t_c}$ su base stagionale, calcolate attingendo ai dati primari forniti dall'azienda.

Stagione	**Inverno**	**Primavera**	**Estate**	**Autunno**	**Anno**
Mesi corrispondenti	dic, gen, feb	mar, apr, mag	giu, lug, ago	set, ott, nov	
Durata minima [gg]	30	n.d.	16	22	16
Durata media $\mathbf{t_c}$ [gg]	**41**	**28**	**21**	**26**	**29**
Durata massima [gg]	52	n.d.	22	36	52

Tabella 21 Durata media del tempo ciclo su base stagionale [Agricooltur, rilievi agronomici]

La Tabella 22 contiene i valori numerici dei parametri indipendenti introdotti nei paragrafi precedenti: la colonna "v. r." contiene le medie calcolate sull'intero periodo di osservazione (365 giorni), usate come **v**alori di **r**iferimento per la valutazione degli impatti; a destra, per i parametri per i quali sono stati calcolati/raccolti dati su base mensile, sono presentati i valori mese per mese.

Simbolo	**v. r.**	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
$\mathbf{m}$ [g]	**44,1**	come v. r.											
$\mathbf{t_c}$ [gg]	**29**	41	41	28	28	28	21	21	21	26	26	26	41
scarti	**5%**	come v. r.											
sol [mL/pianta*gg]	**36,2**	29	29	36	36	36	40	40	40	39	41	36	30
$\mathbf{E_{FI}}$ [kWh/gg]	**2,26**	0,52	0,91	2,17	1,25	3,75	4,00	4,00	3,63	3,42	1,83	1,00	0,61
$\mathbf{E_{RS}}$ [kWh/gg]	**3,18**	9,6	9,6	9,6	-	-	-	-	-	-	-	-	9,6
$\mathbf{E_V}$ [kWh/gg]	**2,95**	come v. r.											
$\mathbf{E_{clima}}$ [kWh/gg]	**136**	229	209	205	190	88,7	118	138	55,0	40,1	44,4	75,6	241
$\mathbf{E_{MC}}$ [kWh/gg]	**,864**	come v. r.											

Tabella 22 Riepilogo parametri con valori di riferimento (v. r.) (dati medi su 365 giorni) e mese per mese

Analogamente, in Tabella 23 sono riportati i valori numerici dei parametri dipendenti, le cui formule sono riepilogate in Tabella 24, insieme ad alcune note sui calcoli.

Simbolo	**v. r.**	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
pzkg [piante]	23,9	come v. r.											
p [kg]	402	"											
F [L]	29,4	23,5	23,5	29,3	29,3	29,3	32,8	32,8	32,8	32,0	33,3	29,3	24,3

Tabella 23 Riepilogo parametri dipendenti con valori di riferimento (v. r.) e mese per mese

Simbolo	**Formula**	**Note**		
pzkg	$\frac{1}{\mathbf{m}\,(1-\mathbf{scarti})}$			
p	$\mathbf{c_p} * (1-\mathbf{scarti}) * \mathbf{m}$	Capacità produttiva $\mathbf{c_p}$= 9600 pz		
$\mathbf{k}(v)$	$\frac{1}{\frac{v*365}{\mathbf{t_c}} * \mathbf{p}}$	Calcolato con $\mathbf{t_c}$ medio (v.r.)		
		$v = 5$	$v = 10$	$v = 15$
		3,95E-05	1,97E-05	1,32E-05
F	$\mathbf{sol} * \mathbf{t_c} * \mathbf{pzkg}$			

Tabella 24 Parametri dipendenti (riepilogo delle formule; valori di $\mathbf{k}$ per 5, 10 e 15 anni di vita utile)

In Tabella 25 sono riportati i valori dei **flussi di riferimento** "medi" (calcolati assegnando ai parametri i valori nelle colonne v.r.) e quelli su base mensile.
I valori massimi sono segnalati in rosso, i valori minimi in verde.

El. in ingresso	**val. medi**	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
Serra	**1,32** E-5	come val. medi											
Mod. aerop. (Cont)	**1,58** E-4	,,											
Mod. aerop. (TS, Tub)	**7,90** E-5	,,											
Piantine	**23,9**	,,											
Vasi a rete	**23,9**	,,											
Soluzione nutritiva	**25,1**	28,3	28,3	24,1	24,1	24,1	20,3	20,3	20,3	24,5	25,5	22,4	29,3
Fertirrig. en. per intv.)	**,163**	,053	,093	,151	,087	,261	,209	,209	,189	,221	,119	,065	,063
Riscaldatore sommergib.	**,229**	,979	,979	,668	0	0	0	0	0	0	0	0	,979
Climatizzaz.	**9,81**	23,3	21,3	14,3	13,2	6,18	6,16	7,21	2,87	2,59	2,87	4,89	24,6
Ventilazione	**,213**	,301	,301	,205	,205	,205	,154	,154	,154	,191	,191	,191	,301
Monitorag. e controllo	**6,23** E-2	8,81 E-2	8,81 E-2	6,02 E-2	6,02 E-2	6,02 E-2	4,51 E-2	4,51 E-2	4,51 E-2	5,59 E-2	5,59 E-2	5,59 E-2	8,81 E-2

Tabella 25 Flussi di riferimento

In fase di Valutazione degli impatti, ai risultati d'impatto calcolati utilizzando i flussi di riferimento medi sono stati affiancati quelli ottenuti utilizzando i flussi di riferimento su base mensile, al fine di rilevare in che misura la variabilità su base mensile (o stagionale) di alcuni dei flussi si rifletta su quella degli impatti associati alla produzione (§ 3.3.1.3).

	Voce d'inventario	Flusso di riferimento (valori medi) [kg/UF]	%
P0	Germinazione	1,54E+00	6,1%
A-F0	Acqua demineralizzata (per soluzione nutritiva)	2,51E+01	93,9%
	Totale sistema di prodotto	26,6 L/UF [51] (1,17 L/pz)	100%

Tabella 26 Flussi di riferimento (valori medi), consumi diretti di acqua

	Voce d'inventario	Flusso di riferimento (valori medi) [kWh/UF]	%
P0	Germinazione	2,12E-02	0,2%
A-F1	Fertirrigazione (-per interventi di)	1,63E-01	1,6%
A-F1	Riscaldatore sommergibile	2,29E-01	2,2%
A-HVAC	Climatizzazione	9,81E+00	93,4%
A-HVAC	Ventilazione	2,13E-01	2,0%
A-MC	Monitoraggio e controllo	6,23E-02	0,6%
	Totale sistema di prodotto	1,05E+01 (4,63 kWh/pz)	100%

Tabella 27 Flussi di riferimento (valori medi), consumi diretti di energia elettrica

A scopo illustrativo in Tabella 26 e Tabella 27 sono riportati rispettivamente i consumi diretti di acqua ed energia elettrica per 1 kg di lattuga (flussi di riferimento delle voci d'inventario collegate ai processi di fornitura di acqua, di acqua demineralizzata e di energia elettrica).

La climatizzazione della serra (consumi stimati per riscaldamento e raffrescamento) incidono mediamente per il 93,4% dei consumi.

[51] **N.B.**: i due flussi sono associati a processi diversi (vedi Tabella 9 e Tabella 10). La somma dei due valori è riportata solo per dare una cifra indicativa del consumo diretto di acqua nel foreground system (in fase di germinazione, nella preparazione di soluzione nutritiva e quindi per la fertirrigazione delle piante messe a dimora sui moduli aeroponici).

3.3 **Valutazione degli impatti**

In questa sezione sono presentati i risultati della **valutazione degli impatti del ciclo di vita** per le 8 categorie d'impatto selezionate per lo studio[52].

In § 3.3.1 e nei relativi sottoparagrafi tabelle e grafici accompagnano l'interpretazione dei risultati dello studio. Salvo diversa indicazione, gli impatti per ciascuna categoria sono riferiti all'unità funzionale dello studio (1 kg di lattuga idonea alla vendita).

3.3.0.1 **Criteri di raggruppamento dei contributi ai risultati d'impatto**

Per mostrare in che misura i processi che compongono il sistema di prodotto contribuiscono agli impatti della produzione (quantificati dai risultati d'impatto), i contributi riconducibili ai loro flussi sono stati raggruppati in classi secondo due criteri ("per funzione" e "per tipo").

3.3.0.1.1 **Raggruppamento "per funzione"**

Il primo criterio ("per funzione") divide i contributi in base alla funzione dei processi che li hanno generati, in 8 classi a loro volta distribuite in 2 superclassi ("Infrastruttura di produzione" e "Coltivazione aeroponica"), riprendendo la suddivisione del sistema di prodotto descritta in Tabella 4, con le seguenti differenze:

i) è stato ritenuto opportuno conteggiare separatamente i contributi imputabili al processo di germinazione (P0) e quelli dovuti a produzione e trasporto dei vasi a rete (V) (vedi anche Tabella 9);

ii) alla classe "Fertirrigazione" sono stati attribuiti solo i contributi dovuti ai consumi diretti di energia elettrica per il funzionamento di pompe e riscaldatori sommergibili, essendo i contributi dovuti al consumo di soluzione nutritiva (quindi di acqua demineralizzata e fertilizzanti) già conteggiati nella classe "Soluzione nutritiva".

3.3.0.1.2 **Raggruppamento "per tipo"**

Il secondo criterio ("per tipo") raggruppa i contributi rispetto al tipo di processo che li ha originati in 4 classi, i cui nomi e simboli si rifanno alla classificazione dei flussi di prodotto dal background system in § 3.2.1.0.1: "Processi di produzione e lavorazione di materie prime e componenti" (🏭), "Processi di trasporto" (🚚), "Consumi diretti di acqua" (💧) e "Consumi diretti di energia elettrica" (⚡).
Tutte le risorse ed emissioni (flussi da e verso l'ecosfera) riferibili al sistema di prodotto, cui corrispondono uno o più contributi ai risultati d'impatto nelle 8 categorie analizzate, sono infatti riconducibili a flussi di prodotto output del background system, usati come input nei processi del foreground system; l'unica eccezione è rappresentata dal flusso elementare "Occupazione di suolo" nel sottosistema serra (S0) per cui è stata creata una quinta classe "Uso diretto del suolo" (🌲).
I valori indicati in tabelle e grafici corrispondono esattamente alla somma dei contributi originati dai flussi che nelle tabelle dati d'inventario nei sottoparagrafi di § 3.2.1 sono state contrassegnate con i rispettivi simboli.

[52] Per una legenda delle sigle usate in grafici e tabelle, vedi Tabella 3 in § 3.1

3.3.1 **Risultati d'impatto**

In Tabella 28 sono riportati i risultati d'impatto del sistema di prodotto rispetto a 1 kg di lattuga idonea alla vendita (unità funzionale dello studio), calcolati per le 8 categorie d'impatto trattate nello studio.

Categoria d'impatto intermedio	Risultato d'impatto[53]	Unità di riferimento
CC	5,758**0000**	kg CO_2 eq.
Eu AD	0,001941**0**	kg P eq.
Eu M	0,0001681	kg N eq.
AT	0,036480**0**	kg SO_2 eq.
Acq	0,132200**0**	m^3 acqua
Suo	0,236800**0**	m^2 × anno coltivati eq.
R Fo	1,839**0000**	kg petrolio eq.
R Mi	0,025930**0**	kg Cu eq.

Tabella 28 Risultati d'impatto del sistema di prodotto rispetto all'UF

I flussi di riferimento, cui corrispondono questi risultati, sono stati determinati assegnando ai parametri in Tabella 20 i valori medi calcolati sull'intero periodo di osservazione di 365 giorni, riportati in Tabella 22 e Tabella 23 nella colonna "v. r." (valori di riferimento).

Il calcolo è stato ripetuto, facendo variare i flussi di riferimento in accordo con le differenze rilevate su alcuni dei dati di produzione (tempo ciclo, consumi di soluzione nutritiva e di energia elettrica), in modo tale da poter osservare la variabilità su base mensile dei risultati d'impatto prodotta da tali differenze. Grafici e tabelle sono riportati in § 3.3.1.3.

In § 3.3.1.1 e § 3.3.1.2 i contributi dei singoli flussi sono raggruppati in classi secondo i criteri definiti in § 3.3.0.1, al fine di mostrare in che misura i diversi processi di cui consiste il sistema di prodotto partecipano agli impatti della produzione.

[53] Risultati calcolati con OpenLCA arrotondati (quattro cifre significative). Gli zeri in grigio non sono significativi. I risultati d'impatto sono riportati in notazione scientifica in Tabella 29 e Tabella 30.

3.3.1.1 Raggruppamento dei risultati "per funzione"

I contributi dei flussi ai risultati d'impatto sono stati raggruppati in Tabella 29 secondo la classificazione "per funzione" descritta in § 3.3.0.1.1.
I valori massimi per categoria sono segnalati in rosso. I contributi percentuali delle classi sui risultati d'impatto di ciascuna categoria sono rappresentati nel grafico in Figura 39.

	CC kg CO_2 eq. (GWP100)	**Eu AD** kg P eq.	**Eu M** kg N eq.	**AT** kg SO_2 eq.	**Acq** m^3 acqua	**Suo** m^2 a coltivati eq.	**R Fo** kg petrolio eq.	**R Mi** kg Cu eq.
Serra	6,78E-01	2,22E-04	1,84E-05	2,35E-03	1,46E-02	5,91E-02	1,39E-01	7,80E-03
Moduli aerop.	2,43E-01	1,12E-04	1,28E-05	7,18E-04	2,39E-03	2,61E-03	1,13E-01	5,46E-03
Infrastruttura di produzione	9,21E-01	3,34E-04	3,12E-05	3,07E-03	1,70E-02	6,17E-02	2,52E-01	1,33E-02
Germinazione piantine	4,47E-02	1,18E-05	5,85E-06	2,03E-04	3,59E-03	1,64E-02	1,39E-01	4,07E-04
Vasi a rete	3,75E-01	9,19E-05	8,06E-06	1,10E-03	3,89E-03	9,65E-03	2,28E-01	2,96E-04
Soluzione nutritiva	4,56E-02	2,52E-05	2,93E-06	2,18E-04	2,63E-02	9,19E-04	1,34E-02	5,19E-03
Fertirrigazione (solo energ. el.)	1,64E-01	5,49E-05	4,50E-06	1,19E-03	3,05E-03	5,55E-03	4,52E-02	2,55E-04
Controllo climatico	4,18E+00	1,40E-03	1,15E-04	3,05E-02	7,78E-02	1,42E-01	1,15E+00	6,51E-03
Monitoraggio e controlli autom.	2,60E-02	8,72E-06	7,14E-07	1,89E-04	4,84E-04	8,81E-04	7,17E-03	4,05E-05
Coltivazione aeroponica	4,84E+00	1,60E-03	1,37E-04	3,34E-02	1,15E-01	1,75E-01	1,59E+00	1,27E-02
Totale	**5,76E+00**	**1,93E-03**	**1,68E-04**	**3,64E-02**	**1,32E-01**	**2,37E-01**	**1,84E+00**	**2,60E-02**

Tabella 29 Risultati d'impatto (flussi raggruppati "per funzione")

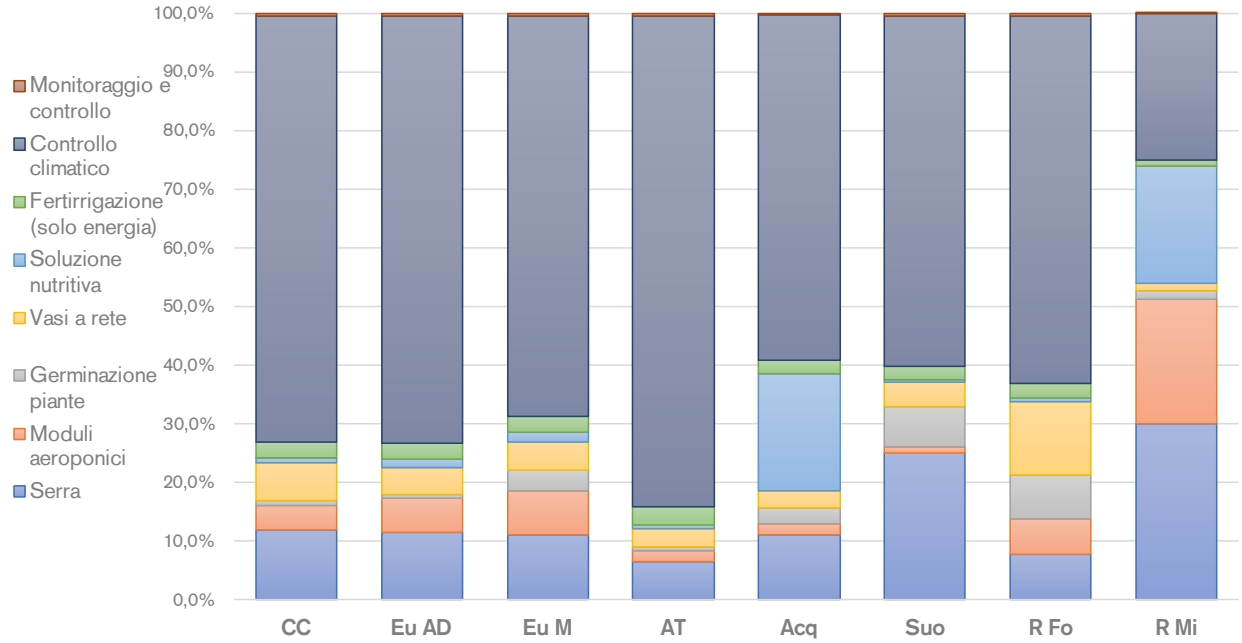


Figura 39 Contributi percentuali delle classi (raggruppamento "per funzione") ai risultati d'impatto

Il processo più impattante è il *Controllo climatico della serra*, cui corrispondono i contributi maggiori per tutte le categorie d'impatto studiate (84% AT; 73% CC ed Eu AD; 68% Eu M; 63% R Fo; 60% Suo; 59% Acq), eccetto che per lo sfruttamento di risorse minerarie (R Mi), cui contribuisce, comunque, per un quarto del totale, secondo solo al processo di costruzione della serra, che, con 7,8 g di rame equivalente per kg di produzione utile, rappresenta il contributo più grande (30%) in tale categoria.

I **flussi di infrastruttura** (serra e moduli aeroponici) incidono per poco più della metà (51%) sulla categoria scarsità delle risorse minerarie, per il 26% sull'uso di suolo e per frazioni comprese tra l'8% (AT) e il 19% (Eu M) nelle restanti categorie.

Al netto di climatizzazione e infrastruttura di produzione, i vasi a rete (in plastica usa e getta) costituiscono una delle voci più impattanti: da soli sono responsabili del 12,4% dello sfruttamento di risorse fossili, del 6,5% delle emissioni climalteranti (circa 0,38 kg di CO2 equivalente); marginali rispetto a R Mi (1,1%), nelle restanti categorie contribuiscono con quote comprese tra il 3% (Acq, AT) e il 4,8% (Eu AD, Eu M).

Il **potenziale di riscaldamento globale a 100 anni** (GWP100) *cradle-to-gate* calcolato per 1 kg di lattuga idonea alla vendita è di 5,76 kg di CO_2 equivalente, di questi ben 4,09 sono da ricondurre al consumo di energia elettrica per la climatizzazione della serra.
È possibile notare come la produzione dei *Vasi a rete* incide in misura maggiore rispetto alla produzione dei fertilizzanti, processo notoriamente *carbon intensive*, qui incluso nella classe *Soluzione nutritiva*: grazie alla diretta esposizione delle radici alla sostanza nutritizia e al ricircolo della soluzione, l'uso di fertilizzanti risulta piuttosto contenuto, mentre i vasi a rete sono utilizzati una volta sola.

È interessante notare come i consumi d'acqua diretti[54] e indiretti riconducibili alla preparazione e alla somministrazione della soluzione nutritiva (leggi: classe *Soluzione nutritiva*) (26,3 L per kg di lattuga) rappresentino solo un quinto del totale, mentre il consumo d'acqua per fornire l'energia elettrica necessaria per il controllo climatico della serra, sia quasi tre volte più grande (77,8 L/UF).
Un discorso analogo si può fare per l'uso di suolo (Suo): il 60% degli 0,237 m^2 a coltivati equivalenti per kg di lattuga calcolati è dovuto ai consumi di energia elettrica dell'impianto HVAC, mentre solo il 25% dipende dal sottosistema *Serra* (cui è stato assegnato l'impatto dei 368 m^2 di suolo occupati dalla serra[55]).

I consumi di energia elettrica per *Fertirrigazione* e *Monitoraggio e controlli automatici* complessivamente incidono per meno del 4% dei risultati in tutte le categorie d'impatto.

Il processo di *Germinazione* ha un peso relativamente piccolo, i contributi più rilevanti si osservano nelle categorie R Fo (7,6%) e Suo (6,9%): spiegati rispettivamente dall'uso di torba (risorsa fossile) come substrato per la germinazione e dalla produzione delle sementi, che, nonostante il loro peso modestissimo, incidono per circa il 6,2% di Suo.

Monitoraggio e controlli automatici, rappresentano i contributi più piccoli in tutte le categorie d'impatto (non superiori allo 0,5%).

[54] 25,1 L/UF di acqua demineralizzata (cfr. Tabella 26)
[55] L'impatto corrispondente al flusso elementare "Occupazione di suolo" (vedi Tabella 6 per i dati d'inventario di S0, Tabella 20 per il calcolo dei flussi di riferimento) è di 5,30 E-2 m^2 a coltivati equivalenti per kg di lattuga

3.3.1.2 **Raggruppamento dei risultati "per tipo"**

In Tabella 30 i risultati sono raggruppati riclassificando i contributi dei flussi secondo il criterio "per tipo" illustrato in § 4.3.0.1. I valori massimi per categoria sono segnalati in rosso.
In Figura 40, per ciascuna categoria, sono mostrati i contributi delle 5 classi come percentuale del risultato d'impatto totale.

	CC kg CO_2 eq. (GWP100)	Eu AD kg P eq.	Eu M kg N eq.	AT kg SO_2 eq.	Acq m^3 acqua	Suo m^2 a coltivati eq.	R Fo kg petrolio eq.	R Mi kg Cu eq.
🏭	1,33E+00	4,36E-04	4,57E-05	4,33E-03	2,31E-02	3,38E-02	6,17E-01	1,89E-02
🚚	2,16E-02	4,51E-06	3,74E-07	7,44E-05	8,07E-05	8,32E-04	7,31E-03	7,55E-05
💧	2,37E-02	1,90E-05	1,65E-06	1,18E-04	2,75E-02	7,14E-04	6,36E-03	1,64E-04
⚡	4,38E+00	1,48E-03	1,20E-04	3,19E-02	8,15E-02	1,48E-01	1,21E+00	6,79E-03
🌳	-	-	-	-	-	5,30E-02	-	-
Tot.	**5,76E+00**	**1,94E-03**	**1,68E-04**	**3,65E-02**	**1,32E-01**	**2,37E-01**	**1,84E+00**	**2,59E-02**
al netto dei ⚡	1,38E+00	4,60E-04	4,78E-05	4,53E-03	5,07E-02	8,83E-02	6,30E-01	1,91E-02

Tabella 30 Risultati d'impatto (flussi raggruppati "per tipo")

	CC	Eu AD	Eu M	AT	Acq	Suo	R Fo	R Mi
🏭 Produzione componenti e materie prime	23%	22%	27%	12%	17%	14%	34%	73%
🚚 Processi di trasporto	0,37%	0,23%	0,22%	0,20%	0,06%	0,35%	0,40%	0,29%
💧 Consumi diretti di acqua	0,41%	0,98%	0,98%	0,32%	20,81%	0,30%	0,35%	0,63%
⚡ Consumi diretti di energia elettrica	76%	76%	72%	88%	62%	63%	66%	26%
🌳 Uso diretto del suolo						22%		

Figura 40 Contributo percentuale delle classi (raggruppamento "per tipo") ai risultati d'impatto

I consumi diretti di energia elettrica (⚡) costituiscono la voce più pesante sul bilancio ambientale del sistema analizzato.
Ad essi è imputabile il contributo maggiore ai risultati d'impatto in sette delle otto categorie d'impatto selezionate per lo studio:

- l'88% del potenziale di acidificazione terrestre;
- più di tre quarti del GWP a 100 anni (4,38 kg di CO_2 equivalente) e del potenziale di eutrofizzazione delle acque dolci calcolati;
- almeno il 62% del risultato nelle restanti categorie, eccetto R Mi.

Nella categoria Scarsità delle risorse minerarie (R Mi), detengono il primato i processi di produzione delle materie prime e dei componenti (🏭) (73% del totale); tuttavia, considerando, separatamente i contributi di ciascun processo coinvolto nel sistema di prodotto, anche per la categoria R Mi la voce più impattante è ancora il processo di fornitura di energia elettrica (26% dei 25,9 g di rame equivalente per UF complessivamente calcolati).
Il contributo percentuale dei flussi associati ai processi di produzione di materie e prime e componenti ai risultati d'impatto nelle altre categorie varia: dal 14% in Suo al 34% in R Fo.
I consumi diretti di acqua (💧) rappresentano poco più di un quinto dei consumi di acqua calcolati (Acq); nelle altre categorie d'impatto una frazione trascurabile (contributi inferiori all'1%).
I processi di trasporto (🚚) incidono per meno dello 0,5% dei risultati in tutte le categorie d'impatto. Anche ricalcolando il loro contributo come frazione degli impatti complessivamente generati dai processi di produzione, trasformazione e trasporto di materie prime e componenti, essi incidono per massimo il 2% in tutte le categorie d'impatto. A questo proposito, si ricorda che tutti i fornitori di primo livello, per cui è stata indicata la distanza dalla serra, sono tutti nel raggio di circa 30 km; per gli altri (fornitori di polipropilene e polivinilcloruro) si è assunta una distanza di 100 km (cfr. Tabella 42 in Appendice A).
È interessante notare come l'uso diretto di suolo (🌳) incida solo per il 22% del totale (Suo).

3.3.1.3 **Risultati d'impatto mese per mese**

I valori massimi per categoria sono segnalati in rosso, i valori minimi in verde.

	CC kg CO_2 eq. (GWP100)	Eu AD kg P eq.	Eu M kg N eq.	AT kg SO_2 eq.	Acq m^3 acqua	Suo m^2 a coltivati eq.	R Fo kg petrolio eq.	R Mi kg Cu eq.
gen	1,17E+01	3,96E-03	3,32E-04	8,00E-02	2,47E-01	4,39E-01	3,49E+00	3,59E-02
feb	1,09E+01	3,68E-03	3,09E-04	7,39E-02	2,31E-01	4,11E-01	3,26E+00	3,46E-02
mar	7,79E+00	2,63E-03	2,24E-04	5,13E-02	1,69E-01	3,06E-01	2,40E+00	2,89E-02
apr	7,05E+00	2,38E-03	2,04E-04	4,59E-02	1,55E-01	2,81E-01	2,20E+00	2,77E-02
mag	4,18E+00	1,41E-03	1,25E-04	2,50E-02	1,02E-01	1,83E-01	1,40E+00	2,33E-02
giu	4,12E+00	1,39E-03	1,23E-04	2,45E-02	9,68E-02	1,81E-01	1,39E+00	2,24E-02
lug	4,55E+00	1,53E-03	1,35E-04	2,77E-02	1,05E-01	1,96E-01	1,51E+00	2,31E-02
ago	2,74E+00	9,18E-04	8,48E-05	1,45E-02	7,11E-02	1,35E-01	1,01E+00	2,03E-02
set	2,66E+00	8,94E-04	8,30E-05	1,39E-02	7,40E-02	1,32E-01	9,85E-01	2,10E-02
ott	2,74E+00	9,20E-04	8,51E-05	1,44E-02	7,64E-02	1,34E-01	1,01E+00	2,13E-02
nov	3,55E+00	1,19E-03	1,07E-04	2,04E-02	8,84E-02	1,62E-01	1,23E+00	2,20E-02
dic	1,22E+01	4,14E-03	3,47E-04	8,38E-02	2,57E-01	4,56E-01	3,63E+00	3,69E-02
media anno	***5,76E+00***	***1,94E-03***	***1,68E-04***	***3,65E-02***	***1,32E-01***	***2,37E-01***	***1,84E+00***	***2,59E-02***

Tabella 31 Risultati d'impatto su base mensile e media anno

	CC	Eu AD	Eu M	AT	Acq	Suo	R Fo	R Mi
gen	1,17E+01	3,96E-03	3,32E-04	8,00E-02	2,47E-01	4,39E-01	3,49E+00	3,59E-02
feb	1,09E+01	3,68E-03	3,09E-04	7,39E-02	2,31E-01	4,11E-01	3,26E+00	3,46E-02
mar	7,79E+00	2,63E-03	2,24E-04	5,13E-02	1,69E-01	3,06E-01	2,40E+00	2,89E-02
apr	7,05E+00	2,38E-03	2,04E-04	4,59E-02	1,55E-01	2,81E-01	2,20E+00	2,77E-02
mag	4,18E+00	1,41E-03	1,25E-04	2,50E-02	1,02E-01	1,83E-01	1,40E+00	2,33E-02
giu	4,12E+00	1,39E-03	1,23E-04	2,45E-02	9,68E-02	1,81E-01	1,39E+00	2,24E-02
lug	4,55E+00	1,53E-03	1,35E-04	2,77E-02	1,05E-01	1,96E-01	1,51E+00	2,31E-02
ago	2,74E+00	9,18E-04	8,48E-05	1,45E-02	7,11E-02	1,35E-01	1,01E+00	2,03E-02
set	2,66E+00	8,94E-04	8,30E-05	1,39E-02	7,40E-02	1,32E-01	9,85E-01	2,10E-02
ott	2,74E+00	9,20E-04	8,51E-05	1,44E-02	7,64E-02	1,34E-01	1,01E+00	2,13E-02
nov	3,55E+00	1,19E-03	1,07E-04	2,04E-02	8,84E-02	1,62E-01	1,23E+00	2,20E-02
dic	1,22E+01	4,14E-03	3,47E-04	8,38E-02	2,57E-01	4,56E-01	3,63E+00	3,69E-02
media anno	*5,76E+00*	*1,94E-03*	*1,68E-04*	*3,65E-02*	*1,32E-01*	*2,37E-01*	*1,84E+00*	*2,59E-02*

Figura 41 Andamento dei risultato d'impatto su base mensile e media anno

Tabelle e grafici illustrano come i risultati d'impatto varino notevolmente durante l'anno.
Gran parte di questa variabilità è spiegata dai consumi di energia per riscaldamento e raffrescamento della serra (ciò appare evidente confrontando Tabella 17 e Figura 41).
Il rapporto massimo tra ampiezza dell'intervallo di variabilità e media sull'anno (adottato come indicatore di dispersione) si ha per la categoria AT (1,9), seguono CC ed Eu AD (1,7), Eu M (1,6), Suo, Acq ed R Fo (1,4), la variabilità più piccola – rapporto range su media: 0,6 – si osserva per la categoria R Mi (nella quale, come visto in § 3.3.1.2, il peso dei consumi di energia elettrica è meno accentuato).

Durante la stagione invernale la considerevole quantità di energia richiesta dai climatizzatori (per mantenere le condizioni di temperatura e umidità relativa all'interno della serra entro valori compatibili con la crescita delle piante) e il concomitante allungarsi della durata media dei cicli colturali (legato a condizioni di illuminazione naturale meno favorevoli e temperature tendenzialmente più basse) determinano risultati d'impatto pari a circa il doppio di quelli calcolati sui valori medi – in tutte le categorie analizzate.

Il mese più critico è dicembre:

- GWP100: 12,2 kg di CO2 equivalente per UF;
- potenziale di eutrofizzazione delle acque dolci: 4,14 grammi di fosforo eq. per UF;
- pot. di eutrofizzazione marina: 347 milligrammi di azoto eq. per UF;
- pot. di acidificazione terrestre: 83,8 grammi di anidride solforosa eq. per UF;
- consumo d'acqua: 257 L per UF;
- uso di suolo equivalente: 0,456 m^2 anno coltivati per UF;
- 3,63 kg di petrolio eq. per UF (categoria R Fo);
- 36,9 grammi di rame eq. per UF (categoria R Mi).

In estate, è interessante notare come durate dei cicli colturali mediamente più brevi, attenuino l'incidenza dei consumi di energia elettrica e di soluzione nutritiva (e quindi di acqua) rispetto all'unità funzionale[56], nonostante l'esigenza di raffrescare la serra e il maggior fabbisogno giornaliero d'acqua delle piante (cfr. Tabella 13).

Nel mese di agosto si ottengono i risultati migliori nelle categorie d'impatto Consumo di acqua (Acq) (71,1 L/UF) e Scarsità delle risorse minerarie (R Mi) (20,3 grammi di rame eq. per UF).

A settembre, l'effetto combinato di consumi di energia elettrica[57] e durata media dei cicli colturali entrambi sotto la media, determina i risultati d'impatto più bassi per tutte le altre categorie:

- GWP100: 2,66 kg di CO2 equivalente per UF;
- potenziale di eutrofizzazione delle acque dolci: 0,894 grammi di fosforo eq. per UF;
- pot. di eutrofizzazione marina: 83 milligrammi di azoto eq. per UF;
- pot. di acidificazione terrestre: 13,9 grammi di anidride solforosa eq. per UF;
- uso di suolo equivalente: 0,132 m^2 anno coltivati per UF;
- 0,985 kg di petrolio eq. per UF (categoria R Fo).

I risultati mese per mese sono basati su dati riferiti al periodo di osservazione agosto 2021 – luglio 2022[58].

[56] vedi anche Tabella 25 in cui sono riportati i flussi di riferimento delle relative voci d'inventario mese per mese
[57] Al mese di settembre corrispondono i consumi di energia per la climatizzazione più bassi (cfr. Tabella 17)
[58] Fanno eccezione i dati sugli interventi di fertirrigazione per maggio, giugno e luglio che invece si riferiscono ai rispettivi mesi del 2021 (cfr. Tabella 55 in Appendice A)

3.4 **Confronto dei risultati con studi analoghi**

Su analisi del ciclo di vita di coltivazioni di lattuga esistono un discreto numero di pubblicazioni scientifiche. Occorre, tuttavia, considerare che ogni analisi è caratterizzata da scelte specifiche (p.e., su estensione dei confini del sistema, copertura temporale dei dati, ambito geografico, categorie d'impatto da trattare, unità funzionali, metodi di valutazione degli impatti, ecc.) le quali non sempre rendono possibile un confronto diretto dei risultati.

Per scrivere questo paragrafo, tra i *paper* consultati, sono stati selezionati:

- lo studio di Barla, Salachas & Abeliotis 2020 sulle emissioni di gas serra di una coltivazione aeroponica in fascia climatica mediterranea (§ 3.4.1);
- altre due analisi del ciclo di vita, condotte negli anni 2010, su colture realizzate adoperando diverse pratiche agrarie in siti caratterizzati da condizioni climatiche relativamente simili a quelle del Torinese (§ 3.4.2):
  - Bologna [Sanyé-Mengual et al. 2015];
  - Albenga, Liguria [Bartzas, Zaharaki & Komnitsas 2015].

In Tabella 32 sono citati i valori associati agli ecoprofili delle banche dati ecoInvent e Agribalyse, e i risultati dell'esteso studio comparativo di Casey et al. 2022, in cui sono valutate le impronte ecologiche *cradle-to-gate* di diverse supply chain di lattuga da agricoltura idroponica in ambiente controllato e coltivazioni in pieno campo.

	CC kg CO_2 eq.	**Eu AD** kg P eq.	**Eu M** kg N eq.	**AT** kg SO_2 eq.	**Acq** m^3 acqua	**Suo** m^2 a coltivati eq.	**R Fo** kg petrolio eq.	**R Mi** kg Cu eq.
Media mercato globale (ecoInvent 3.6) [ecoInvent c; Casey et al. 2022]	**0,24** ÷ **3,63**	dati non disponibili						
Media mercato globale – produzione in serra riscaldata (ecoInvent 3.6) [Casey et al. 2022]	fino a **6,1**	,,						
Idroponica (in ambiente controllato) [Casey et al. 2022]	**0,48** eolico *on grid* ÷ **17,8** mix energ. Sudafrica	**3,1E-04** eolico *on grid* ÷ **1,3E-02** mix energ. Sudafrica	**5,1E-04** eolico *on grid* ÷ **3,3E-02** mix energ. Sudafrica	utilizzati metodi di valutazione degli impatti diversi, risultati espressi in unità di riferimento diverse (dati non idonei per un confronto)				
Pieno campo [Casey et al. 2022]	**0,15** Gran Bretagna ÷ **17,8** Deserto, Stati Uniti	**2,6E-05** Gran Bretagna ÷ **2,9E-03** Deserto, Stati Uniti	**3,3E-04** Gran Bretagna ÷ **1,7E-02** Stati Uniti	,,				
Francia – Coltivazione tradizionale[59] (Agribalyse 3.0)	0,172 (0,234)	3,09E-05 (1,95E-05)	1,20E-04 (1,90E-04)	8,10E-04 (8,70E-04)	4,06E-02 (4,73E-02)	9,82E-02 (9,76E-02)	4,48E-02 (3,64E-02)	3,08E-03 (1,91E-03)
Aeroponica (serra climatizz.) Questa tesi	**2,66** (set) ÷ **12,2** (dic)	8,94E-04 (set) ÷ 4,14E-03 (dic)	8,30E-05 (set) ÷ 3,47E-04 (dic)	1,39E-02 (set) ÷ 8,38E-02 (dic)	7,11E-02 (ago) ÷ 2,57E-01 (dic)	1,32E-01 (set) ÷ 4,56E-01 (dic)	9,85E-01 (set) ÷ 3,63E+00 (dic)	2,03E-02 (ago) ÷ 3,69E-02 (dic)

Tabella 32 Confronto dei risultati con quelli di altri studi LCA (UF: 1 kg di lattuga)

[59] "Lettuce, conventional, national average, at farm gate/kg – FR" [Agribalyse 2020]; in parentesi riportati valori corrispondenti a coltivazione in campo aperto ("Lettuce, open field, conventional, at farm gate – FR") [*ivi*]

3.4.1 **Coltivazione aeroponica in fascia climatica mediterranea**

Lo studio di Barla, Salachas & Abeliotis 2020 consiste in un'analisi del ciclo di vita effettuata allo scopo di valutare le emissioni di gas serra *cradle-to-gate* di una coltivazione aeroponica di lattuga in una serra automatizzata ad Amaliada nella regione del Peloponneso (Grecia occidentale) (fascia climatica mediterranea).

Nel sistema descritto, le piante di lattuga compiono il loro ciclo vegetativo su bancali in polistirene espanso (EPS) sostenuti da telai in acciaio inossidabile. I moduli di coltivazione appaiono relativamente simili ai sistemi a canaletta descritti in § 3.2.1.2. I coperchi (anch'essi in EPS) presentano dei fori nei quali sono alloggiati i vasi in plastica contenenti le piante, radicate in dischi in neoprene. Il materiale di copertura della serra è policarbonato, la struttura portante è in ghisa. L'eliofania e le condizioni climatiche del luogo non rendono necessario ricorrere né all'illuminazione artificiale né alla climatizzazione della serra; tuttavia, un sistema di controllo automatico regola la temperatura della camera di crescita per ottimizzare lo sviluppo delle piante, monitorando la temperatura della soluzione nutritiva nebulizzata sulle radici, provvedendo a riscaldarla o raffreddarla a seconda delle necessità[60].

Sono stati inclusi nei confini del sistema: i materiali che costituiscono serra e moduli di coltivazione; i fertilizzanti; l'acido nitrico e l'acqua ossigenata adoperati per la correzione del pH e per la disinfezione della soluzione nutritiva; i consumi diretti di energia elettrica.

In Tabella 33 sono riportati i potenziali di riscaldamento globale a 100 anni[61] per 1 kg di lattuga, calcolati su tre diversi periodi dell'anno (inverno, primavera e autunno-inverno); i risultati sono messi a confronto con le medie stagionali corrispondenti[62] del sistema analizzato in questa tesi.

Studio	**Luogo e periodo** (durata ciclo colturale in parentesi)	**CC** kg CO_2 eq. (GWP100)
Barla, Salachas & Abeliotis 2020	**Amaliada**, Grecia	
	inverno (36 gg)	3,55E+00
	primavera (43 gg)	2,78E+00
	autunno-inverno (42 gg)	2,17E+00
Questa tesi	**Carignano**, TO	
	inverno (dic 2021 – feb 2022) (ciclo medio 41 gg)	1,16E+01
	primavera (mar – mag 2022) (ciclo medio 28 gg)	6,33E+00
	autunno (set – nov 2021) (ciclo medio 26 gg)	2,98E+00

Tabella 33 Confronto dei risultati d'impatto con studio di Barla, Salachas & Abeliotis 2020

È opportuno segnalare che la massa media a fine ciclo dei cespi di lattuga prodotti nella serra greca varia tra i 250 g (in inverno) e i 315 g (in primavera), valori circa sette volte più grandi della massa assunta per un'unità di prodotto nello studio presentato in questa tesi. Questa notevole differenza potrebbe essere spiegata da regimi di fertirrigazione diversi, dalla composizione della soluzione nutritiva, dal tipo di varietà colturali allevate, così come dalle condizioni microclimatiche dell'ambiente di coltivazione.
Qualunque sia la causa, questa differenza così marcata fa sorgere qualche dubbio sull'effettiva "confrontabilità" delle prestazioni ecologiche dei due sistemi. Un altro "elemento di rumore" sono i diversi mix di fonti primarie per la produzione di energia elettrica di Grecia e Italia[63].

[60] Brevetto GR 1008102B (2014) [Salachas 2012]
[61] Il metodo di valutazione degli impatti utilizzato in Barla, Salachas & Abeliotis 2020 è CML 2 Baseline 2000
[62] medie pesate rispetto al numero di giorni del mese dei GWP100 su base mensile in § 3.3.1.3.
[63] Ai mix dei due Paesi corrispondono differenti impronte di carbonio

A questo proposito, si è ritenuto più utile confrontare i consumi di energia elettrica (⚡) (espressi in kWh/ciclo) e i contributi, in termini assoluti, di materiali e prodotti impiegati (🏭), riferendoli a 1 kg e a un cespo di lattuga.

Studio	**Periodo**	⚡ kWh/ciclo	🏭 kg CO_2 eq. / kg lattuga (/ cespo)
Barla, Salachas & Abeliotis 2020	**Amaliada**, Grecia	nota 64 ▼	nota 65 ▼
	inverno (36 gg)	344	0,268 (0,067)
	primavera (43 gg)	506	0,226 (0,071)
	autunno-inverno (42 gg)	483	0,195 (0,057)
Questa tesi	**Carignano**, TO	nota 66 ▼	
	inverno (dic 2021 – feb 2022) (ciclo medio 41 gg)	9858 al netto dei climatizzatori: 578	media anno 1,33 (0,059)
	primavera (mar – mag 2022) (ciclo medio 28 gg)	4778 al netto dei climatizzatori: 388	
	autunno (set – nov 2021) (ciclo medio 26 gg)	1541 al netto dei climatizzatori: 153	

Tabella 34 Confronto consumi di energia elettrica e GWP100 con elaborazioni dati da Barla, Salachas & Abeliotis 2020

Osservando i risultati così rielaborati, le differenze tra i due sistemi si appianano: il contributo di materiali e prodotti vari riferiti a un'unità di produzione sono sostanzialmente simili; le differenze più importanti in termini di consumi di energia elettrica si devono all'uso dei climatizzatori, piuttosto che alle caratteristiche dei prodotti e relativi sistemi di produzione.

[64] Valori calcolati moltiplicando consumi di energia elettrica in kWh/kg per raccolto a fine ciclo "Yield" (cfr. Tabelle 1 e 2 in Barla, Salachas & Abeliotis 2020)

[65] Valori calcolati sottraendo ai GWP100 totali "Total" il contributo dei consumi di energia elettrica "Electricity" (cfr. Tabella 3 in Barla, Salachas & Abeliotis 2020); per ottenere rispettivi kg CO_2 eq. su cespo di lattuga, i valori precedentemente calcolati sono stati moltiplicati per Yield e divisi per il numero di piante "Number of plants" (cfr. *ivi*, Tabella 1).

[66] medie pesate rispetto al numero di giorni del mese delle somme dei parametri $\mathbf{E}_{FI}$, $\mathbf{E}_{RS}$, $\mathbf{E}_{V}$, $\mathbf{E}_{clima}$ ed $\mathbf{E}_{MC}$ su base mensile moltiplicate per $\mathbf{t}_c$ della stagione (cfr. Tabella 22). I consumi di energia del processo di germinazione sono trascurabili e pertanto non inclusi nel calcolo.

3.4.2 **Altri metodi di coltivazione**

3.4.2.1 **Bologna**

Nello studio di Sanyé-Mengual et al. 2015 allo scopo di valutare l'impatto ambientale e dei costi di un progetto di agricoltura urbana sul tetto di un complesso di edilizia popolare a Bologna, sono messi a confronto GWP, l'indicatore *Water Scarcity*[67] e Domanda cumulativa di energia[68] (in MJ) calcolati per tre diversi metodi di coltivazione: uno tradizionale (terra in contenitori di legno), due in idroponica (NFT[69] e *Floating system*).

Studio	**Luogo e periodo** (durata ciclo colturale in parentesi)	**Metodo di coltivazione**	**CC** kg CO_2 eq. (GWP100)	**Acq** m^3 acqua	**CED** MJ
Sanyé-Mengual et al. 2015	**Bologna**				
	lug – ago 2012 (21 gg)	NFT	2,51E+00	9,11E-02	3,81E+01
	giu – lug 2013 (25 gg)	NFT	4,88E+00	1,96E-01	7,33E+01
	lug – ago 2012 (21 gg)	Floating system	5,67E-01	3,95E-02	9,37E+00
	giu – lug 2013 (25 gg)	Floating system	1,19E+00	9,04E-02	1,96E+01
Questa tesi	**Carignano, TO**				
	lug 2022 (ciclo medio 22 gg)	Aeroponica	4,55E+00	1,05E-01	8,39E+01
Sanyé-Mengual et al. 2015	**Bologna**				
	set – nov 2013 (44 gg)	Tradizionale	3,23E-01	3,89E-01	5,15E+00
	″	NFT	3,97E+00	8,55E-02	6,05E+01
	″	Floating system	1,08E+00	3,93E-02	1,86E+01
Questa tesi	**Carignano, TO**				nota 70 ▼
	ott 2021 (ciclo medio 26 gg)	Aeroponica	2,74E+00	7,64E-02	5,43E+01
″	12 mesi: ago 2021 – lug 2022 (ciclo medio 29 gg)	Aeroponica	*5,76E+00*	*1,32E-01*	*1,04E+02*

Tabella 35 Confronto dei risultati d'impatto con studio di Sanyé-Mengual et al. 2015

3.4.2.2 **Albenga**, Liguria

Bartzas, Zaharaki & Komnitsas 2015 mettono a confronto due coltivazioni tradizionali di lattuga, una in pieno campo e una in serra. Il metodo di valutazione degli impatti adottato è CML 2001.

Studio	**Luogo**	**Metodo di coltivazione**	**CC** kg CO_2 eq. (GWP100)	**Irrigazione** m^3 acqua	**CED** MJ
Bartzas, Zaharaki & Komnitsas 2015	**Albenga, SV**				
	in pieno campo, periodo non specificato	Tradizionale	2,43E-01	2,40E-02 800 m^3/ha 33,3 t/ha	2,98E+00
	in serra	Tradizionale	2,05E-01	9,26E-03 250 m^3/ha 27,0 t/ha	3,15E+00
Questa tesi	**Carignano, TO**	Aeroponica	5,61E+00 nota 71 ▲	2,66E-02 (cfr. Tabella 26)	*1,04E+02* (come in Tabella 35)

Tabella 36 Confronto dei risultati d'impatto con studio di Bartzas, Zaharaki & Komnitsas 2015

[67] GWP e indicatore Water scarcity calcolati con ReCiPe [Goedkoop et al. 2013]
[68] Metodo di valutazione ***C**umulative **E**nergy **D**emand* [Hischier et al. 2010]
[69] Tecnica del film nutritivo (dall'inglese: ***N**utrient **F**ilm **T**echnique*)
[70] Valori calcolati con "Cumulative Energy Demand" in *OpenLCA LCIA methods* v. 2.1.3 [Greendelta 2022 b]
[71] GWP100 ricalcolato con metodo "CML-IA" in *OpenLCA LCIA methods* v. 2.1.3 [*ibidem*]

3.5 **Analisi di sensibilità**

In questa sezione sono discusse le variazioni sui risultati d'impatto corrispondenti alla modifica di alcuni input del modello.

Per una stima del contributo degli elementi esclusi dall'analisi "in corso d'opera"[72] si rimanda all'Appendice D.

3.5.1 **Energia elettrica**

Per l'Analisi dell'Inventario e la Valutazione degli impatti, i consumi diretti di energia elettrica sono stati trattati come output di un processo di fornitura di energia elettrica, per la cui modellazione si è attinto ai dati dell'ecoprofilo "*market for electricity, low voltage* – IT" (ecoInvent), disponibile sul database Agribalyse 3.0. L'ecoprofilo è a sua volta basato sui dati – sul mix nazionale di fonti energetiche primarie utilizzate per la produzione dell'energia elettrica al consumo in Italia dell'anno 2014 – pubblicati dall'IEA nel 2017 [Moreno Ruiz et al. 2017].

Considerato il rilevante contributo ai risultati d'impatto di questo processo (vedi § 3.3.1.2), in questa sezione è stato ritenuto interessante:

- ricalcolare i risultati d'impatto utilizzando dati più aggiornati sul mix energetico nazionale;
- ripetere l'analisi considerando uno scenario alternativo, in cui il 100% dell'energia elettrica consumata dai processi del foreground system è prodotta con pannelli fotovoltaici.

3.5.1.1 **Dati aggiornati sul mix energetico**

Il calcolo dei risultati d'impatto associati ai consumi diretti di energia elettrica è stato ripetuto utilizzando GWP100 e potenziali di eutrofizzazione delle acque per kWh, calcolati nello studio di Carvalho, Marmiroli & Girardi 2022 a partire da dati Eurostat 2020 sul mix energetico italiano del 2018. Questo confronto è meramente indicativo. Lo studio citato adotta come unità funzionale 1 kWh di energia elettrica per il consumo lordo nazionale: trasmissione, distribuzione e perdite loro associate sono escluse dai confini del sistema[73]. Risultati in Tabella 37.

	CC kg CO_2 eq.	**Eu AD** kg P eq.	**Eu M** kg N eq.	**Note**
⚡	4,38E+00	1,48E-03	1,20E-04	risultati precedentemente calcolati (Cfr. § 4.3.1.2)
⚡	4,11E+00	1,30E-04	1,85E-03	risultati ottenuti moltiplicando i 10,5 kWh/UF calcolati per il sistema di prodotto (vedi Tabella 27) per i risultati d'impatto indicati per 1 kWh di energia elettrica in Carvalho, Marmiroli & Girardi 2022 § Tabella 1
$\Delta_{\%}$	-6%	-91%	+1435%	rispetto ai risultati d'impatto dovuti ai consumi diretti di energia elettrica
$\Delta_{\%}$ sul tot.	-5%	-70%	+1027%	rispetto ai risultati d'impatto dell'intero sistema di prodotto

Tabella 37 Confronto risultati d'impatto con dati mix energetico più recenti

Il GWP del sistema si riduce del 5%. Gli ordini di grandezza dei potenziali di eutrofizzazione delle acque dolci e delle acque marine s'invertono[74].
N.B.: le variazioni percentuali sono calcolate rispetto ai risultati dello "studio principale" (presentati in § 3.3.1.2, vedi Tabella 30).

[72] Vedi anche § 3.2.0.1.
[73] Cfr. note metodologiche dello studio in Gargiulo, Carvalho & Girardi 2020
[74] Questo risultato inatteso potrebbe essere giustificato dalle variazioni nel mix, dal diverso metodo di valutazione degli impatti adottato nello studio da cui provengono i dati o da un errore nella trascrizione dei risultati.

Questo studio si avvale solo di risorse gratuite; per un confronto più rigoroso sarebbe preferibile ripetere l'analisi con dati aggiornati da ecoInvent o altre banche dati specializzate (il cui accesso è, però, subordinato all'acquisto di costose licenze). Per avere un'idea dell'entità della variazione sui risultati prodotta dall'uso di dati più aggiornati sul mix energetico nazionale, ricorrere ai risultati di un altro studio di LCA (in questo caso quello di Carvalho, Marmiroli & Girardi 2022), è stato ritenuto, per questa occasione, un compromesso accettabile[75].

3.5.1.2 **Energia prodotta con pannelli fotovoltaici**

Il calcolo dei risultati d'impatto associati ai consumi diretti di energia elettrica, questa volta, è stato ripetuto sostituendo l'ecoprofilo "*market for electricity, low voltage* – IT" con l'ecoprofilo "*electricity production, photovoltaic,* 570kWp *open ground installation, multi-Si* – GLO" (ecoInvent) [Agribalyse 2020].
I dati d'inventario dell'ecoprofilo selezionato si riferiscono 1 kWh di energia elettrica a basso voltaggio prodotti con un impianto fotovoltaico a celle in silicio policristallino con una potenza di picco di 570 kW [ecoInvent b].

In questo caso è stato possibile includere tutte le categorie d'impatto. Il metodo di valutazione degli impatti utilizzato è lo stesso dello studio principale: ReCiPe 2016 per categorie d'impatto intermedio – approccio gerarchico (H).

	CC kg CO_2 eq. (GWP100)	**Eu AD** kg P eq.	**Eu M** kg N eq.	**AT** kg SO_2 eq.	**Acq** m^3 acqua	**Suo** m^2 a coltivati eq.	**R Fo** kg petrolio eq.	**R Mi** kg Cu eq.
⚡ Risultati studio (cfr. § 3.3.1.2)	4,38E+00	1,48E-03	1,20E-04	3,19E-02	8,15E-02	1,48E-01	1,21E+00	6,79E-03
⚡ Scenario alternativo α	8,22E-01	5,43E-04	7,24E-05	3,68E-03	2,59E-02	2,96E-01	2,06E-01	9,16E-03
Δ%	-81%	-63%	-40%	-88%	-68%	+100%	-83%	+35%
Tot. ricalcolato	**2,20E+00**	**1,00E-03**	**1,20E-04**	**8,21E-03**	**7,65E-02**	**3,85E-01**	**8,36E-01**	**2,83E-02**
Δ% sul tot.	-62%	-48%	-29%	-77%	-42%	+62%	-55%	+9%

Tabella 38 Risultati d'impatto Scenario alternativo

In questo scenario il 100% dell'energia elettrica consumata dai processi del foreground system è prodotta con pannelli fotovoltaici.
Osservando i risultati d'impatto ricalcolati in Tabella 38, è possibile notare un significativo miglioramento delle prestazioni ambientali del sistema di prodotto in quasi tutte le categorie esaminate (6 di 8) (in verde) – le diminuzioni dei potenziali d'impatto per unità funzionale vanno dal 29% (Eu M) al 77% (AT); in particolare, potenziale di riscaldamento globale a 100 anni, ricorso a combustibili fossili e potenziale di acidificazione terrestre risultano più che dimezzati – a scapito di un maggior uso di suolo (+62%) e risorse minerarie (+9%) (in rosso).

N.B.: le variazioni percentuali citate prendono come riferimento i risultati dello studio principale, riportati in Tabella 28 (§ 3.3.1).

[75] Sull'opportunità di condurre analisi del ciclo di vita a partire dai risultati d'impatto citati in altri studi LCA (o risorse simili come dichiarazioni ambientali di prodotto) si segnalano la pubblicazione di Strazza et al. 2016 e la documentazione della banca dati tedesca *ÖkoBau.Dat* (Greendelta 2015).

3.5.2 **Massa media dei cespi di lattuga**

Per il calcolo dei flussi di riferimento, è stata assunta una massa media per unità di prodotto $\mathbf{m}$ di 44,1 g. Il valore corrisponde alla media campionaria della massa della parte epigea degli esemplari di lattuga selezionati per i rilievi agronomici condotti internamente dall'azienda sulle produzioni della serra Plant800 di Cascina Gorrea.

Come valori di riferimento per un cespo di lattuga sono comunemente indicati quelli di cultivar molto popolari come *Iceberg* e *Romana*, i cui cespi pesano in media tra i 300 e i 500 g [CPS]; rispetto a queste cifre il dato assunto per la produzione esaminata appare piuttosto modesto, in realtà, il peso medio di un cespo di lattuga può variare molto a seconda della varietà considerata. A lattughe multifoglia e a foglia di quercia, come quelle trattate in questo studio, corrispondono pesi inferiori [Cattivello et al. 2016; CPS]. Per la lattuga SalaNova una delle fonti consultate riporta un peso medio di 150 g per cespo [CPS]. Su e-commerce che vendono prodotti simili troviamo pesi indicativi per cespo compresi tra i 50 e i 250 grammi [AgriBio; Pulmino contadino].

Sul peso medio, oltre che la varietà coltivata, può influire il regime di fertirrigazione: nell'esperimento di Awalina, Erona & Usnam 2022 il peso fresco a fine ciclo di cespi di lattuga coltivati in aeroponica varia considerevolmente in base alla frequenza e alla durata degli interventi di fertirrigazione (nello studio sono indicati valori compresi tra 84 e 207 g). Come già segnalato in § 3.4.1, dai dati riportati in Barla, Salachas & Abeliotis 2020 su una coltivazione aeroponica di lattuga in Grecia si ricavano valori medi compresi tra i 250 e i 315 g per cespo.

Dal momento che il dato assunto potrebbe sottostimare il peso della produzione effettiva, in Tabella 39 sono mostrati i risultati d'impatto del sistema di prodotto per alcuni valori plausibili di $\mathbf{m}$ a parità delle altre condizioni.

	CC kg CO_2 eq. (GWP100)	**Eu AD** kg P eq.	**Eu M** kg N eq.	**AT** kg SO_2 eq.	**Acq** m^3 acqua	**Suo** m^2 a coltivati eq.	**R Fo** kg petrolio eq.	**R Mi** kg Cu eq.
m = 44,1 g Risultati studio (cfr. § 3.3.1)	5,76E+00	1,94E-03	1,68E-04	3,65E-02	1,32E-01	2,37E-01	1,84E+00	2,59E-02
m = 50 g	5,08E+00	1,71E-03	1,48E-04	3,22E-02	1,17E-01	2,09E-01	1,62E+00	2,29E-02
m = 75 g	3,39E+00	1,14E-03	9,88E-05	2,14E-02	7,77E-02	1,39E-01	1,08E+00	1,52E-02
m = 100 g	2,54E+00	8,56E-04	7,41E-05	1,61E-02	5,83E-02	1,04E-01	8,11E-01	1,14E-02

Tabella 39 Risultati d'impatto del sistema al variare di m (*coeteris paribus*)

I risultati d'impatto sono inversamente proporzionali a $\mathbf{m}$ (cfr. formule per il calcolo dei flussi di riferimento in § 3.2.2). Per ottenere flussi di riferimento e risultati d'impatto rispetto a un valore di $\mathbf{m}$ qualsiasi è sufficiente moltiplicare i valori in Tabella 25 e Tabella 28 (calcolati per $\mathbf{m}$ = 0,0441 kg) per $\frac{0{,}0441}{\boldsymbol{m}}$.

In Appendice C sono riportati flussi di riferimento e risultati d'impatto ricalcolati adottando come unità funzionale un cespo di lattuga idoneo alla vendita (un'unità di prodotto) anziché 1 kg di lattuga. Per convertire flussi di riferimento e risultati d'impatto dello studio principale (espressi in kg di prodotto idoneo alla vendita con $\mathbf{m}$ = 0,0441 kg) negli omologhi "al pezzo" è sufficiente moltiplicarli per 0,0441.

3.5.3 **Fonti per la modellazione del background system**

Nel selezionare le fonti per gli ecoprofili da usare per la modellazione dei processi del background system, prima di decidere di optare per il database Agribalyse, sono stati presi in considerazione, per la produzione e la lavorazione di plastiche e metalli, gli ecoprofili più recenti prodotti dalle associazioni:

- *Plastics Europe* (per la produzione di policarbonato, polipropilene e polivinilcloruro);
- *World Steel* (per la produzione di ferri d'armatura e telaio di supporto in acciaio);
- *European Aluminium Association* (per la produzione e la lavorazione dell'alluminio).

Nonostante la potenzialmente migliore rappresentatività temporale e tecnologica dei processi offerta da questi ultimi, a causa dell'incompatibilità dei dati[76] con il metodo di valutazione degli impatti adottato, la scelta è ricaduta sugli ecoprofili contenuti in Agribalyse.

In questo paragrafo, si valuta la "sensibilità" dei risultati d'impatto dello studio alla scelta degli ecoprofili utilizzati per la modellazione dei processi del background system citati.
L'analisi di sensibilità è limitata alla categoria *Cambiamento climatico*, l'unica per cui è stato possibile ricavare agevolmente dei potenziali d'impatto per kg di materiale, da associare agli ecoprofili alternativi, comparabili con quelli ottenuti con il metodo di valutazione degli impatti adottato in questo studio. I GWP per kg di materiale sono messi a confronto in Tabella 40.

Flussi interessati	**Ecoprofilo utilizzato nello studio**	**CC** kg CO_2 eq. / kg	**Ecoprofilo alternativo**	**CC** kg CO_2 eq. / kg
Policarbonato Quantità in Tabella 6	"polycarbonate production – RER" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]	8,54E+00	"Polycarbonate, production mix, at producer, Technology mix, …" [Plastics Europe 2019 a]	3,49E+00 (*) Δ% **-59%**
Polipropilene Quantità in Tabella 8 e Tabella 9	"polypropylene production, granulate – RER" (el)	2,10E+00	"polypropylene, PP, granulate, at plant" [Plastics Europe 2019 b]	1,65E+00 (*) Δ% **-21%**
Polivinilcloruro Quantità in Tabella 8	"polyvinylchloride production, suspension polymerisation – RER" (el)	1,95E+00	"polyvinyl chloride, at plant, from suspension process (S-PVC)" [Plastics Europe 2019 c]	2,02E+00 (*) Δ% **+3,5%**
Ferri d'armatura Quantità in Tabella 6	"reinforcing steel production – RER" (el)	2,09E+00	"Steel rebar, cradle to gate excluding EoL recycling – Europe" [World Steel 2020]	2,29E+00 (**) Δ% **+9,6%**
Acciaio Quantità in Tabella 8	"steel production, converter, low-alloyed – RER" (el)	2,30E+00	"Steel sections, cradle to gate excluding EoL recycling – Europe" [World Steel 2020]	1,49E+00 (**) Δ% **-63%**
Acciaio | Lavorazione Quantità in Tabella 8	"metal working, average for steel product manufacturing – RER" (el)	1,78E+00		
Alluminio Quantità in Tabella 6	"aluminium production, primary, ingot – IAI Area, EU27 & EFTA" (el)	8,05E+00	"Aluminium ingot mix EAA update 2015 (consumption mix) – EU 27" [EAA 2018]	8,28E+00 (***) Δ% **+2,9%**
Alluminio | Estrusione Quantità in Tabella 6	"section bar extrusion, aluminium – RER" (el)	3,09E-01	"Aluminium extrusion profile [p-agg] EAA update 2015 – EU 27" [EAA 2018]	6,93E-01 (***) Δ% **+124%**

Tabella 40 Confronto GWP per kg di materiale (ecoprofili utilizzati nello studio vs. ecoprofili alternativi)

(*) per il calcolo è stato utilizzato il metodo di valutazione degli impatti "**Environmental Footprint** (Mid-point indicator)" tratto dal database "Environmental Footprints" [PEF 2019]; (**) GWP100 calcolati con il metodo **CML2001** (aggi. agosto 2016) tratti dal report [World Steel 2020; World Steel, comunicazione del 26 aprile 2022]; (***) per il calcolo è stato utilizzato il metodo di valutazione degli impatti "**Environmental Footprint** (Mid-point indicator)" fornito insieme agli ecoprofili [EAA 2018; EAA, comunicazione del 19 maggio 2022].

[76] La mappatura dei flussi (in taluni casi anche la nomenclatura) utilizzata negli ecoprofili è diversa da quella associata al metodo di valutazione degli impatti nella sua implementazione su OpenLCA. Per correggere l'incompatibilità occorrerebbe sostituire i flussi in ciascun ecoprofilo con gli omologhi compatibili con il metodo di valutazione degli impatti adottato per l'analisi. Anche adoperando gli strumenti `Bulk Replace` e `Flow Mapping` di OpenLCA, pensati per esigenze simili (per approfondire vedi Srocka et al. 2020), il procedimento rimane estremamente *time-consuming*.

In Tabella 41 sono messi a confronto i contributi al GWP del sistema di prodotto dovuti ai flussi interessati: i risultati ottenuti con gli ecoprofili ecoInvent/Agribalyse nella colonna a fondo grigio; quelli che si otterrebbero utilizzando gli ecoprofili alternativi subito a destra. Sono riportate, inoltre, le variazioni prodotte sui risultati d'impatto totali del sistema di prodotto: in termini assoluti (Δ) come differenza dei valori nelle due colonne precedenti, e in termini relativi (Δ% sul tot.), fatto 100 il GWP100 del sistema di prodotto calcolato con i primi (i 5,76 kg CO_2 eq. in Tabella 28).

Flusso	**CC** kg CO_2 eq. / kg lattuga	**CC** kg CO_2 eq. / kg lattuga **Ecoprofili alternativi**	**CC** kg CO_2 eq. / kg lattuga Δ	**CC** Δ% sul tot.
Policarbonato	2,23E-01	9,11E-02	-1,32E-01	**-2,3%**
Polipropilene	5,87E-01	4,61E-01	-1,26E-01	**-2,2%**
Polivinilcloruro	4,03E-03	4,17E-03	+1,45E-04	**<0,1%**
Ferri d'armatura	5,45E-02	5,97E-02	+5,22E-03	**0,1%**
Acciaio	6,58E-02	4,26E-02	-7,40E-02	**-1,3%**
Acciaio | Lavorazione	5,08E-02			
Alluminio	2,38E-01	2,45E-01	6,80E-03	**0,1%**
Alluminio | Estrusione	2,57E-02	5,76E-02	3,19E-02	**0,6%**
sostituendo tutti gli ecoprofili utilizzati nello studio con gli ecoprofili alternativi →			-2,88E-01	-5,0%

Tabella 41 Confronto contributi al GWP100 del sistema dovuti ai materiali interessati dall'Analisi di sensibilità (ecoprofili utilizzati nello studio vs. ecoprofili alternativi)

Confrontando a due a due i GWP per kg di materiale calcolati a partire dai dati negli ecoprofili messi a confronto in Tabella 40, si rilevano differenze importanti per estrusione dell'alluminio (+124%), acciaio (-63%) e policarbonato (-59%). Tuttavia, osservando l'ultima colonna della Tabella 41, è possibile notare come la scelta di uno o dell'altro ecoprofilo non produca variazioni significative sul GWP complessivo del sistema di prodotto. Prendendo come riferimento i valori ottenuti utilizzando gli ecoprofili da ecoInvent/Agribalyse, le più grandi variazioni si hanno per policarbonato e polipropilene (-2,3% e -2,2%), la meno rilevante per il polivinilcloruro (inferiore allo 0,1%). Sostituendo tutti gli ecoprofili utilizzati nello studio con quelli alternativi, il GWP del sistema di prodotto passa da 5,76 kg a 5,47 kg (-5%) di CO_2 equivalente per kg di lattuga.

Conclusioni

L'aeroponica è un'innovativa pratica agraria fuori suolo la quale sembra offrire interessanti opportunità per la produzione sostenibile di cibo [Lakhiar et al. 2018 a] e di fitoderivati [Chajra et al. 2020; Iliev 2021]. Tra i suoi punti di forza sono spesso citati: una drastica riduzione dei consumi di acqua e di fertilizzanti, e una produzione maggiore a parità di superficie occupata. Tuttavia, dati e studi specifici sull'impatto ambientale di coltivazioni in aeroponica scarseggiano [CIP 2013; Armanda, Guinée & Tukker 2019; Barla, Salachas & Abeliotis 2020].

Nel presente lavoro di tesi, a valle di una trattazione generale di caratteristiche principali, potenzialità e criticità di questa tecnologia, allo scopo di arricchire il discorso che lega **produzione e consumo sostenibili** e **aeroponica**, è stata condotta un'**Analisi del ciclo di vita** *cradle-to-gate* (dalla "culla" all'uscita dal sito di produzione) di una coltivazione commerciale di lattuga (*Lactuca sativa*) realizzata in una serra climatizzata nel Torinese.
Con il supporto della startup italiana Agricooltur, che gestisce la serra e produce i moduli di coltivazione in essa impiegati, è stato possibile approfondire i particolari del sistema produttivo e del processo di coltivazione, nonché raccogliere i dati primari utilizzati per l'analisi.

Nello studio sono state considerate otto categorie d'impatto: cambiamento climatico, eutrofizzazione di acque dolci e marine, acidificazione terrestre, consumo di acqua, uso di suolo, sfruttamento di combustibili fossili e di risorse minerarie.

Risultati

Gli impatti calcolati in riferimento a 1 kg di lattuga, confrontati con i risultati di studi analoghi in letteratura scientifica e banche dati specializzate, appaiono paragonabili a quelli di altre colture fuori suolo e serre riscaldate, ma superiori rispetto a quelli di coltivazioni in pieno campo in aree caratterizzate da condizioni climatiche simili, sorprendentemente anche nelle categorie d'impatto Consumo di acqua e Uso di suolo. Benché nella produzione esaminata siano stati riscontrati consumi di acqua per la fertirrigazione eccezionalmente contenuti e un numero di cespi prodotti per anno e unità di superficie superiore a quelli ottenibili in una coltivazione tradizionale, dall'analisi è emerso che per produrre 1 kg di lattuga in aeroponica – considerando tutti i processi inclusi nei confini del sistema analizzato (fasi a monte della coltivazione e consumi diretti di energia elettrica) – potrebbero essere necessari più acqua e più suolo rispetto a quanto richiesto per produrre la stessa quantità di prodotto in pieno campo.

Il contributo maggiore agli impatti della produzione – più del 60% in 7 delle 8 categorie considerate – è imputabile agli elevati consumi diretti di energia elettrica del sistema, la maggior parte dei quali (il 93%) dovuti al controllo climatico della serra. Rileggendo i risultati al netto di questi ultimi, il divario tra aeroponica e agricoltura tradizionale si riduce notevolmente, in alcune categorie d'impatto l'esito del confronto è addirittura ribaltato (Eutrofizzazione marina e Uso di suolo).

L'ampia copertura temporale dello studio (12 mesi, da agosto 2021 a luglio 2022) ha permesso di evidenziare una notevole variabilità stagionale degli impatti della produzione, che oscillano tra la metà e il doppio delle medie calcolate sull'intero periodo di osservazione.
Questa variabilità è spiegata in larga misura dalle diverse esigenze di riscaldamento e raffrescamento durante l'anno e dalle differenze su base stagionale nella durata media dei cicli colturali (più lunghi in inverno, più brevi in estate).

In tutte le categorie d'impatto i valori più alti si hanno a dicembre (quando si ha più bisogno di ricorrere al riscaldamento e i cicli sono più lunghi e di conseguenza la produzione inferiore), i più bassi tra agosto e settembre.

I risultati sono fortemente condizionati dal mix di fonti utilizzato per produrre l'energia elettrica necessaria. Nell'analisi si è fatto riferimento al mix nazionale. Si è valutato, poi, uno scenario alternativo in cui il fabbisogno di energia elettrica della serra sia, invece, interamente sopperito da un impianto fotovoltaico di media potenza: una simile soluzione comporterebbe significativi miglioramenti in 6 di 8 categorie d'impatto – GWP100, potenziale di acidificazione terrestre e ricorso a combustibili fossili risultano più che dimezzati – a scapito di un maggiore uso di suolo (+62%) e di risorse minerarie (+9%).

Alla luce di quanto osservato, è evidente che in fasce climatiche che impongono l'implementazione di sistemi di controllo climatico dell'ambiente di coltivazione, efficientare i consumi di energia rappresenta la criticità principale per la sostenibilità di questa tecnologia.
Altrettanto importante è il mix energetico: come dimostrato dai risultati calcolati sullo scenario alternativo, a parità delle altre condizioni, preferire fonti rinnovabili può ridurre sensibilmente l'impronta ecologica della produzione.
L'infrastruttura di produzione (serra e moduli di coltivazione) e i vasi in plastica impiegati, rappresentano in quasi tutte le categorie d'impatto trattate, rispettivamente il secondo e il terzo contributo più impattante. Allungare la vita utile dei componenti, prevederne il riuso e/o adoperare, laddove possibile, materiali riciclati, sono misure che potrebbero concorrere ad alleggerire ulteriormente il carico ambientale della produzione.

L'effetto combinato di interventi migliorativi come quelli suggeriti metterebbe in risalto le caratteristiche più promettenti offerte da questa innovazione (tra cui: produrre durante tutto l'anno, senza pesticidi e con un comprovato efficientamento nell'uso di suolo, acqua e fertilizzanti), qualificandola come alternativa effettivamente sostenibile per la produzione di cibo.

Limiti dello studio

I risultati di questo studio si basano sull'uso congiunto di dati misurati, calcolati e stimati (come del resto previsto dalle norme di riferimento per le Analisi del ciclo di vita [ISO 2006 b § 4.2.3.5]). Incidono particolarmente sulle conclusioni peso della produzione e consumi diretti di energia elettrica e acqua, per i quali potrebbe essere opportuno un supplemento d'indagine: le cifre utilizzate nei calcoli non sono frutto di misurazioni dirette e sistematiche, ma di stime, basate, tuttavia, sui migliori dati messi a disposizione dall'azienda. I procedimenti di calcolo e le ipotesi ad essi sottese sono descritte dettagliatamente nel capitolo dedicato al caso studio.

Per i cespi di lattuga prodotti nel sistema analizzato (*babyleaf* SalaNova) è stata rilevata una massa media a fine ciclo della parte edule di circa 50 g; a seconda della cultivar e del regime di fertirrigazione si possono ottenere valori molto diversi: per esempio, un cespo di *iceberg* (una delle varietà di lattuga più diffuse) coltivato in pieno campo raggiunge normalmente un peso compreso tra i 300 e i 500 g. Poiché l'UF adottata nello studio è 1 kg di prodotto idoneo alla vendita, nel confronto con altre coltivazioni di lattuga, questo fattore potrebbe aver penalizzato le prestazioni del sistema analizzato.
In Appendice C sono riportati parametri d'inventario e risultati d'impatto riferiti al pezzo anziché al peso.

Le fonti utilizzate per la modellazione dei processi del *background system* (quali produzione di materie prime, trasporti e fornitura di energia elettrica e acqua corrente) in gran parte provengono dalla selezione di ecoprofili ecoInvent 3.5 (2018) inclusi nella banca dati gratuita Agribalyse 3.0 (2020). Dalla loro data di pubblicazione, alcuni degli ecoprofili sono stati aggiornati nelle versioni successive di ecoInvent. Ripetere l'analisi potendovi attingere migliorerebbe certamente la rappresentatività temporale e tecnologica dello studio; non si attendono, tuttavia, differenze nei risultati tali da alterare le conclusioni fatte sopra.

In analisi di sensibilità, è stata prodotta una stima della variazione sui risultati d'impatto derivante dall'uso di alcune fonti alternative (dati forniti da associazioni di categoria su plastiche e metalli, "impronte ecologiche" aggiornate del mix energetico nazionale da letteratura): nelle categorie per cui è stato possibile ricalcolare gli impatti la variazione è risultata inferiore al 5%.

Sulle linee di produzione analizzate, la soluzione nutritiva in eccesso viene ricircolata; pertanto, si è assunto che tutti i nutrienti somministrati siano assorbiti dalle piante; il periodico lavaggio di serbatoi e canalette e la possibile dispersione di eventuali residui di fertilizzante non sono stati considerati, ragione per cui, i potenziali di eutrofizzazione delle acque calcolati potrebbero essere sottostimati.

Alcuni elementi inizialmente inclusi entro i confini del sistema (come pompe, filtri, viti, bulloni e simili) sono stati omessi successivamente a causa di informazioni insufficienti per completare l'analisi. Una stima del contributo di tali esclusioni agli impatti è disponibile in Appendice D: secondo quanto calcolato, non dovrebbero alterare i risultati in misura superiore al 5%, salvo che nella categoria Sfruttamento di risorse minerali per la quale è stato trovato un potenziale incremento del 15%.

Prospettive future di ricerca

Il caso studio trattato in questo lavoro di tesi ha messo in luce come gli impatti legati alla produzione di energia elettrica necessaria per climatizzare l'ambiente di coltivazione possano mettere in secondo piano le pur ragguardevoli efficienze in termini di consumo di acqua e suolo conseguibili implementando l'aeroponica.
Fermo restando la necessità di intervenire su questa e le altre criticità evidenziate, potrebbe essere interessante valutare l'effetto che avrebbe sull'impronta ecologica del sistema incrementare la capacità produttiva realizzando coltivazioni su più piani. Se è vero che si potrebbe "ammortizzare" il pesante impatto della climatizzazione su una maggiore quantità di prodotto, un orto verticale di contro renderebbe necessari il ricorso all'illuminazione artificiale e l'assemblaggio di nuovi moduli di coltivazione. In quali situazioni una simile configurazione potrebbe rivelarsi vantaggiosa? In tali casi, quali le dimensioni ottimali?

Frequenza e durata degli interventi di fertirrigazione [Awalina, Erona & Usnam 2022] e concentrazioni di fertilizzanti [Romero-Gámez 2015] possono influire su peso e qualità del prodotto; potrebbe essere interessante valutare gli eventuali trade-off corrispondenti a diversi regimi di fertirrigazione e ricette della soluzione nutritiva nelle categorie d'impatto individuate.

Alcuni studi (Chandra et al. 2014; Ali et al. 2015; Wimmerowa et al. 2022) hanno rilevato nelle piante coltivate in aeroponica un'incrementata capacità di sintetizzare sostanze d'interesse nutrizionale o industriale rispetto ad altri metodi di coltivazione. Effettuare studi comparativi che adottino unità funzionali diverse, come il contenuto calorico, di vitamine o di sali minerali di quanto prodotto, permetterebbero di evidenziare queste interessanti potenzialità in valutazioni di sostenibilità "integrate".

Per approfondire il contributo dell'aeroponica nel garantire la sicurezza alimentare potrebbe essere interessante, inoltre, analizzare il ciclo di vita di coltivazioni di altri ortaggi (p.e. alimenti di base come patate e igname) e al variare del contesto geografico. Ancora, a questo proposito, un punto di forza dell'aeroponica, cui non è stato dato sufficiente rilievo in quest'analisi, è che consente di evitare l'uso di pesticidi. Uno studio che approfondisca i potenziali impatti sulla salute umana e l'ecotossicità di diversi sistemi di produzione agroalimentare potrebbe avvalorare la tesi secondo la quale l'aeroponica è un'alternativa più sostenibile o far emergere eventuali passaggi d'onere ambientale.

I prodotti orticoli coltivati in moduli aeroponici come quelli descritti nel caso studio possono essere venduti senza recidere le radici delle piante; assicurando un'adeguata idratazione la pianta può così continuare il suo ciclo vegetativo fino al momento immediatamente precedente il consumo. La startup Agricooltur progetta e commercializza moduli per esposizione e conservazione, alternativi all'uso di frigoriferi. Un'analisi del ciclo di vita *farm-to-fork* che metta a confronto diverse soluzioni di packaging e conservazione potrebbe identificare la più vantaggiosa.

Appendice A
Calcolo dei dati d'inventario

A 0.1 **Processi di trasporto**

Materiale/componente	Veicolo	Luogo fornitore	Distanza [km]	
Calcestruzzo **Ferri d'armatura**		Pinerolo (TO)	26	[Agricooltur, com. del 27 maggio 2022]
Alluminio **Acciaio (telaio di supporto)**		Grugliasco (TO)	31	
Policarbonato alveolare		La Loggia (TO)	11,6	
Polipropilene (AeroSmart)			100	assunta
Polivinilcloruro			100	assunta
Sementi **Torba**	Van (<3,5 t)	Moncalieri (TO)	18,9	visita sul posto
Polipropilene (Vasi a rete)			100	assunta
Fertilizzanti	Van (<3,5 t)	Carignano (TO)	8,1	[Agricooltur, doc. int. 1]

Tabella 42 Dettagli processi di trasporto in Analisi dell'inventario del ciclo di vita.
N.B.: i dati si riferiscono ai fornitori di primo livello

A 1 **Serra *Plant800*** (S0)

Materiale	Dati
Calcestruzzo	C 25/30 (RC_K 30) Classe di esposizione XC2 Classe di consistenza S3 Max rapporto acqua/cemento: 0,60 Max dimensione aggregati: 32 mm [Agricooltur, disegni 3]
Ferri d'armatura	Acciaio laminato a caldo (B 450 C) Resistenza a trazione caratteristica $f_{t,k}$ = 540 N/mm^2 Resistenza a snervamento caratteristica $f_{y,k}$ = 450 N/mm^2 [Agricooltur, disegni 3]
Policarbonato alveolare	Spessore: 20 mm σ = **3,1** kg/m^2 [Riva 2021; Materie-Plastiche a]
Alluminio	ρ = **2700** kg/m^3

Tabella 43 Specifiche tecniche materiali e dati usati per i calcoli (in grassetto) (S0)

Elemento		Peso specifico	Num.	Dimensioni	Massa Σ m [kg]
Rete elettrosaldata	⌀ 8 mm maglia 15 cm × 15 cm	**5,35** kg/m^2 [Info Acciaio a; Studio Petrillo; Sider Sipe]	n.a.	368 m^2 superficie fondazioni	1969
Barre longitudinali	⌀ 12 mm	**0,888** kg/m [Info Acciaio b]	96	0,18 m profondità fondazioni	15,3
Ferri d'armatura					**1984**

Tabella 44 Dettaglio calcoli massa *Ferri d'armatura* (S0-Fond).
Dati primari sulle fondazioni da Agricooltur, disegno 3 (celle con sfondo grigio chiaro)

Elemento	Dimensioni a, b [m]		Superficie S = (a × b) [m^2]	Massa m = σ S [kg]	Num.	Superficie Σ S [m^2]	Massa Σ m [kg]
POS 1 LAT SX	1,98	1,98	3,92	12,2	23	90,2	279,5
POS 2 LAT DX	1,98	1,98	3,92	12,2	23	90,2	279,5
POS 3 COPERTURA (+FRESATURA)	1,98	5,09	10,08	31,2	23	231,8	718,6
POS 4 COPERTURA (+FRESATURA)	1,98	3,7	7,33	22,7	23	168,5	522,3
POS 7 TIMPANO	1,48	2,5	3,70	11,5	1	3,7	11,5
POS 8	1,48	2,41	3,57	11,1	1	3,6	11,1
POS 9	1,955	2,82	5,51	17,1	1	5,5	17,1
POS 10	1,955	2,74	5,36	16,6	1	5,4	16,6
POS 11	1,04	3	3,12	9,7	1	3,1	9,7
Copertura						601,9	**1866**

Tabella 45 Dettaglio calcoli massa *Copertura* in policarbonato (S0-Cop).
Dati su dimensioni lastre e numerosità da Agricooltur, disegno 1 (celle con sfondo grigio chiaro)

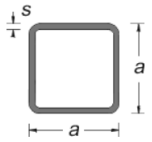
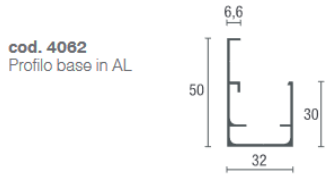
Elemento		Lunghezza L [m]	Sezione S [m²]	Massa m = ρ L S [kg]	Num.	Massa Σ m [kg]
Scatolato 60 × 60 × 3 (mm) NOIR 2100 SABLE verniciato  con a = ,060 m, s = ,003 m $\mathbf{S} = \mathbf{a}^2 - (\mathbf{a} - \boldsymbol{s})^2 =$ $=, \mathbf{060}^2 - (, \mathbf{060} -, \mathbf{003})^2 =, \mathbf{000684}$		2,19	0,000684	4,04	24	97,1
		2,28		4,21	24	101
		2,98		5,50	24	132
		2,805		5,18	24	124
		2,39		4,41	2	8,83
		2,473		4,57	2	9,13
		3,488		6,44	24	155
		4,8		8,86	24	213
		1,94		3,58	161	577
		0,998		1,84	2	3,69
		1,4		2,59	4	10,3
		1,915		3,54	4	14,1
Profilo Ancoral NOIR 2100 SABLE verniciato Profilo per ancoraggio lastre Disegno sezione non disponibile Assunta sezione di 6 cm² (zeri in grigio non sono significativi)		4,827	0,000600	8	24	188
		3,514		6	24	137
		2,202		4	24	86
		2,284		4	24	89
		1,93		3	46	144
		2,515		4	1	4
		2,84		5	1	5
		3,015		5	1	5
		2,432		4	1	4
		4,827		8	24	188
		3,514		6	24	137
		2,202		4	24	86
		2,284		4	24	89
Lattonerie spessore 10/10 (in decimi di mm) Le sezioni S_i (con i = 01, …, 05) sono calcolate mediante la formula: $\mathbf{S}_i =, \mathbf{001} * \sum_{j=1}^{n_i} \mathbf{a}_{i,j}$; le quote $a_{i,j}$ sono riportate in rosso in Figura 42	01	2	0,000115	0,621	23	14,3
	02	2,03	0,000145	0,795	23	18,3
	03	2,06	0,000213	1,18	23	27,2
	04	2,06	0,000126	0,701	23	16,1
	05	2,4	0,000175	1,13	4	4,54
	05	3,5	0,000175	1,65	2	3,31
	05	4,9	0,000175	2,32	2	4,63
Profilo base cod. 4062 [Dott. Gallina b, p. 21]  Assunto spessore di 1 mm $\mathbf{S} =, \mathbf{001} * (, \mathbf{0066} * \mathbf{4} +, \mathbf{05} +, \mathbf{032} +, \mathbf{03}) =$ $=, \mathbf{000138}$		6,000	0,000138	2,24	24	53,8
Struttura portante						**2247**

Tabella 46 Dettaglio calcoli massa *Struttura portante* in alluminio (S0-SP).
Dati da Agricooltur, disegno 1 (celle con sfondo grigio chiaro)

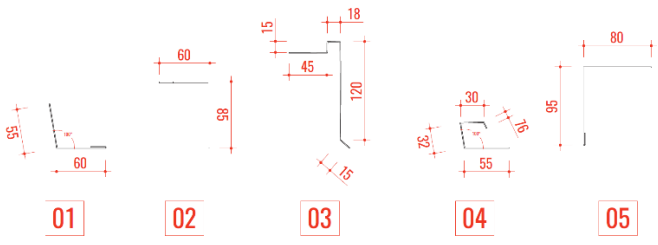


Figura 42 Quote lattonerie struttura portante (in millimetri) [Agricooltur, disegno 1]

A 2 **Moduli aeroponici *AeroSmart*** (S1)

Materiale	**Dati**
Acciaio	ρ = **7850** kg/m^3
Polipropilene alveolare	Spessore: 10 mm σ = **1,8** kg/m^2 [Materie-Plastiche b]
Polipropilene compatto	ρ = **920** kg/m^3 [Plastotecnica Emiliana]
Polivinilcloruro	ρ = **1410** kg/m^3

Tabella 47 Specifiche tecniche materiali e dati usati per i calcoli (in grassetto) (S1)

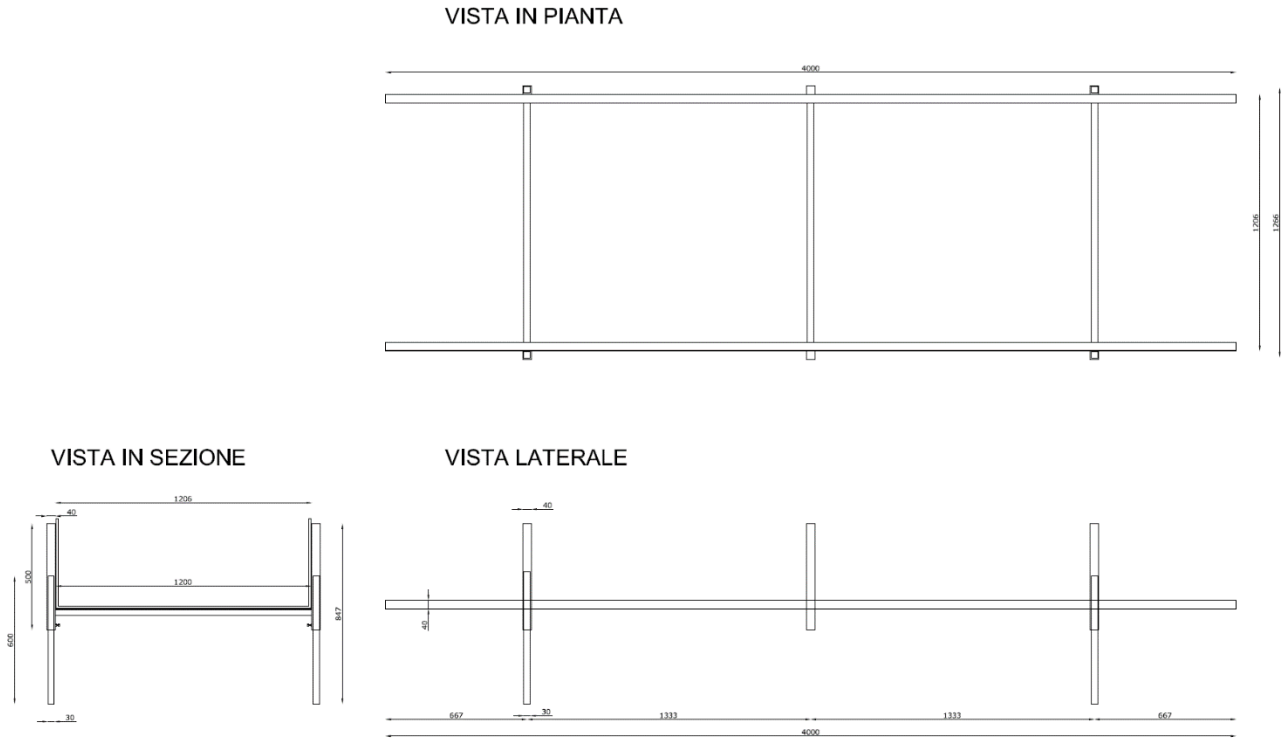


Figura 43 Disegno *Telaio di supporto* [Agricooltur, disegno 2] (S1-Supp)

Elemento	**Lunghezza** L [m]	**Sezione** S [m^2]	**Massa** m = ρ L S [kg]	**Num.**	**Massa** Σ m [kg]
Gamba Scatolato 30 × 30 × 3 (mm)	0,600	0,000324	1,53	40	61
Gamba Scatolato 40 × 40 × 3 (mm)	0,500	0,000444	1,74	60	105
Appoggio Angolare "a elle" 40 × 40 × 3 (mm) $\mathbf{S = a * s - (a - s) * s}$, con a = ,04 m; s = ,003 m	4,000	0,000231	7,25	20	145
Giunzioni piene 30 × 3 (mm)	1,206	0,000090	0,85	60	26
Telaio di supporto					**362**

Tabella 48 Dettaglio calcoli massa *Telaio di supporto* in acciaio (S1-Supp).
Dati da Agricooltur, disegno 2 (cfr. Figura 43)

Elemento	Dimensioni a, b [m]		Superficie S = (a × b) [m²]	Massa m = σ S [kg]	Num.	Superficie Σ S [m²]	Massa Σ m [kg]
Laterali (dx, sx)	0,40	4	1,60	2,88	20	32	57,6
Fondo	1,20	4	4,80	8,64	10	48	86,4
Testata canaletta	1,20	0,010	0,0120	0,0216	1	0,0120	0,0216
Canaletta						80,012	**144,0216**

Tabella 49 Dettaglio calcoli massa *Canaletta* in polipropilene alveolare.
Dati elaborati da Agricooltur, disegno 1 (cfr. Figura 31)

Elemento	Lunghezza L [m]	Sezione S [m²]	Massa m = ρ L S [kg]	Num.	Massa Σ m [kg]
Profili lato corto Profilo a U ampiezza 10, L = 360 (mm) Assunti spessore s = 3 mm, altezza h = 23 mm $\mathbf{S = s * (a + 2h)}$	0,360	0,000168	0,0556	200	11,1
Profili lato lungo Profilo a U 36 × 23 × 1250 (mm) Assunto spessore s = 3 mm $\mathbf{S = s * (a + 2h)}$ con a = 36 mm, h = 23 mm	1,250	0,000246	0,283	100	28,3
Profili di appoggio					**39,4**

Tabella 50 Dettaglio calcoli massa *Profili di appoggio* in polipropilene.
Dati da Agricooltur, disegno 1 (cfr. Figura 31)

Elemento	Geometria		Massa m = ρ V [kg]	Num.	Massa Σ m [kg]
Coperchio 60 × 40 (cm) **Assunto spessore s = 3 mm;** $\mathbf{V = s * a * b}$	**a** = 0,60 m	**b** = 0,40 m	0,6624	200	132,48
Fori circolari d = 7 cm **(12 per coperchio)** **Assunto spessore s = 3 mm;** $\mathbf{V = s\pi d^2/4}$	-12 × **V** = -12*1,15E-05 = -1,39 E-04		-0,1275	200	-25,49
Piastre di coltivazione					**132**

Tabella 51 Dettaglio calcoli massa *Piastre di coltivazione* in polipropilene.
Flusso in Analisi dell'Inventario al lordo dei fori

Elemento	Geometria	Massa m = ρ V [kg]	Num.	Massa Σ m [kg]
Tubo circolare **Diametri assunti;** $\mathbf{V = \frac{\pi(d_{est}^2 - d_{int}^2)}{4} L}$	diametro esterno $\mathbf{d_{est}}$ = 20 mm diametro interno $\mathbf{d_{int}}$ = 16 mm lunghezza **L** = 40,8 cm	6,5	4	26
Condotta				**26**

Tabella 52 Dettaglio calcoli massa *Condotta* in polivinilcloruro

A 3 **Coltivazione aeroponica** (A)

A 3.1 **Composizione soluzione nutritiva**

Fertilizzante	**N**	**P_2O_5**	**K_2O**	**Concentrazione** [g/L]
Potassio 13,5-0-46,3	13,5%		46,3%	0,410
Nitrato di calcio (15,5-0-0) + 26,5 CaO	15,5%			0,180
Fosfato monoammonico 12-61-0	12%	61%		0,180
Solfato di potassio 48 K + 18 S			48%	0,070
Totale (per calcolo trasporti)				**0,840**
Esclusioni				
Nitrato di magnesio (11-0-0) + 16 MgO	11%			0,050
Altri microelementi		n.a.		0,016

Tabella 53 Composizione rappresentativa soluzione nutritiva (fertilizzanti per 1 L di acqua)
[Agricooltur, doc. int. 1; Agricooltur, com. del 23 maggio 2022]

N	**P_2O_5**	**K_2O**
1,10E-04	1,10E-04	2,23E-04

Tabella 54 Concentrazioni equivalenti di azoto, fosforo e potassio (in kg per litro di soluzione nutritiva)

A 3.2 **Interventi di fertirrigazione**

Regola in vigore dal:	Valida per [gg]:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	frequenza [intv./gg]
01/08/2021	31	[Agricooltur, com. tel. del 19 agosto 2022]																								**87**
01/09/2021	30	[Agricooltur, com. tel. del 19 agosto 2022]																								**82**
01/10/2021	31	[Agricooltur, com. tel. del 19 agosto 2022]																								**44**
01/11/2021	30	[Agricooltur, com. tel. del 19 agosto 2022]																								**24**
01/12/2021	6			1						1	2	1	2	3	3	2	1	2	1	1	1					21
07/12/2021	7			1						1	2	1	2	2	2	2	1		1		1					16
14/12/2021	2			1						1	2	1	2	3	3	2	1	2	1	1	1					21
16/12/2021	11			1							1	1	2	2	2		1		1		1					12
27/12/2021	5			1							1	1	1	1	1		1		1		1					9
01/01/2022	10			1							1	1	1	1	1		1		1		1					9
11/01/2022	8			1							1	1	1	1	2	2	1	1	1		1					13
19/01/2022	13			1					1		1	1	2	1	2	2	1	1	1		1					15
01/02/2022	17			1					1		1	1	2	1	2	2	1	1	1		1					15
18/02/2022	4	1			1			1	1	1	1	2	3	3	3	3	2	2	2	1			1			28
22/02/2022	7	1			1			1	1	1	1	3	4	4	4	4	3	3	2	1			1			35
01/03/2022	31	[Agricooltur, com. tel. del 19 agosto 2022]																								**52**
01/04/2022	30	[Agricooltur, com. tel. del 19 agosto 2022]																								**30**
01/05/2022	31	Stima basata su dati 2021 [Agricooltur, com. tel. del 19 agosto 2022]																								**90**
01/06/2022	30	Stima basata su dati 2021 [Agricooltur, com. tel. del 19 agosto 2022]																								**96**
01/07/2022	31	Stima basata su dati 2021 [Agricooltur, com. tel. del 19 agosto 2022]																								**96**

Tabella 55 Dati primari sugli interventi di fertirrigazione sulle linee lattuga (cfr. elaborazioni in Tabella 12)
[Agricooltur, doc. int. 2 § Linea 302: 1 dic 2022 → 22 feb 2022; Agricooltur, com. tel. del 19 agosto 2022]

A 3.3 Stima dei **consumi di soluzione nutritiva**

Non potendo accedere ai dati storici sui consumi effettivi di soluzione nutritiva delle linee adibite alla coltivazione di lattuga nella serra Plant800, i **consumi medi giornalieri di soluzione nutritiva** per pianta (espressi in litri per pianta al giorno) <**sol**> (riportati in Tabella 13), sono stati stimati, su base mensile, a partire dall'elaborazione di dati forniti dall'azienda [Agricooltur, doc. int. 1] e assunzioni discusse con il personale [Agricooltur, com. tel. del 19 agosto 2022].
I dati primari utilizzati, raccolti nel periodo agosto 2020 – gennaio 2021, consistono negli apporti di soluzione nutritiva (in litri) ai serbatoi di due linee di produzione interamente dedicate a coltivazioni in aeroponica di lattuga.
Per ciascuna delle due linee, mese per mese, il totale degli apporti al serbatoio (corrispondente alla quantità di soluzione nutritiva complessivamente somministrata alle piante; dato in litri di soluzione per mese per linea), è stato diviso, prima per il numero di giorni nel mese (30 per settembre e novembre, 31 per gli altri) e poi per il numero di piante sulla linea. Infine, come riferimento per i mesi da agosto a gennaio, è stata presa una media ponderata dei valori di una e l'altra linea, pesati rispetto al numero di piante sulla linea.
In mancanza di dati migliori, per gli altri mesi dell'anno, il consumo medio giornaliero di febbraio è stato assunto pari a quello di gennaio, la media della stagione autunnale (ottobre, novembre, dicembre) per i mesi primaverili (marzo, aprile, maggio); i consumi di giugno sono stati posti uguali a quelli di settembre, quelli di luglio pari a quelli di agosto.

Per un confronto, in Tabella 56 sono riportate, mese per mese, le quantità medie di soluzione nutritiva somministrata a una pianta durante il suo stazionamento sulla linea (in litri per pianta), calcolate moltiplicando i valori su base mensile di **sol** (da Tabella 13) per il tempo di stazionamento t_c corrispondente (da Tabella 21).

	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
sol. nutritiva [L/(pianta*ciclo)]	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	1,0	1,1	0,9	1,2

Tabella 56 Consumi medi di soluzione nutritiva per pianta (per ciclo colturale)

A 3.4 Stima dei **consumi di energia elettrica dei climatizzatori**

I consumi di energia elettrica stimati per il riscaldamento e il raffrescamento della serra, sono stati stimati incrociando le regole di accensione e spegnimento dei climatizzatori con i dati storici sulla temperatura interna della serra forniti dall'azienda.
Ottenute le durate di ciascun intervento di riscaldamento e raffrescamento, queste sono state moltiplicate per il numero di unità installate e per la potenza assorbita, a seconda del caso in riscaldamento o in raffrescamento, indicate sulla scheda tecnica del modello di climatizzatore di riferimento.

Il calcolo, basato su circa 300 000 record (granularità dei dati: 1 minuto), è stato effettuato con l'ausilio di un foglio di calcolo appositamente elaborato dal candidato.

RACCOLTA DATI MICROCLIMA + STIMA CONSUMI ELETTRICI **HVAC**				
SEDE	Cascina Gorrea			
SERRA	Plant800			
TUNNEL / LINEA	TUNNEL3		PERIODO	**1° AGOSTO 2021 → 31 LUGLIO 2022**
FONTE	C:\Plant800\STORICI\CLIMA\TUNNEL3			
REVISIONE	19 agosto 2022			
	I dati su temperatura **T** [° C] e umidità relativa **RH** [%] per ciascun tunnel sono rilevati circa ogni minuto e sono memorizzati in file CSV raccolti disponibili sul percorso sopra indicato.			
	Ogni foglio di lavoro corrisponde a un mese, il nome è nel formato: "AAAA_MM_TX"; ogni riga corrisponde a una rilevazione.			
		Facendo riferimento alle regole di accensione del sistema **HVAC** indicate sul computer di controllo alla data del prelievo dei dati (24 febbraio 2022) a ciascuna rilevazione sono stati associati due attributi binari ("RISC" e "RAFFR")		
	nelle colonne ↓			che riportano valore affermativo "1" se sono soddisfatte le condizioni di seguito specificate: ↓
		ON	**OFF**	
	RISCALDAMENTO	18	20	Accensione per T<18 °C, spegnimento quando T raggiunge (sale sopra) 20 °C
	RAFFRESCAMENTO	30	29	Accensione per T>30 °C, spegnimento quando T raggiunge (scende sotto) 29 °C
	I campi corrispondenti alla prima rilevazione del mese sono stati compilati manualmente (confrontando T con l'ultima rilevazione del mese precedente). Dalla seconda rilevazione del mese in poi i campi sono valorizzati automaticamente con un'apposita funzione che tiene conto di T rilevata e T dello stato precedente (il primo campo contenente la funzione è evidenziato in grassetto).			
	I dati sull'interno della serra sono calcolati a partire da quelli contenuti nel foglio del mese cui si riferiscono. Eventuali rilevazioni anomale sono state rimosse e segnalate con nota sulla cella Data corrispondente.			
	[gg, formato hh:mm:ss] 405:20 15:15			I valori nelle ultime due righe (in prossimità di medie mensili e valori limite di periodo per le altre grandezze) sono il numero di ore in cui il sistema HVAC risultava acceso secondo le regole sopra. Il valore della cella può essere richiamato in formule come se fosse espresso in parti di un giorno (p.e. 24:00 corrisponde a 1, 36:00 a 1,5 ...)

I consumi sono stimati moltiplicando la durata totali degli interventi di riscaldamento e di raffrescamento per le potenze nominali, nelle rispettive modalità di funzionamento, di un modello di climatizzatore usato come riferimento (LG DC12RH). Il risultato è poi moltiplicato per il numero di condizionatori in serra (12 unità)	# unità	Modello di riferimento	Potenza RISC [kW]	Potenza RAFFR [kW]
Se si intende modificare i valori di riferimento (a destra) usare foglio HVAC	**12**	LG DC12RH	**0,98**	**0,93**

Figura 44 Documentazione foglio di calcolo

1	Data e orario	Temperatura [° C]	RISC	RAFFR	RISC	Durata [h]	RAFFR	Durata [h]
19259	14/05/2022 18:51	29,9	0	1				0,0167
19260	14/05/2022 18:52	29,9	0	1				0,0169
19261	14/05/2022 18:53	29,9	0	1				0,0167
19262	14/05/2022 18:54	29,8	0	1				0,0164
19263	14/05/2022 18:55	29,8	0	1				0,0169
19264	14/05/2022 18:56	29,7	0	1				0,0167
19265	14/05/2022 18:57	29,7	0	1				0,0164
19266	14/05/2022 18:58	29,7	0	1				0,0167
19267	14/05/2022 18:59	29,6	0	1				0,0169
19268	14/05/2022 19:00	29,5	0	1				0,0167
19269	14/05/2022 19:01	29,4	0	1				0,0164
19270	14/05/2022 19:02	29,4	0	1				0,0169
19271	14/05/2022 19:03	29,3	0	1				0,0167
19272	14/05/2022 19:04	29,3	0	1				0,0164
19273	14/05/2022 19:05	29,3	0	1				0,0167
19274	14/05/2022 19:06	29,2	0	1				0,0169
19275	14/05/2022 19:07	29,2	0	1				0,0167
19276	14/05/2022 19:08	29,1	0	1				0,0164
19277	14/05/2022 19:09	29	0	1				0,0169
19278	14/05/2022 19:10	28,9	0	0			ON/OFF	0,0167
19279	14/05/2022 19:11	28,9	0	0				
19280	14/05/2022 19:12	28,9	0	0				
19281	14/05/2022 19:13	28,9	0	0				
19282	14/05/2022 19:15	28,9	0	0				

Figura 45 Esempio Foglio Durata interventi riscaldamento e raffrescamento

	Interno serra				
febbraio 2022	Temperatura [° C]			RISC	RAFFR
	T_min	T_med	T_max		
01/02/2022	12,7	17,8	30,3	73%	3%
02/02/2022	12,6	18,2	30,5	70%	7%
03/02/2022	12,5	17,6	30,1	71%	0%
04/02/2022	12,9	17,7	30,2	74%	1%
05/02/2022	12,6	17,4	30,2	71%	1%
06/02/2022	13,7	16,5	20	100%	0%
07/02/2022	13	18,4	30,1	69%	0%
08/02/2022	**11,5**	17,7	30,3	70%	1%
09/02/2022	12,1	18,5	30,2	62%	1%
10/02/2022	13,5	19,3	30,2	58%	1%
11/02/2022	13	17,5	30,3	74%	1%
12/02/2022	13,3	16,5	24,9	83%	0%
13/02/2022	11,6	17,5	29,3	71%	0%
14/02/2022	13,8	16,5	20,2	76%	0%
15/02/2022	13,1	17,7	29,4	75%	0%
16/02/2022	11,8	17,5	29,4	69%	0%
17/02/2022	12,8	18,6	30,7	65%	9%
18/02/2022	13,3	17,4	27,4	73%	0%
19/02/2022	14,6	18,6	29,5	67%	0%
20/02/2022	14,1	19,0	30,4	67%	5%
21/02/2022	14	19,2	30,3	64%	7%
22/02/2022	14,3	19,8	31,1	63%	11%
23/02/2022	13	19,3	**31,7**	65%	12%
24/02/2022	14,2	18,5	30,3	68%	1%
25/02/2022	12,8	18,8	30,2	65%	8%
26/02/2022	12,8	19,1	31,3	64%	10%
27/02/2022	13	18,8	30,3	65%	5%
28/02/2022	12,1	18,6	30,4	65%	7%
Medie mese	*13,0*	***18,1***	*29,3*	[gg, formato hh:mm:ss]	
Valori limite	***11,5***		***31,7***	***470:04***	***22:14***
Consumi [kWh]				5600	246

Figura 46 Esempio Foglio Sintesi su base mensile

Appendice B
Risultati d'impatto del sottosistema Serra *Plant800*

In questo paragrafo sono presentati i risultati della **valutazione degli impatti del ciclo di vita del sottosistema serra** (S0):

- rispetto all'unità funzionale dello studio principale (1 kg di lattuga idonea alla vendita) (in Tabella 29)
- rispetto a 1 m^2 a di superficie occupata[77] (unità funzionale comunemente adottata per confrontare strutture) (in Tabella 58).

I contributi dei flussi sono stati raggruppati secondo la suddivisione del sottosistema S0 descritta in § 3.2.1.1 (il contributo dovuto all'occupazione di suolo è conteggiato separatamente).

	CC kg CO_2 eq. (GWP100)	**Eu AD** kg P eq.	**Eu M** kg N eq.	**AT** kg SO_2 eq.	**Acq** m^3 acqua	**Suo** m^2 a coltivati eq.	**R Fo** kg petrolio eq.	**R Mi** kg Cu eq.
Suolo, occup.	-	-	-	-	-	6,22E-02	-	-
Fondazioni	1,93E-01	5,73E-05	3,17E-06	4,56E-04	3,69E-03	2,30E-03	2,76E-02	2,79E-03
Strutt. portante	2,73E-01	1,65E-04	1,41E-05	1,42E-03	9,91E-03	3,84E-03	5,68E-02	5,23E-03
Copertura	2,36E-01	6,87E-06	1,75E-06	5,54E-04	1,55E-03	9,39E-05	5,98E-02	5,17E-05
Serra	**7,95E-01**	**2,60E-04**	**2,15E-05**	**2,75E-03**	**1,72E-02**	**6,92E-02**	**1,63E-01**	**9,14E-03**

Tabella 57 Dettaglio risultati d'impatto Costruzione della Serra Plant800 (rispetto all'UF del sistema di prodotto oggetto del caso studio principale: 1 kg di lattuga idonea alla vendita)

	CC kg CO_2 eq. (GWP100)	**Eu AD** kg P eq.	**Eu M** kg N eq.	**AT** kg SO_2 eq.	**Acq** m^3 acqua	**Suo** m^2 a coltivati eq.	**R Fo** kg petrolio eq.	**R Mi** kg Cu eq.
Suolo, occup.	-	-	-	-	-	7,30E-01	-	-
Fondazioni	2,57E+00	7,62E-04	4,22E-05	6,06E-03	4,91E-02	3,07E-02	3,67E-01	3,71E-02
Strutt. portante	3,63E+00	2,20E-03	1,87E-04	1,89E-02	1,32E-01	5,11E-02	7,56E-01	6,96E-02
Copertura	3,14E+00	9,14E-05	2,33E-05	7,37E-03	2,07E-02	1,25E-03	7,96E-01	6,88E-04
Serra	**9,34E+00**	**3,05E-03**	**2,53E-04**	**3,23E-02**	**2,02E-01**	**8,30E-02**	**1,92E+00**	**1,07E-01**

Tabella 58 Dettaglio risultati d'impatto Costruzione della Serra Plant800 (rispetto a 1 m^2 a)

Moltiplicando per i 5520 m^2 a equivalenti alla serra i valori in Tabella 58, si ottengono i risultati d'impatto in termini assoluti, corrispondenti alla costruzione di una serra con le stesse caratteristiche di Plant800.

Categoria d'impatto intermedio	**Risultato d'impatto**	**Unità di riferimento**
CC	51 533,90	kg CO_2 eq.
Eu AD	16,84	kg P eq.
Eu M	1,40	kg N eq.
AT	178,42	kg SO_2 eq.
Acq	1 112,91	m^3 acqua
Suo	4 487,87	m^2 × anno coltivati eq.
R Fo	10 593,80	kg petrolio eq.
R Mi	592,49	kg Cu eq.

Tabella 59 Risultati d'impatto stand-alone "Costruzione della Serra *Plant800*" (368 m^2 per 15 anni di vita utile)

[77] I flussi in ingresso in S0 (vedi Tabella 6) sono stati divisi per i 5520 m^2 a equivalenti alla superficie occupata dalla serra.

Appendice C
Flussi di riferimento e risultati d'impatto per unità di prodotto

C 1 **Flussi di riferimento**

El. in ingresso	**val. medi**	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
Serra	**5,80 E-7**	come val. medi											
Mod. aerop. (Cont)	**1,74 E-6**	”											
Mod. aerop. (TS, Tub)	**8,71 E-7**	”											
Piantine	**1,05**	”											
Vasi a rete	**1,05**	”											
Soluzione nutritiva	**1,11**	1,25	1,25	1,06	1,06	1,06	0,89	0,89	0,89	1,08	1,12	0,99	1,29
Fertirrig. en. per intv.)	**7,19 E-3**	2,35 E-3	4,09 E-3	6,65 E-3	3,84 E-3	1,15 E-2	9,21 E-3	9,21 E-3	8,35 E-3	9,74 E-3	5,23 E-3	2,85 E-3	2,76 E-3
Riscaldatore sommergib.	**1,01 E-2**	4,32 E-2	4,32 E-2	2,95 E-2	0	0	0	0	0	0	0	0	4,32 E-2
Climatizzaz.	,432	1,03	,940	,629	,583	,272	,272	,318	,127	,114	,127	,216	1,08
Ventilazione	9,38 E-3	1,33 E-2	1,33 E-2	9,06 E-3	9,06 E-3	9,06 E-3	6,79 E-3	6,79 E-3	6,79 E-3	8,41 E-3	8,41 E-3	8,41 E-3	1,33 E-2
Monitorag. e controllo	2,75 E-3	3,88 E-3	3,88 E-3	2,65 E-3	2,65 E-3	2,65 E-3	1,99 E-3	1,99 E-3	1,99 E-3	2,46 E-3	2,46 E-3	2,46 E-3	3,88 E-3

Tabella 60 Flussi di riferimento (UF = 1 cespo di lattuga idoneo alla vendita)

C 2 **Risultati d’impatto**

C 2.2 **Risultati mese per mese**

	CC kg CO_2 eq. (GWP100)	**Eu AD** kg P eq.	**Eu M** kg N eq.	**AT** kg SO_2 eq.	**Acq** m^3 acqua	**Suo** m^2 a coltivati eq.	**R Fo** kg petrolio eq.	**R Mi** kg Cu eq.
gen	5,17E-01	1,75E-04	1,47E-05	3,53E-03	1,09E-02	1,94E-02	1,54E-01	1,58E-03
feb	4,80E-01	1,62E-04	1,36E-05	3,26E-03	1,02E-02	1,81E-02	1,44E-01	1,52E-03
mar	3,44E-01	1,16E-04	9,88E-06	2,26E-03	7,46E-03	1,35E-02	1,06E-01	1,27E-03
apr	3,11E-01	1,05E-04	8,98E-06	2,03E-03	6,85E-03	1,24E-02	9,68E-02	1,22E-03
mag	1,84E-01	6,21E-05	5,50E-06	1,10E-03	4,49E-03	8,09E-03	6,19E-02	1,03E-03
giu	1,82E-01	6,11E-05	5,41E-06	1,08E-03	4,27E-03	8,00E-03	6,11E-02	9,88E-04
lug	2,01E-01	6,76E-05	5,94E-06	1,22E-03	4,63E-03	8,65E-03	6,64E-02	1,02E-03
ago	1,21E-01	4,05E-05	3,74E-06	6,38E-04	3,14E-03	5,93E-03	4,43E-02	8,94E-04
set	1,17E-01	3,94E-05	3,66E-06	6,13E-04	3,26E-03	5,82E-03	4,34E-02	9,27E-04
ott	1,21E-01	4,06E-05	3,76E-06	6,37E-04	3,37E-03	5,93E-03	4,43E-02	9,41E-04
nov	1,57E-01	5,26E-05	4,73E-06	8,99E-04	3,90E-03	7,15E-03	5,42E-02	9,69E-04
dic	5,40E-01	1,82E-04	1,53E-05	3,69E-03	1,13E-02	2,01E-02	1,60E-01	1,63E-03
media anno	***2,54E-01***	***8,56E-05***	***7,41E-06***	***1,61E-03***	***5,83E-03***	***1,04E-02***	***8,11E-02***	***1,14E-03***

Tabella 61 Risultati d’impatto su base mensile (UF = 1 cespo di lattuga idoneo alla vendita)

Appendice D
Stima del contributo delle esclusioni

Proc.	Elemento	Num.	Q.tà [kg]
S0	**Bulloni, viti e tasselli** (acciaio inossidabile)		
	BULLONERIA INOX M8: 1540 lunghe, 460 corte [Agricooltur, disegno 1] Dimensioni non specificate; assunti 150 g per lunghe, 30 g per corte (cfr. OPPO)	2000	2,4 E+2
	VITI AUTOPERFORANTI 6,3 x 50 [Agricooltur, disegno 1] Massa assunta per 1 vite: 13 g, calcolata dividendo peso collo da 75 viti: 960 g (da Doja Barcelona / Amazon 2022)	900	1,2 E+1
	TASSELLI A PAVIMENTO M10 [Agricooltur, disegno 1] Massa assunta per 1 tassello: 90 g	200	1,8 E+1
	Totale		2,7 E+2
S0	**Guarnizioni**		
	150 m 1169/b [Agricooltur, disegno 1] Disegno indicativo su catalogo fornitore [Dott. Gallina b, p. 21]; dimensioni e materiale sconosciuti		-
	850 m GUARNIZIONE ANCORAL [Agricooltur, disegno 1] Dimensioni e materiale sconosciuti		-
	Totale Cifra indicativa, calcolata assumendo: gomma sintetica (ρ = 145 kg/m3), lunghezza totale 1000 m, riempimento del 20% della superficie interna di uno scatolato 60 × 60 × 3 (mm)		1,0 E+2
S0	**Staffe di collegamento** (acciaio zincato)		
	Zincate, interno scatolato [Agricooltur, disegno 1] Forme varie, dimensioni non specificate. Collegano scatolati struttura portante. Assunta massa media: 0,5 kg	506	-
	Totale		2,5 E+2
S0	**Staffe di collegamento** (alluminio verniciato)		
	Lamiere verniciate Dimensioni approssimative 270 x 1000 x 3 (mm) Assunta massa media: 2,2 kg	48	-
	Totale		9,6 E+1
S1	**Ugelli** (polibutilentereftalato)		
	Riferimento: nebulizzatore ultrafine Netafim Coolnet™ Pro [Netafim] Massa stimata: 4,3 g/pezzo (scatola da 5000 pezzi “head, one outlet”: 21,5 kg) [Netafim]. Assunta vita utile: 2 anni.	800	
	Totale per 1 modulo AeroSmart		3,4 E+0
S1	**Pompa centrifuga** Caratteristiche in Tabella 7. Assunto: 95% massa in acciaio inossidabile (corpo pompa, coperchio, giranti e diffusori in a. inox AISI 304, albero motore in a. inox AISI 431 [Pedrollo]). Assunta vita utile: 10 anni.	1	1,9 E+1
	5% massa componenti elettroniche. Vita utile: 10 anni.	1	1,0 E+0
S1	**Filtri pompa** Assunti filtri a cartuccia in polipropilene [Agribalyse 2020]. Assunta massa: 1 kg; vita utile: 4 mesi.	2	2,0 E+0

Tabella 62 Dati sulle esclusioni

Il contributo delle pompe di AeroFeed (vedi Tabella 11) è stato approssimato, considerando il 95% della loro massa “materiale principale” (acciaio inox per l’elettropompa multistadio, polivinilidenfluoruro per le pompe dosatrici), il restante 5% componenti elettroniche (in modo analogo alla pompa del modulo AeroFeed, cfr. Tabella 62).

Per valutare il contributo dovuto alla produzione dei climatizzatori è stato utilizzato il potenziale di riscaldamento globale del condizionatore con inverter, caricato con fluido refrigerante R32, analizzato in Karkour et al. 2021. La massa di 43 kg è paragonabile a quella del climatizzatore usato come riferimento per il calcolo dei consumi di energia elettrica (cfr. Tabella 15), la potenza termica di 2,6 kW è inferiore rispetto ai 3,5 kW equivalenti alle 12 000 BTU/h dei climatizzatori montati nella serra, ma l’unità funzionale dello studio è 1 m^2 a, questo permette di non dover considerare/correggere la numerosità dei condizionatori per ottenere la potenza necessaria.

Elemento	Fonte utilizzata stimare contributo a risultati d'impatto							
Bulloni, viti e tasselli	"steel production, converter, chromium steel 18/8 – RER" + "market for metal working, average for chromium steel product manufacturing – RER" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]							
Guarnizioni	"synthetic rubber production – RER" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]							
Staffe di collegamento (acciaio zincato)	"Galvanized steel sheet, at plant/kg – RNA" [Agribalyse 2020] Dati non disponibili per **Acq** e **Suo**.							
Staffe di collegamento (alluminio verniciato)	"aluminium production, primary, ingot" + "market for metal working, average for aluminium product manufacturing" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]							
Impianto elettrico	"Electricity cabling, room area m² – Italy" [OneClick LCA 2013] (dati disponibili solo per **CC**)							
	CC	**Eu AD**	**Eu M**	**AT**	**Acq**	**Suo**	**R Fo**	**R Mi**
Esclusioni S0 per 1 serra (368 m² × 15 anni)	5,36E+3	1,55E+0	-5,24E-1	1,77E+1	4,79E+1	7,03E+1	1,06E+3	1,94E+2
rispetto ai risultati d'impatto calcolati: per 1 serra (368 m² × 15 anni)	+10,4%	+9,23%	-37,5%	+9,89%	+4,30%	+1,57%	+9,99%	+32,8%
per 1 kg di lattuga	+1,2%	+1,0%	-4,1%	+0,6%	+0,5%	+0,4%	+0,7%	+9,8%
Ugelli (polibutilentereftalato)	"Polybutylene Terephthalate (PBT) Granulate, production mix, at plant, from dimethyl terephtalate and 1.4 butanediol, 1.28- 1.40 g/cm3 – EU-28+EFTA" [PEF 2019] (dati disponibili solo per **CC**) + "injection moulding – RER" (ecoInvent) [Agribalyse 2020] (che richiede 1 kg di materia prima per 0,994 kg di prodotto finito; le quantità di PBT sono state corrette di conseguenza)							
Pompa (acciaio inossidabile)	"steel production, converter, chromium steel 18/8 – RER" + "market for metal working, average for chromium steel product manufacturing – RER" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]							
Pompa (scheda elettronica)	"electronics production, for control units – RER" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]							
Pompa (trasporto)	trasporto con van (6,8 t km)							
Filtri pompa	"polypropylene production, granulate – RER" + "injection moulding – RER" (ecoInvent) [Agribalyse 2020] (che richiede 1 kg di materia prima per 0,994 kg di prodotto finito; le quantità di PP sono state corrette di conseguenza)							
	CC	**Eu AD**	**Eu M**	**AT**	**Acq**	**Suo**	**R Fo**	**R Mi**
Esclusioni S1 per 1 modulo aeroponico (flussi normalizzati per 5 anni di vita utile)	2,36E+2	1,15E-1	7,92E-3	7,17E-1	2,63E+0	5,37E+0	8,38E+1	6,63E+0
rispetto ai risultati d'impatto calcolati per 1 modulo aeropon. (flussi normalizzati per 5 anni di vita utile)	+15%	+16%	+10%	+16%	+17%	+32%	+12%	+19%
rispetto ai risultati d'impatto calcolati per 1 kg di lattuga	+0,7%	+0,9%	+0,7%	+0,3%	+0,3%	+0,4%	+0,7%	+4,0%
Pompa (acciaio inossidabile)	"steel production, converter, chromium steel 18/8 – RER" + "market for metal working, average for chromium steel product manufacturing – RER" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]							
Pompa (scheda elettronica)	"electronics production, for control units – RER" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]							
Pompe dosatrici (polivinilidenfluoruro)	"Polyvinylidene fluoride (PVDF), production mix, at plant, polymerisation of vinyl fluoride, 1.76 g/cm3" [PEF 2019] (dati disponibili solo per **CC**)							
Pompe dosatrici (schede elettroniche)	"electronics production, for control units – RER" (ecoInvent) [Agribalyse 2020]							
Climatizzatori	Climatizzatore con inverter (solo dati per **CC**) GWP/(m²a) del sistema "IDN26YES" (miglior approssimazione disponibile) (limitatamente a "Materials/parts", "Production Manufacturing" e "Distribution") [Karkour et al. 2021]							
	CC	**Eu AD**	**Eu M**	**AT**	**Acq**	**Suo**	**R Fo**	**R Mi**
Altre esclusioni per 1 serra (flussi normalizzati per 15 anni di vita utile)	3,59E+3	5,91E-1	2,64E-2	1,72E+0	1,12E+1	9,16E+0	9,20E+1	2,30E+1
rispetto ai risultati d'impatto calcolati: per 1 serra (368 m² × 15 anni)	6,96%	3,51%	1,89%	0,97%	1,00%	0,20%	0,87%	3,88%
rispetto ai risultati d'impatto calcolati per 1 kg di lattuga	0,8%	0,4%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	1,2%
TOTALE ESCLUSIONI (rispetto ai risultati calcolati per 1 kg di lattuga)	**1,60E-1 (+2,7%)**	**4,80E-5 (+2,4%)**	**-5,48E-6 (-3,2%)**	**3,81E-4 (+1,0%)**	**1,23E-3 (+0,9%)**	**1,96E-3 (+0,8%)**	**2,94E-2 (+1,6%)**	**4,04E-3 (+15%)**

Tabella 63 Stima del contributo delle esclusioni ai risultato d'impatto

Bibliografia e sitografia

Saggi e pubblicazioni scientifiche

Acheampong, P., Quain, M., Appiah-Kubi, D., Osei-Adu, J., Ennin, S., & Osei, K. (2020). Economics analysis of Seed Yam production in Aeroponic system. *Journal of Agribusiness and Rural Development*, 56(2), 125-132. <https://doi.org/10.17306/J.JARD.2020.01290>

Aighewi, B.A., Maroya, N., Kumar, P.L., Balogun, M., Aihebhoria, D., Mignouna, D., Asiedu, R. (2021). Seed Yam Production Using High-Quality Minitubers Derived from Plants Established with Vine Cuttings. *Agronomy*, 11, 978. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050978>

AlShrouf, A. (2017). Hydroponics, Aeroponic and Aquaponic as Compared with Conventional Farming. *American Academic Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences*, 27(1), 247–255. <https://asrjetsjournal.org/index.php/American_Scientific_Journal/article/view/2543>

Antón, A., Torrellas, M., Raya, V., & Montero, J. I. (2014). Modelling the amount of materials to improve inventory datasets of greenhouse infrastructures. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *19*(1), 29-41. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0607-z>

Armanda, D. T., Guinée, J. B., & Tukker, A. (2019). The second green revolution: Innovative urban agriculture's contribution to food security and sustainability–A review. *Global Food Security*, 22, pp. 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.08.002>

Balogun, M., Maroya, N. & Asiedu, R. (2014). Seed yam production in an aeroponics system: a novel technology. Yam Improvement for Income and Food Security. In *West Africa Working Paper Series 2*. International Institute of Tropical Agriculture. Ibadan, Nigeria. ISBN 978-978-8444-37-4. <https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/87918/U14BkMaroyaSeedNothomNodev.pdf>

Barla, S., Salachas, G., & Abeliotis, K. (2020). Assessment of the greenhouse gas emissions from aeroponic lettuce cultivation in Greece. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 5, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1007/s41207-020-00168-w>

Bartzas, G., Zaharaki, D. & Komnitsas, K. (2015). Life cycle assessment of open field and greenhouse cultivation of lettuce and barley. *Information Processing in Agriculture*, *2*(3-4), pp. 191-207. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.10.001>

Battaglia, D. (2017). Aeroponic gardens and their magic: Plants/persons/ethics in suspension. *History and Anthropology*, 28:3, 263-292. <http://dx.doi.org/10.1080/02757206.2017.1289935>

Benke, K. & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13:1, pp. 13-26. <https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054>

Bouis, H. E., Hotz, C., McClafferty, B., Meenakshi, J. V., Pfeiffer W. H. (2011). Biofortification: A New Tool to Reduce Micronutrient Malnutrition. *Food and Nutrition Bulletin*. 32(1), pp. S31-S40. <https://doi.org/10.1177/15648265110321S105>

Casey, L., Freeman, B., Francis, K., Brychkova, G., McKeown, P., Spillane, C., ... & Styles, D. (2022). Comparative environmental footprints of lettuce supplied by hydroponic controlled-environment agriculture and field-based supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 369, 133214. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133214>

Chajra, H., Salwinski, A., Guillaumin, A., Mignard, B., Hannewald, P., Duriot, L., Warnault, P., Guillet-Claude, C., Fréchet, M. & Bourgaud, F. (2020). Plant Milking Technology – An Innovative and Sustainable Process to Produce Highly Active Extracts from Plant Roots. *Molecules*, 25(18), 4162. <https://doi.org/10.3390/molecules25184162>

Chandra, S., Khan, S., Avula, B., Lata, H., Yang, M. H., ElSohly, M. A. & Khan, I. A. (2014). Assessment of total phenolic and flavonoid content, antioxidant properties, and yield of aeroponically and conventionally grown leafy vegetables and fruit crops: A comparative study. *Evidence-based complementary and alternative medicine*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/253875>

Del Valle-Echevarria, A.R.; Kantar, M.B.; Branca, J.; Moore, S.; Frederiksen, M.K.; Hagen, L.; Hussain, T.; Baumler, D.J. (2019). Aeroponic Cloning of Capsicum spp. *Horticulturae*, 5, 30. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5020030>

Despommier, D. (2009). L'agricoltura verticale. Trad. it.: Crocé, M.; Muscolino, F. <https://web.archive.org/web/20090219220332/http://verticalfarm.com/PDF/VF-Essay_Italian.pdf> (ed. orig. The Vertical Farm: Reducing the impact of agriculture on ecosystem functions and services).
[Copia Internet Archive: <https://web.archive.org/web/20100112110337/http://www.verticalfarm.com/essay_print.htm>]

Eldridge, B.M., Manzoni, L.R., Graham, C.A., Rodgers, B., Farmer, J.R. and Dodd, A.N. (2020), Getting to the roots of aeroponic indoor farming. *New Phytologist*, 228, pp. 1183-1192. <https://doi.org/10.1111/nph.16780>

Ferrini, F., Fraternale, D., Donati Zeppa, S., Verardo, G., Gorassini, A., Carrabs, V., Albertini, M.C. & Sestili, P. (2021). Yield, characterization, and possible exploitation of Cannabis sativa L. roots grown under aeroponics cultivation. *Molecules*, 26(16), 4889 <https://doi.org/10.3390/molecules26164889>

Gargiulo, A., Carvalho, M. L., & Girardi, P. (2020). Life cycle assessment of Italian Electricity Scenarios to 2030. *Energies*, *13*(15), 3852. <https://doi.org/10.3390/en13153852>

Gavira, C., Watteau, F., Lainé, J.-M., Bourgaud, F., Legendre, L. (2022). Evaluation of Vetiver Volatile Compound Production under Aeroponic-Grown Conditions for the Perfume Industry. *Molecules*, 27(6), 1942. <https://doi.org/10.3390/molecules27061942>

Gimenez-Escalante, P. & Rahimifard, S. (2018). Challenges in implementation of a distributed and localised approach to food manufacturing. *Food Studies: An Interdisciplinary Journal*, 8 (3), pp. 1-14. <http://doi.org/10.18848/2160-1933/CGP/v08i03/1-14>

Goldstein, H. (2018). The green promise of vertical farms (Blueprints for a Miracle). IEEE Spectrum, 55(6), pp. 50-55. <https://sci-hub.ru/10.1109/MSPEC.2018.8362229>

Gopinath, P., Vethamoni, P. I., & Gomathi, M. (2017). Aeroponics soilless cultivation system for vegetable crops. Chemical Science Review and Letters, 6(22), pp. 838-849.

He, J., Qin, L. & Lee, S. K. (2013). Root-zone CO2 and root-zone temperature effects on photosynthesis and nitrogen metabolism of aeroponically grown lettuce (Lactuca sativa L.) in the tropics. *Photosynthetica*, 51(3), 330-340. <http://ps.ueb.cas.cz/pdfs/phs/2013/03/02.pdf>

Karkour, S.; Ihara, T.; Kuwayama, T.; Yamaguchi, K.; Itsubo, N. (2021). Life Cycle Assessment of Residential Air Conditioners Considering the Benefits of Their Use: A Case Study in Indonesia. *Energies*, *14*, 447. <https://doi.org/10.3390/en14020447>

Khan, M. M., Akram, M. T., Janke, R., Qadri, R. W. K., Al-Sadi, A. M. & Farooque, A. A. (2020). Urban horticulture for food secure cities through and beyond COVID-19. *Sustainability*, *12*(22), 9592. <https://doi.org/10.3390/su12229592>

Kovačić, T. & Andričić, B. (2005). Suspension grade poly (vinyl chloride) and hazards of its production. *Polimeri: časopis za plastiku i gumu*, *26*(3), pp. 128-132. <https://hrcak.srce.hr/clanak/2545>

Lakhiar, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A. & Buttar, N. A. (2018 **a**). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of Plant Interactions*, 13(1), pp. 338-352. <https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1472308>

Lakhiar, I. A., Jianmin, G., Syed, T. N., Chandio, F. A., Buttar, N. A., & Qureshi, W. A. (2018 **b**). Monitoring and control systems in agriculture using intelligent sensor techniques: A review of the aeroponic system. *Journal of Sensors*. <https://doi.org/10.1155/2018/8672769>

Lakhiar, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., Tunio, M. H., Ahmad, F. & Solangi, K. A. (2020). Overview of the aeroponic agriculture–An emerging technology for global food security. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13(1), pp. 1-10. <https://www.ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/5156/pdf>

Li, Q., Li, X., Tang, B. & Gu, M. (2018). Growth responses and root characteristics of lettuce grown in aeroponics, hydroponics, and substrate culture. *Horticulturae*, 4(4), 35.

Mangaiyarkarasi, R. (2020). Aeroponics system for production of horticultural crops. *Madras Agricultural Journal*, 107.
[Copia su Internet Archive: <https://web.archive.org/web/20210428091829id_/http://masujournal.org/107/190341.pdf>].

Mbiyu, M. W., Muthoni, J., Kabira, J., Elmar, G., Muchira, C., Pwaipwai, P., Ngaruiya, J., Otieno, S. & Onditi, J. (2012). Use of aeroponics technique for potato (Solanum tuberosum) minitubers production in Kenya. *Journal of Horticulture and Forestry*. <https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/66549/76745.pdf>

Mobini, S. H., Ismail, M. R., & Aroiuee, H. (2015). The impact of aeration on potato (Solanum tuberosum L.) minituber production under soilless conditions. *African Journal of Biotechnology*, 14(11), pp. 910-921.

Mouroutoglou, C., Kotsiras, A., Ntatsi, G., & Savvas, D. (2021). Impact of the Hydroponic Cropping System on Growth, Yield, and Nutrition of a Greek Sweet Onion (Allium cepa L.) Landrace. *Horticulturae*, 7(11), 432.

Movahedi, Z., & Rostami, M. (2020). Production of some medicinal plants in aeroponic system. *Journal of Medicinal Plants and By-product*, 9(1), pp. 91-99.

NASA (2006). Progressive Plant Growing Has Business Blooming. In *Spin-Off* 2006, pp. 64-67. <https://www.nasa.gov/pdf/164449main_spinoff_06.pdf>.
[Copia Internet Archive:
<https://web.archive.org/web/20070116235115/https://www.nasa.gov/pdf/164449main_spinoff_06.pdf>]

Popp, J., Lakner, Z., Harangi-Rakos, M., & Fari, M. (2014). The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment. *Renewable and sustainable energy reviews*, 32, pp. 559-578.

Puccinelli, M., Landi, M., Maggini, R., Pardossi, A., Incrocci, L. (2021). Iodine biofortification of sweet basil and lettuce grown in two hydroponic systems. *Scientia Horticulturae*, 276.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109783>

Puccinelli, M., Pardossi, A., Incrocci, L. (2021). La coltivazione aeroponica. Accademia dei Georgofili. <https://www.georgofili.it/Media?c=b86e77d0-6774-413f-9378-94bf68c7247a>

Romero-Gámez, M., Audsley, E., & Suárez-Rey, E. M. (2014). Life cycle assessment of cultivating lettuce and escarole in Spain. *Journal of cleaner production*, 73, pp. 193-203. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.053>

Sala, S., Farioli, F. & Zamagni, A. (2013). Life cycle sustainability assessment in the context of sustainability science progress (part 2). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18, 1686–1697. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0509-5>

Sanyé-Mengual, E., Orsini, F., Oliver-Solà, J., Rieradevall, J., Montero, J. I., & Gianquinto, G. (2015). Techniques and crops for efficient rooftop gardens in Bologna, Italy. *Agronomy for sustainable development*, *35*(4), 1477-1488. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0331-0>

Selvaraj, M. G., Montoya-P, M. E., Atanbori, J., French, A. P., & Pridmore, T. (2019). A low-cost aeroponic phenotyping system for storage root development: unravelling the below-ground secrets of cassava (Manihot esculenta). *Plant Methods*, 15(1), pp. 1-13. <https://doi.org/10.1186/s13007-019-0517-6>

Stibilj, V., Smrkolj, P., Jacimovic, R. & Osvald, J. (2011). Selenium uptake and distribution in chicory (Cichorium intybus L.) grown in an aeroponic system. *Acta agriculturae Slovenica*, 97(3), 189. [Copia Internet Archive: <https://web.archive.org/web/20200711152922/https://aas.bf.uni-lj.si/september2011/03stibilj.pdf>]

Strazza, C., Del Borghi, A., Magrassi, F., & Gallo, M. (2016). Using environmental product declaration as source of data for life cycle assessment: a case study. *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.058>

Souret, F. F. & Weathers, P. J. (2000). The growth of saffron (Crocus sativus L.) in aeroponics and hydroponics. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 7(3), 25-35. <https://doi.org/10.1300/J044v07n03_04>

Tunio, M. H., Gao, J., Shaikh, S. A., Lakhiar, I. A., Qureshi, W. A., Solangi, K. A. & Chandio, F. A. (2020). Potato production in aeroponics: An emerging food growing system in sustainable agriculture for food security. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 80(1), pp. 118-132. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392020000100118>

Wagner, R. E., & Wilkinson, H. T. (1992). An aeroponics system for investigating disease development on soybean taproots infected with Phytophthora sojae. *Plant disease*, 76(6), 610-614. <https://www.apsnet.org/publications/PlantDisease/BackIssues/Documents/1992Articles/PlantDisease76n06_610.pdf>

Wasilewska-Nascimento, B.; Boguszewska-Mańkowska, D.; Zarzyńska, K. (2020). Challenges in the Production of High-Quality Seed Potatoes (Solanum tuberosum L.) in the Tropics and Subtropics. *Agronomy* 10, 260. https://doi.org/10.3390/agronomy10020260

Wimmerova, L., Keken, Z., Solcova, O., Bartos, L., & Spacilova, M. (2022). A Comparative LCA of Aeroponic, Hydroponic, and Soil Cultivations of Bioactive Substance Producing Plants. *Sustainability*, *14*(4), 2421. <https://doi.org/10.3390/su14042421>

Yuvaraj, M., Subramanian, K. S. (2016). Prospects of Aeroponics in Agriculture. *Advances in Life Sciences*, 5(11), pp. 4352-4362. <https://www.researchgate.net/profile/M-Yuva-Raj/publication/330925818_Prospects_of_Aeroponics_in_Agriculture/links/5e778f0da6fdcccd6218fa36/Prospects-of-Aeroponics-in-Agriculture.pdf>

Zobel, R. W., Del Tredici, P. & Torrey, J. G. (1976). Method for growing plants aeroponically. *Plant Physiology*, 57(3), 344-346.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC542022/pdf/plntphys00157-0006.pdf>

Libri e manuali

Commissione Europea, Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability (2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. Publications Office of the European Union. Lussemburgo. ISBN 978-92-79-19092-6. <https://data.europa.eu/doi/10.2788/38479>

Commissione Europea, Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability (2011). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. Publications Office of the European Union. Lussemburgo. ISBN 978-92-79-17451-3.
<https://data.europa.eu/doi/10.2788/33030>

Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., Irving Olsen, S. et alii (2018). Life Cycle Assessment: Theory and Practice. Springer. ISBN 978-3-319-56475-3. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>

Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M., ... & van Zelm, R. (2017). ReCiPe 2016 v1.1a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: characterization. RIVM Report 2016-0104a. National Institute for Public Health and the Environment RIVM. Bilthoven, Paesi Bassi.

Minuto, A. & Garibaldi (2004). Disinfezione delle acque e delle soluzioni nutritive.
In ARSIA (2004). Quaderno 4/2004. *Uso razionale delle risorse nel florovivaismo: L'acqua*.
<https://www.clamerinforma.it/ARSIA/PROGETTO_ARSIA_Indice.htm>. URL consultato il 17 maggio 2022.
[Copia Internet Archive:
https://web.archive.org/web/20180501013648/https://www.clamerinforma.it/ARSIA/Schede_acqua/Arsia_Capitolo_XXI.pdf]

Otazú, V. (2010). Manual on quality seed potato production using aeroponics. International Potato Center (CIP), Lima, Perù. ISBN 978-92-9060-392-4.

[SoCA 2021] Boehm, S., Lebling, K., Levin, K., Fekete, H., Jaeger, J., Waite, R., Nilsson, A., Thwaites, J., Wilson, R., Geiges, A., Schumer, C., Dennis, M., Ross, K., Castellanos, S., Shrestha, R., Singh, N., Weisse, M., Lazer, L., Jeffery, L., Freehafer, L., Gray, E., Zhou, L., Gidden, M. & Gavin, M. (2021). ***S**tate **o**f **C**limate **A**ction 2021: Systems Transformations Required to Limit Global Warming to 1.5°C*. World Resources Institute. Washington, D.C., Stati Uniti d'America <https://doi.org/10.46830/wrirpt.21.00048>

Tassinari et alii (2020). Manuale dell'agronomo. REDA, Il Capitello ISBN 978-8-883-61325-8.

Tesi, R. (2002). Colture fuori suolo in orticoltura e floricoltura. EdAgricole. Ristampa 1ª ed. (2017). ISBN-88-506-4834-0.

Valli R. & Schiavi, S. (2000). Coltivazioni arboree. EdAgricole. 2ª ed. ISBN-88-206-3109-1.

Walker, H. F., Elshennawy, A. K., Gupta, B. C. & Mcshane-Vaughn, M. et alii (2019). *The certified quality inspector handbook*. Quality Press. ISBN-978-1-951-05873-9.

Relazioni e **atti** di **convegni** e **conferenze**

AgriPonic (2016). Le possibili culture in aeroponica. Progetto AgriPonic: Promozione e diffusione della tecnologia aeroponica in agricoltura. Manouba, Tunisia, 22-26 agosto 2016. <http://www.agriponic.eu/attachments/article/80/Possibili%20colture_aeroponiche.pdf>. URL consultato il 14 dicembre 2021.

Ali, M. M., Khater, E. G., Ali, S. A. & El-Haddad, Z. A. (2015). Comparison between hydroponic and aeroponic systems for lettuce production. The 20th Annual Conference of Misr Soc. of Ag. Eng. Egitto, 12 dicembre 2015. <https://www.researchgate.net/publication/317561671_COMPARISON_BETWEEN_HYDROPONIC_AND_AEROPONIC_SYSTEMS_FOR_LETTUCE_PRODUCTION>

Awalina, R., Erona, M. & Rusnam (2022). Lettuce (Lactuca sativa L) Growth in Aeroponic Systems with Differences in Nutritional Time. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1059/1/012014>

Biblioteca, I., Rossitti, I., Sambucci, M., Valente, M. (2022). Nickel intolerance disease: surface modification of a zeolite for direct human assumption and cultivation eco-sustainable strategy. SYNC 2022. Roma, 20-23 giugno 2022.

Boniforte, A. (2021). Intervento in Iniziamo l'impresa! #4 Innovazione, tradizione e territorio. I3P – Incubatore del Politecnico di Torino. Torino, 21 gennaio 2021.

Carvalho, M. L., Marmiroli, B. & Girardi, P. (2022). Life cycle assessment of Italian electricity production and comparison with the European context. The 8th International Conference on Energy and Environment Research ICEER 2021. 13-17 settembre 2021.
In *Energy Reports*, *8*, 561-568. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.252>

Komosa, A. (2004). Aeroponiczna uprawa roślin ogrodniczych. X Ogólnopolskie Sympozjum Naukowe Efektywność stosowania nawozów w uprawach ogrodniczych, Kraków, pp. 17-18.

Tittarelli, F. & Ortolani, L. (2014). La coltivazione fuori suolo in agricoltura biologica: aspetti tecnici e normativi. VIVAINBIO. [Copia Internet Archive: <https://web.archive.org/web/20180219131410/https://www.sinab.it/sites/default/files/C1_Finale%20fuori%20suolo_Progetto%20Vivainbio.pdf>]

Articoli, **documenti** e **rapporti** di istituzioni pubbliche e organizzazioni governative

[EPA 2017] UN Environmental Protection Agency (2017). Climate Impacts on Agriculture and Food Supply. <https://19january2017snapshot.epa.gov/climate-impacts/climate-impacts-agriculture-and-food-supply_.html>

FAO (1996). Rome Declaration on World Food Security and World Food Summit Plan of Action: World Food Summit 13-17 November 1996, Rome, Italy. ISBN 92-510-3939-9. <https://digitallibrary.un.org/record/195568>

FAO (2015). La salute dei suoli rappresenta la base per una produzione alimentare sana. <https://www.fao.org/3/i4405o/i4405o.pdf>

FAO (2021). Global assessment of soil pollution. Summary for policy makers. <https://doi.org/10.4060/cb4827en>

ONU (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. <https://sdgs.un.org/publications/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development-17981>

UNICEF. Water scarcity. <https://www.unicef.org/wash/water-scarcity> URL consultato il 1° novembre 2022. [Copia Internet Archive: <https://web.archive.org/web/20221026234207/https://www.unicef.org/wash/water-scarcity>]

UNICEF & OMS (2021). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: five years into the SDGs. Ginevra, Svizzera. ISBN 978-92-4-003084-8.

Enciclopedie e **vocabolari**

Britannica (-Encyclopedia) **a**. Irrigation. <https://www.britannica.com/technology/irrigation>

Britannica **b**. Eutrophication. <https://www.britannica.com/science/eutrophication/>

Dadykin, V. P. (1978). Aèroponika. <*Аэропоника*>. In *Bol'šoj Sovetskoj Èniklopedii* <*Большая советская энциклопедия*>. 3ª ed. <http://bse.sci-lib.com/article085858.html>. URL consultato il 27 ottobre 2022. [Copia Internet Archive: <https://web.archive.org/web/20080821192150/http://bse.sci-lib.com/article085858.html>]

Treccani **a**. Substrato. In *Vocabolario Treccani*. <https://www.treccani.it/vocabolario/substrato/>

Treccani **b**. Rizosfera. In *Vocabolario Treccani*. <https://www.treccani.it/vocabolario/rizosfera/>

[Treccani **c**] Cortesi, F. (1933). Igname. In Treccani (1933). *Enciclopedia italiana*. <https://www.treccani.it/enciclopedia/igname_%28Enciclopedia-Italiana%29/>

Treccani **c** *bis*. Igname. In *Vocabolario Treccani*. <https://www.treccani.it/vocabolario/igname/>

[Wikipedia **a**] Wikipedia contributors (2022). Growroom. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Versione del 12 ottobre 2022. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Growroom&oldid=1115628626>

[Wikipedia **b**] Contributori di Wikipedia (2022). Bins. In *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. Versione del 29 maggio 2022. <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Bins&oldid=127582311>

Norme

ISO (2006 **a**). ISO 14040:2006. Environmental management. Life cycle assessment: Principles and framework.

ISO (2006 **b**). ISO 14044:2006. Environmental management. Life cycle assessment: Requirements and guidelines.

UNI (2006). UNI EN ISO 14040:2006 Gestione ambientale. Valutazione del ciclo di vita: Principi e quadro di riferimento. Versione bilingue del dicembre 2007. In *Codice di Ambiente e Sicurezza*. Il Sole 24 ore (2010).

Brevetti

Divià, B., Boniforte, A., Baglione, G., Ferrero, S. & Tosco, V. (2019). Modular aeroponic system for cultivating, transporting and exposing plant products (Brevetto europeo n. EP 3 649 849 B1). Ufficio europeo dei brevetti. Su Google Patent: <https://patents.google.com/patent/EP3649849B1> [Copia Internet Archive: <https://web.archive.org/web/20221101113844/https://patentimages.storage.googleapis.com/18/1a/a7/a8712c6b42045a/EP3649849B1.pdf>]

Salachas, G. (2012). Automated aeroponic plant growing system / Πληρως αυτοματοποιημενο συστημα αεροπονικης καλλιεργειας φυτων (Brevetto greco n. GR 1008102B). Οργανισμός Βιομηχανικής Ιδιοκτησίας. Su Google Patent: <https://patents.google.com/patent/GR1008102B>.

Tesi di **laurea** e di **dottorato**

Antón, A. (2004). Utilización del análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Directors: Castells, F., Montero, J. I. Universitat Politècnica De Catalunya. Barcellona, Spagna.

Iliev, I. (2021). Commercial system for soilless production of Pharmaceutical plants. Vysoká škola ekonomická v Praze / University of Economics, Prague – Business Administration. Praga, Repubblica Ceca.

Riva, C. (2021). Studio di un sistema di climatizzazione per serre adibite a colture aeroponiche. Relatore: Masoero, M. C.; correlatore: Tosi, G. Politecnico di Torino.

Dispense universitarie

De Lucia, B. (2018 a). Cenni sui sistemi di coltivazione senza suolo in orticoltura. Università degli Studi di Bari Aldo Moro.

De Lucia, B. (2018 b). Classificazione degli ortaggi. Università degli Studi di Bari Aldo Moro.

Pulselli. Life Cycle Thinking & LCA (a.a. 2020/2021). Scuola di Economia e Management. Università degli Studi di Siena.

Articoli e **rapporti** di banche e società di consulenza

Barclays (2020). Vertical Farming: Green agriculture on the rise. 9 aprile 2020. <https://www.cib.barclays/our-insights/vertical-farms-green-agriculture-on-the-rise.html>. URL consultato il 28 dicembre 2021.

Gupta, M.K. & Ganapuram, S. (2019). Vertical farming using Information and communication Technologies. Infosys.
<https://www.infosys.com/industries/agriculture/insights/documents/vertical-farming-information-communication.pdf>

Articoli di giornali e riviste online

Bianchini, R. (2021). The word[sic]'s largest rooftop urban farm sits on top of a Paris building.
In *Inexhibit*, 3 luglio 2021. <https://www.inexhibit.com/case-studies/the-words-largest-rooftop-urban-farm-sits-on-top-of-a-paris-building/>. URL consultato il 10 gennaio 2022.
[Copia Internet Archive: <https://web.archive.org/web/20220117033133/https://www.inexhibit.com/case-studies/the-words-largest-rooftop-urban-farm-sits-on-top-of-a-paris-building/>]

Cattivello, C., Matiussi, A., Valent, E., Capone, F., Petris, R. (2016). Si fa presto a dire lattughe. In *Notiziario dell'Agenzia regionale per lo Sviluppo Rurale del Friuli-Venezia Giulia*, 2016(1), pp. 31-33. <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:zqWWM_39B4IJ:www.ersa.fvg.it/export/sites/ersa/aziende/in-formazione/notiziario/allegati/2016/1/Lattughe.pdf>.

Codignola, A. (2020). Vertical farming in continua crescita, ma c'è ancora lavoro da fare per migliore l'aeroponica. I sette punti da indagare. Ne *Il fatto alimentare*, 24 luglio 2020. <https://ilfattoalimentare.it/vertical-farming-aeroponica.html>. URL consultato il 7 febbraio 2022.

CIP (2014). The sustainability of aeroponics. <https://cipotato.org/press_room/blogs/the-sustainability-of-aeroponics/>

FAO (2019). Can we ditch intensive farming - and still feed the human race? Sustainable agricultural solutions to meet food demands. In *FAO Global Soil Partnership*, 4 febbraio 2019. <https://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/en/c/1179073/>. URL consultato il 30 dicembre 2021.

FAO (2020). How a visionary in Rwanda is growing potatoes in the air. Innovative aeroponic systems help tackle some traditional challenges for agriculture. In *FAO Stories*, 27 novembre 2020. <https://www.fao.org/faostories/article/en/c/1332933/> URL consultato il 12 novembre 2021. [Copia su Internet Archive: https://web.archive.org/web/20210927130328/https://www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1332933/]

Harvey, F. (2019). Can we ditch intensive farming - and still feed the world? In *The Guardian*, 28 gennaio 2019. <https://www.theguardian.com/news/2019/jan/28/can-we-ditch-intensive-farming-and-still-feed-the-world>. URL consultato il 30 dicembre 2021.

Iannuziello, V. (2021). FruitHydroSinni: Coltivazione idroponica: Da un problema familiare a un vero e proprio business. In *Fresh Plaza*, 19 febbraio 2021. <https://www.freshplaza.it/article/9295051/brevetto-vincente-di-coltivazione-idroponica-ora-a-disposizione-di-tutti/>. URL consultato il 10 gennaio 2022.

Kite-Powell, J. (2022). Five Trends Farmers And Tech Companies Are Betting The Farm On.
In *Forbes*, 26 gennaio 2022. <https://www.forbes.com/sites/jenniferhicks/2022/01/26/five-trends-farmers-and-tech-companies-are-betting-the-farm-on/>. URL consultato il 5 febbraio 2022.

Mercuri, M. (2020). Conflitti del futuro, guerre per l'acqua. In *Treccani Atlante*, 13 agosto 2020. <https://www.treccani.it/magazine/atlante/geopolitica/Conflitti_futuro_guerre_acqua.html>. URL consultato l'11 gennaio 2022.

Milman, O. (2021). World is failing to make changes needed to avoid climate breakdown, report finds. In *The Guardian*, 28 ottobre 2021. <https://www.theguardian.com/environment/2021/oct/28/world-failing-make-changes-avoid-climate-breakdown-report>. URL consultato il 17 dicembre 2021.

[MIT 2014] Roberts, A. G. (2014). Predicting the future of global water stress. In ***M**assachusetts **I**nstitute of **T**echnology News*, 9 gennaio 2014. <https://news.mit.edu/2014/predicting-the-future-of-global-water-stress> URL consultato il 1° novembre 2022.

Repko, M. (2022). Walmart makes an investment in vertical farming start-up Plenty. In *CNBC*, 25 gennaio 2022. <https://www.cnbc.com/2022/01/25/walmart-makes-an-investment-in-vertical-farming-start-up-plenty.html>. URL consultato il 16 febbraio 2022.

S., C. (2021). Le piante possono diventare biofabbriche naturali per produrre vaccini contro il Covid. In *Teatro Naturale*, 25 febbraio 2021. <https://www.teatronaturale.it/strettamente-tecnico/bio-e-natura/35519-le-piante-possono-diventare-biofabbriche-naturali-per-produrre-vaccini-contro-il-covid.htm>. URL consultato il 15 febbraio 2022.

[UNRIC 2020]. United Nations Regional Information Center for Western Europe (2020). UN 75 – I grandi temi: Una demografia che cambia. In *Centro Regionale di Informazione delle Nazioni Unite* – italiano, 14 febbraio 2020. <https://unric.org/it/un-75-i-grandi-temi-una-demografia-che-cambia/>. URL consultato il 31 ottobre 2022.

Zordan, A. (2018). Idroponica. 5 critiche frequenti (smontate una a una). In *Gambero Rosso*, 27 settembre 2018. <https://www.gamberorosso.it/notizie/articoli-food/idroponica-5-critiche-frequenti-smontate-una-a-una/>. URL consultato il 9 gennaio 2022.

Software e documentazione

Greendelta (2020). Database Notes - Agribalyse 3.0. Aggiornato al 3 giugno 2020. <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2020/06/Factsheet_Agribalyse-v3.0.pdf>. URL consultato il 4 luglio 2022.

Greendelta (2022 **a**). OpenLCA versione 1.11. Rilasciato il 9 febbraio 2022. <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2022/02/openLCA_win64_1.11.0_2022-02-09.exe>. URL consultato l'11 agosto 2022.

Greendelta (2022 **b**). OpenLCA *LCIA methods* versione 2.1.3. Aggiornato il 28 aprile 2022. <https://nexus.openlca.org/database/openLCA%20LCIA%20methods >. URL consultato il 10 settembre 2022.

Srocka, M., Cashman, S., Edelen, A., Young, B., Ciroth, A., Ingwersen, W. (2020). Flow Mapping in openLCA. Greendelta. <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2020/06/General-openLCA-Mapping-Instructions_05182020.pdf>. URL consultato il 31 agosto 2022.

Documentazione fonti Life Cycle Inventory

[Agribalyse 2020] <https://agribalyse3.site.ademe.fr/>; <https://nexus.openlca.org/database/Agribalyse>

[EAA 2018] European Aluminium Association (2018). Environmental Profile Report. Life-Cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. <https://www.european-aluminium.eu/media/3322/european-aluminium_environmental-profile-report-2018_full-version.pdf>. Dati aggiuntivi allegati a comunicazione personale del 19 maggio 2022 (per cui si ringrazia Djibril René, European Aluminium Association).

[ecoInvent **a**] Werner, F. "market for concrete, normal, CH". In ecoInvent 3.8. <https://v38.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/cf17f1b6-8e75-4ede-8155-0945dfdfd171/8b738ea0-f89e-4627-8679-433616064e82>

[ecoInvent **b**] Treyer, K. "electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si, GLO". In ecoInvent 3.5. <https://v35.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/703224ea-236d-4911-b576-15f950ee25fc/8b738ea0-f89e-4627-8679-433616064e82>

[ecoInvent **c**] “market for lettuce, GLO”.
In ecoInvent 3.6. <https://v36.ecoquery.ecoinvent.org/Details/LCIA/b2682054-3e59-4c85-9c04-c2b3203bf275/06590a66-662a-4885-8494-ad0cf410f956>

[ecoInvent 2007] Kellenberger, D., Althaus, H.-J., Jungbluth, N., Künniger, T., Lehmann, M. & Thalmann P. (2007). Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent Data v2.0 No. 7. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, Svizzera.

Moreno Ruiz, E., Valsasina, L., Fitzgerald, D., Brunner, F., Vadenbo, C., Bauer, C., ... & Wernet, G. (2017). Documentation of changes implemented in the ecoinvent database v3.4. ecoinvent. <https://ecoinvent.org/wp-content/uploads/2020/08/change_report_v3_4_20171004_1.pdf>. URL consultato l’8 settembre 2022.

Nemecek, T., Bengoa, X., Lansche, J., Roesch, A., Faist-Emmenegger, M., Rossi, V., ... & Riedener, E. (2019). World Food LCA Database. SimaPro. <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/11/WFLDB_MethodologicalGuidelines_v3.5.pdf>.

[OneClickLCA 2013] One Click LCA Ltd. “Electricity cabling, room area m^2 (IT)”. In https://oneclicklcaapp.com/

[PEF 2019] https://nexus.openlca.org/database/Environmental%20Footprints

[Plastics Europe 2019 **a**] <https://plasticseurope.lca-data.com/showProcess.xhtml?uuid=acf81ba2-1ebb-4150-9b26-06d8e2c6be10&stock=default>. URL consultato il 14 marzo 2022.

[Plastics Europe 2019 **b**] <https://plasticseurope.lca-data.com/showProcess.xhtml?uuid=5f5bdf35-a41c-4c95-8737-943b5ee4f234&stock=default>. URL consultato il 25 marzo 2022.

[Plastics Europe 2019 **c**] https://plasticseurope.lca-data.com/showProcess.xhtml?uuid=0a149b76-27a3-4209-9b00-0207ca1a44a2&stock=default>. URL Consultato il 29 agosto 2022.

World Steel Association (2020). LCI Data for Steel Products. Dati allegati a comunicazione personale del 26 aprile 2022 (per cui si ringrazia Ping Yang, World Steel Association).

Video

Aeroponica International (2015). Aeroponica: un nuovo modo di coltivare. Su YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=g3FIgHpgQdY, caricato il 18 maggio 2015. URL consultato il 9 gennaio 2022.

Sticchi, R. / RAI (2022). Le biofabbriche. In *TG3 Pixel*, puntata del 29 gennaio 2022.
<https://www.rainews.it/rubriche/tg3pixel/video/2022/01/TG3-Pixel-del-29012022-121f1e3e-2521-4062-bccd-47f4e33f6f72.html>. URL consultato il 31 gennaio 2022.

Verdoliva, G. (2013). Coltivazione di colza in Aeroponica con tecnologia Industriale. Su YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=lODXXIzR0jk, caricato il 15 aprile 2013. URL consultato il 9 gennaio 2022.

Schede tecniche apparecchiature

ASEM. <https://www.asem.it/it/products/29/qt2150---ht2150.html>. URL consultato il 13 marzo 2022.

[ATA 2016]. Manuale operativo Pompa dosatrice elettromagnetica con diaframma.
<https://www.atasrl.it/prodotti_dettaglio.php?tipo=down&key_gestione=2&id_file=65>.
URL consultato il 18 agosto 2022.

Calpeda. Scheda tecnica 63310021000: MXHLM 202E.
<https://pump-selector.calpeda.com/pumpDetail/63310021000>. URL consultato il 24 febbraio 2022.

Fantini Cosmi. Scheda tecnica Aspiratori elicoidali Aspira Serie AFM, p. 23. <https://www.fantinicosmi.it/wp-content/uploads/2022/07/AFM-scheda-tecnica.pdf>.

[LG **a**] LG (2021). Inverter Single Wall Mounted. Engineering Product Data Book, pp. 7-8. Stampato il 12 novembre 2021.

[LG **b**] LG. Scheda tecnica LG DC 12 RH. <https://www.lgbusiness.it/climatizzazione/altri-codici/dc12rh/>.
URL consultato il 21 marzo 2022.

[Netafim] Netafim COOLNET™ Pro Super-fine Mister. Su *Groupe Horticole Ledoux*. <https://www.ghlinc.com/documents/T_Irrigation/Irrigation_Netafim_aspersion_CoolNet_FT_EN.pdf>. URL consultato il 13 marzo 2022.

Pedrollo. FCR 90-130-200. <https://www.pedrollo.com/public/allegati/FCR%2090-130-200_EN_50Hz.pdf>. URL consultato il 23 febbraio 2022.

Vortice. Scheda tecnica VORTICEL EHP ES 404 M. Codice 40632. <https://www.vortice.it/it/ventilazione-industriale/elicoidali/parete/40632>. URL consultato il 20 marzo 2022.

Altre pagine web e **documenti** reperiti online

[AeroFarms] <https://www.aerofarms.com/>

[AeroSpring] <https://aerospringhydroponics.com/>

[ÆssensGrows] <https://www.aessensegrows.com/en/why-aeroponics>

[AgriBio] <http://www.agribioshop.it/50-cicorie-endivie-lattughe-rucola-valeriana>. URL consultato il 9 settembre 2022.

[Agricooltur] <https://www.agricooltur.it/>

[Agrotonomy] <https://agrotonomy.com/>

Agrotonomy (2020). Dovrei installare una Tower Farm all'aperto, al chiuso o in una serra? In *Agrotonomy*, 27 settembre 2020. <https://agrotonomy.com/it/tower-farm-allaperto-al-chiuso-o-in-una-serra/>

Algone. Aquarium Power Consumption. <https://www.algone.com/the-aquarium-and-energy-consumption>. URL consultato il 24 agosto 2022.

[Aromi Verdoliva] <https://aromiverdoliva.it/>

[Bills Wiz] Amjad (2022). Do Aquarium Heaters Use a Lot of Electricity? In *Bills Wiz*, 12 febbraio 2022. <https://billswiz.com/aquarium-heater-electricity-use#How_Much_Electricity_Does_an_Aquarium_Heater_Use>. URL consultato il 19 agosto 2022.

[Cordis 2020] Substrati di coltivazione biodegradabili da fonti sostenibili per la coltivazione idroponica in serricoltura. In *Cordis: risultati della ricerca dell'UE*, 26 giugno 2020. <https://cordis.europa.eu/article/id/418477-greenhouse-crops/it>. URL consultato il 9 gennaio 2022.

[CPS] <https://www.cps-salad.com/index.php?article_id=11&clang=1>

[Direttiva 2008/98/CE]. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. <https://www.legislation.gov.uk/eudr/2008/98/data.pdf>. URL consultato il 26 maggio 2022.

[Dott. Gallina **a**] Dott. Gallina (2022). Multi-Wall Cellular Polycarbonate Plate. EPD. <https://oneclicklcaapp.com/app/sec/util/getEpdFile?resourceId=dapMultiWallPolycarbonateWall_ARCOPLUS_9207&profileId=DottGallina2020> via OneClickLCA.

[Dott. Gallina **b**] Arco Plus 324. 2.1 Sistema modulare ad incastro. <https://www.gallina.it/media/download/schede_prodotto/arcoPlus_324_ita.pdf>

[Cultipharm 2021] Vertical Farm per l'industria farmaceutica. <https://www.cultipharm.it/blog/8>. URL consultato il 17 dicembre 2021.

[FDM] <https://www.dellamarca.it/cose-una-camera-di-crescita-e-in-che-modo-puo-aiutare-la-tua-ricerca/>

Fiume, F. (2014). Lattuga. <https://francescofiume.altervista.org/Lattuga.html> [Copia su Internet Archive: <https://web.archive.org/web/20140727013213/https://francescofiume.altervista.org/Lattuga.html>]

[Gazzetta Ufficiale UE 2013]. Raccomandazione della Commissione del 9 aprile 2013 relativa all'uso di metodologie comuni per misurare e comunicare le prestazioni ambientali nel corso del ciclo di vita dei prodotti e delle organizzazioni. In *Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea*. L 124/1. 4 maggio 2013. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013H0179>.

[HexAgro] <https://www.hexagro.io/>

[Info Acciaio **a**] <https://www.infoacciaio.com/prontuari/peso-rete-elettrosaldata-ca-carbonio/>. URL consultato il 28 maggio 2022.

[Info Acciaio **b**] <https://www.infoacciaio.com/prontuari/peso-ferro-tondo-ca-carbonio/>. URL consultato il 16 giugno 2022.

[InnCoCell] <https://www.inncocells.org/our-technology/>. URL consultato il 23 dicembre 2021. [Copia su Internet Archive: <https://web.archive.org/web/20211223213444/https://www.inncocells.org/our-technology/>]

[Johnny Seeds] <https://www.johnnyseeds.com/vegetables/lettuce/salanova-lettuce/salanova-green-butter-2019-pelleted-lettuce-seed-3056JPA.html>

[La Rienca 2014] Zafferano dell'Alto Monferrato. <http://www.larienca.net/zafferano.html> URL consultato il 17 dicembre 2021. [Copia su Internet Archive: <https://web.archive.org/web/20210730133501/http://www.larienca.net/zafferano.html>]

[Materie-Plastiche **a**] Policarbonato Alveolare Trasparente spessore 20 mm. <https://www.materie-plastiche.com/catalogo/policarbonato/lastre-in-policarbonato-alveolare/policarbonato-alveolare-trasparente-20mm>. URL consultato il 18 marzo 2022.

[Materie-Plastiche **b**] Polipropilene Alveolare Bianco spessore 10 mm. <https://www.materie-plastiche.com/catalogo/polipropilene-alveolare/lastre-in-polipropilene-alveolare/lastre-polipropilene-alveolare-bianco-10mm>. URL consultato il 18 marzo 2022.

[N-Wissen] <https://www.n-wissen.com/plant-growth-chambers.html>

[OPPO] Tabella Bulloni testa esagonale TDE UNI 5737. <https://www.oppo.it/pdf/bulloni+dadi.pdf>. URL consultato il 12 luglio 2022.

[Plastotecnica Emiliana] <https://www.plastotecnicaemiliana.it/index.php/prodotti/polipropilene>

[PonicsTech] Ponics Technologies. Industrial-grade Aeroponic equipment for greenhouses, HoReCa and individual growers. ICO Whitebook. <https://ponics.tech/PonicsTech-WhiteBook.pdf>. URL consultato il 3 gennaio 2022.

[Pulmino contadino] <https://www.pulminocontadino.it/prodotto/lattuga-salanova-1-cespo/>. URL consultato il 9 settembre 2022.

[Sider-Sipe] <https://www.sidersipe.it/acciaio-b450c/>

[Studio Petrillo] <https://www.studiopetrillo.com/peso-rete-elettrosaldata.html>. URL consultato il 28 maggio 2022.

[Vedantu] <https://www.vedantu.com/biology/aeroponics>

[World Bank 2018] Annual freshwater withdrawals, agriculture (% of total freshwater withdrawal). <https://data.worldbank.org/indicator/er.h2o.fwag.zs>

Fonti **immagini**

[AeroFarms] How We Grow. <https://www.aerofarms.com/how-we-grow/>; <https://www.aerofarms.com/wp-content/uploads/bb-plugin/cache/HWG-Mechanical-Design-landscape.jpg>.

[Agricooltur]. <https://www.agricooltur.it/>

Divià, B., Boniforte, A., Baglione, G., Ferrero, S. & Tosco, V. (2019). *Op. cit.* (vedi § Brevetti).

ISO (2006 **b**). *Op. cit.* (vedi § Norme).

Maccotta, F. (2020). Poty è l'orto verticale sostenibile e intelligente. In *Wired*, 12 agosto 2020. <https://www.wired.it/lifestyle/sostenibilita/2020/08/12/poty-orto-verticale-sostenibile-intelligente/>. URL consultato il 10 gennaio 2022.

Repko, M. (2022). *Op. cit.* (vedi § Articoli di giornale e riviste online).

Rosenbaum, R. K. (2017). Selection of impact categories, category indicators and characterisation models in goal and scope definition. In Hauschild et al. 2018, *op. cit.* (vedi § Libri e manuali)

Saar, Y. (1981). Aeroponics at the Satariya Settlement. 11 gennaio 1981. Da Flickr: <https://www.flickr.com/photos/government_press_office/7307166462/>. URL consultato il 27 ottobre 2022.

Soberman, M. (2020). Flash Back to 1982 With "EPCOT Center: A Pictorial Souvenir" – Part Two. In *WDW News Today*, 14 maggio 2020. <https://wdwnt.com/2020/05/flash-back-to-1982-with-epcot-center-a-pictorial-souvenir-part-two/>. URL consultato il 27 ottobre 2022.
[Copia Internet Archive: <https://web.archive.org/web/20220126200103/https://wdwnt.com/2020/05/flash-back-to-1982-with-epcot-center-a-pictorial-souvenir-part-two/>].

UNI (2006). *Op. cit.* (vedi § Norme).

[Wikimedia Commons 2007] Stoner II, R. (1983). File:GTI-Aeroponic-rooting system-1983.jpg. Su *Wikimedia Commons, the free media repository*. Caricato il 20 gennaio 2007. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:GTI-Aeroponic-rooting_system-1983.jpg&oldid=487860434>. URL consultato il 27 ottobre 2022.

[Wikimedia Commons 2008] Esham, B. D. (2007). File:Aeroponically-grown kale at The Land.jpg. Su *Wikimedia Commons, the free media repository*. Caricato il 2 novembre 2008. <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Aeroponically-grown_kale_at_The_Land.jpg&oldid=462954441>. URL consultato il 16 febbraio 2022.

Riferimenti ad **altre opere citate**

Arcichovskij, V.M. (1911). O vozdušnych kul'turach rastenij. <О воздушных культурах растений>. *Žurnal opytnoj agronomii* <*Журнал опытной агрономии*> 12(1).

Barker, B. T. P. (1922). Studies on root development. Long Ashton Research Station Annual Report.

Carter, W. A. (1942). A method of growing plants in water vapor to facilitate examination of roots. *Phytopahology*, 732: 623-625.

Germer, J.; Sauerborn, J.; Asch, F.; de Boer, J.; Schreiber, J.; Weber, G. & Müller, J. (2011). Skyfarming: an ecological innovation to enhance global food security. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 6, 237.

[Greendelta 2015]. Emara, Y., Cirioth, A., Kiehl, K. (2015). The database ÖKOBAU.DAT in openLCA and SimaPro. <https://nexus.openlca.org/database/%C3%96kobaudat>. URL consultato il 9 settembre 2022.

Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J., van Zelm R. (2013). ReCiPe 2008 (revised, version 1.08). Ministerie van Volkshuivesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.

Hischier R., Weidema B., Althaus H. et alii (2010). Implementation of Life Cycle Impact Assessment methods. Final report ecoinvent v2.2 No. 3. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, Svizzera.

Kloepffer, W. (2008). Life cycle sustainability assessment of products. *International Journal of Life Cycle Assessment,* 13, 89. <https://doi.org/10.1065/lca2008.02.376>

Schmidt Rivera, X., Rodgers, B., Odanye, T., Jalil-Vega, F. & Farmer, J. (2022). The Role of Aeroponic Container Farms in Sustainable Food Systems – the Environmental Credentials. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4183312>

Comunicazioni con l'azienda

Si ringraziano per l'accoglienza e per la disponibilità: Agricooltur s.r.l., l'architetto Maicol Negrello, l'agronoma Federica Vichi, il responsabile tecnico Stefano Ferraro, il personale dell'ufficio e della serra di Cascina Gorrea.