



VFARM

Vertical Farming Sostenibile

D5.2 LINEE GUIDA PER WAREHOUSE-TYPE  
VERTICAL FARM



<b>Acronimo:</b>	<b>VFarm</b>
<b>Titolo completo:</b>	<b>Vertical Farming sostenibile</b>
<b>Codice progetto:</b>	<b>2020ELWM82</b>
<b>Finanziamento</b>	<b>PRIN</b>
<b>Coordinatore:</b>	<b>Università di Bologna</b>
<b>Inizio del progetto:</b>	<b>8 Maggio, 2022</b>
<b>Durata del progetto:</b>	<b>36 mesi</b>

	<b>Caratteristiche documento</b>
<b>Titolo del documento</b>	<b>D5.2 Linee Guida Per Warehouse-Type Vertical Farm</b>
<b>Work Package:</b>	<b>WP5</b>
<b>Partner responsabile:</b>	<b>Alma Mater Studiorum – Università di Bologna</b>
<b>Autori principali:</b>	<b>Michele D'Ostuni, Alessandro Pistillo, Simone Amadori, Simone Prospero, Giulia Stanzani, Matteo Vittuari</b>
<b>Altri autori:</b>	<b>Francesco Orsini</b>
<b>Numero di pagine:</b>	<b>32</b>



## Indice dei contenuti

Indice delle tabelle	4
Indice delle figure	4
1. Introduzione	6
1.1 Obiettivi del progetto	6
2. Goal and scope	7
1. Elaborazione dati e valutazione d'impatto	8
3.1 Metodologia di valutazione d'impatto	8
4. Struttura pilota	10
4.1 Descrizione della struttura pilota	10
4.2 Procedura di stima dei consumi	12
4.3 Risultati ed elaborazione	14
4.4 Design ottimizzato	15
4.5 Impianto architettonico	19
4.6 Valutazione d'impatto della struttura pilota	20
4.7 Valutazione d'impatto della struttura ottimizzata	23
4.6.1 Scenario A: ottimizzazione e occupazione totale con sistema idroponico	23
4.6.2 Scenario B: ottimizzazione e occupazione totale con sistema aeroponico	26
5. Comparazione e discussione dei risultati della valutazione di sostenibilità	30
6. Conclusioni	32
7. Bibliografia e sitografia	33





## Indice delle tabelle

Tabella 1: Obiettivo dello studio, adattato dal modello di EC, REC. (UE) 2021/2279 Annex I. Product Environmental Footprint Method .....	7
Tabella 2 Riepilogo delle superfici coltivate .....	12
Tabella 3 Riepilogo delle condizioni di coltivazione.....	13
Tabella 4 Sintesi dei risultati del ciclo colturale. ....	14
Tabella 5 Riepilogo dati di calcolo del calore latente di condensazione. ....	14
Tabella 6 Sintesi delle superfici coltivabili disponibili.....	15
Tabella 7 Sintesi dei dati di carico termico delle attività di deumidificazione.	16
Tabella 8 Sintesi dei dati di carico termico dell'impianto di illuminazione LED .....	16
Tabella 9 Sintesi dei dati di surplus di potere refrigerante.....	17
Tabella 10 Sintesi dei calcoli per i due scenari. ....	18
Tabella 12 Risultati caratterizzati dall'analisi di impatto ambientale della struttura pilota.....	21
Tabella 13 Risultati caratterizzati dell'analisi di impatto ambientale con design ottimizzato. ....	24
Tabella 14 Risultati caratterizzati dell'analisi di impatto ambientale con design ottimizzato con sistema aeroponico .....	27

## Indice delle figure

Figura 1. Impianto planimetrico della vertical farm sperimentale Alma VFarm (scala libera). ....	11
Figura 2. Sezione longitudinale della vertical farm sperimentale Alma VFarm (scala libera). ....	12
Figura 3. Planimetria di Alma VFarm con design ottimizzato (scala libera). .	20
Figura 4. Sezione longitudinale di AlmaVFarm con design ottimizzato (scala libera). ....	20
Figura 5 Analisi di impatto ambientale AlmaVFarm a livello pilota .....	22
Figura 6 Analisi di impatto ambientale AlmaVFarm a livello pilota, risultati normalizzati .....	23
Figura 7 Analisi di impatto ambientale AlmaVFarm con design ottimizzato..	25



Figura 8 Analisi di impatto ambientale AlmaVFarm con design ottimizzato, risultati normalizzati .....	26
Figura 9 Analisi di impatto ambientale AlmaVFarm con design ottimizzato con sistema aeroponico.....	28
Figura 10 Analisi di impatto ambientale AlmaVFarm con design ottimizzato con sistema aeroponico, risultati normalizzati.....	29
Figura 11 Impatti delle strutture ottimizzate a confronto con la struttura pilota per ciclo produttivo.....	31
Figura 12 Impatti delle strutture ottimizzate a confronto con la struttura pilota per kg di prodotto ottenuto .....	32



## 1. Introduzione

Il progetto VFarm – Vertical Farming sostenibile (CUP: J33C20002350001) è un progetto PRIN (Progetti di Ricerca di Rilevante Interesse Nazionale) finanziato nell'ambito della call 2020. Il progetto mira all'identificazione di strategie innovative per il *vertical farming*, implementando un approccio interdisciplinare che integra orticoltura e fisiologia vegetale con applicazioni negli ambiti dell'ingegneria e delle scienze economiche ed ambientali. Il progetto ha come obiettivo definire le caratteristiche ottimali di sistemi di coltivazione e controllo climatico, adattando le tecnologie alle diverse specie coltivate e consentendo di progettare unità di coltivazione modulari ed adattabili a diversi contesti in città italiane. Inoltre, promuove collaborazioni tra le università partner e aziende operanti nel settore per consentire un rapido trasferimento delle conoscenze generate, permettendo infine l'identificazione e la validazione delle soluzioni tecnologiche ottimali per l'implementazione del *vertical farming* in Italia. VFarm è coordinato dall'Università di Bologna Alma Mater Studiorum, e ha come partner l'Università di Napoli Federico II, l'Università degli Studi di Torino e l'Università degli Studi di Padova.

### 1.1 Obiettivi del progetto

Gli obiettivi specifici del progetto sono:

- Studiare l'adattabilità di 7 tipologie di prodotti al *vertical farming* (WP2);
- Progettare soluzioni tecnologiche ottimali in termini di sistemi di coltivazione, gestione della luce e controllo del clima (WP3);
- Valutare la sostenibilità sociale, ambientale ed economica delle *vertical farm* (VF) tramite analisi del ciclo di vita (LCA, eLCC e S-LCA) e con riferimento all'uso delle risorse (energia, acqua e nutrienti) (WP4);
- Definire le tecnologie ottimali, integrandole sia a VF di piccola scala realizzate all'interno di container sia a quelle a grande scala realizzate all'interno di magazzini industriali (WP5).



## 2. Goal and scope

Uno degli aspetti fondamentali nella progettazione di una vertical farm è la gestione del carico termico, ovvero la capacità del sistema HVAC di smaltire il calore generato dalle attività interne. Il raffreddamento dell'ambiente è garantito da un gruppo frigorifero, la cui capacità frigorifera espressa in kilowatt (kW), indica la quantità di calore che il sistema è in grado di rimuovere. L'efficienza di funzionamento del gruppo frigorifero è indicata dal valore COP (Coefficient of Performance), un indice che varia in funzione della temperatura dell'ambiente in cui opera la componente del condensatore.

I principali fattori che contribuiscono all'aumento della temperatura interna nella vertical farm sono:

1. Deumidificatori;
2. Lampade LED;
3. Sistema di ventilazione.

Questo studio si propone di analizzare le performance ambientali della "large-type" vertical farm sperimentale AlmaVFarm, con l'obiettivo di identificare i principali hotspot e le aree di miglioramento per il massimo efficientamento produttivo. Per avviare questo processo è stata effettuata una prova sperimentale finalizzata alla stima dei consumi energetici attuali del sistema. L'analisi dei risultati a scala pilota informerà infatti il design alternativo sviluppando un modello più efficiente dal punto di vista commerciale in grado di efficientare il consumo energetico, riducendo gli impatti ambientali senza modificare i sistemi di controllo del clima attualmente in uso.

L'analisi prende in esame la produzione di un anno di lattuga baby leaf realizzata all'interno della vertical farm sperimentale Alma VFarm. I confini del sistema (cradle to gate) includono tutti i processi dall'estrazione delle materie prime, fino allo smaltimento dei residui organici; il trasporto al consumatore finale e il consumo non sono inclusi nell'analisi. La tabella 1 riassume le principali informazioni relative allo studio.

Tabella 1: Obiettivo dello studio, adattato dal modello di EC, REC. (UE) 2021/2279 Annex I. Product Environmental Footprint Method

Applicazione prevista	Informare la pianificazione strategica aziendale e il processo decisionale pubblico
Motivi per cui si sviluppa lo studio, contesto decisionale e committente	Progetto di ricerca nazionale
Destinatari	Aziende
Strategia di verifica	Diffusione di inventari su richiesta



<b>Baseline</b>	Lattuga baby leaf prodotta in una struttura pilota "large-type"
<b>Localizzazione</b>	Bologna
<b>Sistemi analizzati</b>	Lattuga baby leaf in areoponica e idroponica
<b>Unità funzionali (UF)</b>	LCA (ambientale): 1 kg di prodotto fresco
<b>Durata dello studio</b>	1 anno di attività della VF analizzata.
<b>Applicazioni dei risultati</b>	Supporto alla pianificazione strategica aziendale e allo sviluppo di strutture commercialmente sostenibili.
<b>Limitazioni dello studio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilità di dati;</li> <li>• Scala pilota dei sistemi analizzati;</li> <li>• Stime effettuate rispetto a prezzi, costi, materiali utilizzati.</li> </ul>

## 1. Elaborazione dati e valutazione d'impatto

L'elaborazione dei dati e le analisi di sostenibilità ambientale e sociale sono state svolte utilizzando il software di analisi openLCA@v2.1 distribuito da GreenDELTA, ampiamente utilizzato in ambito di ricerca e industriale.

Per l'analisi di impatto ambientale, i dati secondari utilizzati per modellare i processi di background sono stati estratti dal database di impatto ambientale ecoinvent@v.3.10; gli inventari ottenuti sono poi stati caratterizzati con il metodo di impatto ambientale raccomandato dalla Commissione Europea *Product Environmental Footprint* (PEF) v.3.1 (Pant & Zampori, 2019).

Gli inventari ambientali sono presentati nei Materiali Supplementari (MS).

### 3.1 Metodologia di valutazione d'impatto

La Product Environmental Footprint (PEF) è una metodologia sviluppata dalla Commissione Europea per valutare l'impatto ambientale dei prodotti lungo tutto il loro ciclo di vita, dalla produzione allo smaltimento. La PEF è una metodologia LCA standardizzata che mira a fornire un metodo armonizzato per calcolare e confrontare gli impatti ambientali dei prodotti. È stata sviluppata nell'ambito dell'iniziativa europea per il consumo e la produzione sostenibili (SCP) e il Piano d'Azione per l'Economia Circolare, per affrontare la frammentazione degli approcci esistenti e migliorare la trasparenza nelle comunicazioni ambientali. La PEF permette di quantificare gli impatti ambientali raggruppandoli nelle seguenti categorie:

- Climate Change (Cambiamento climatico): misura le emissioni di gas serra associate al prodotto.



- Ozone Depletion (Degradazione dell'ozono): valuta l'impatto sullo strato di ozono stratosferico.
- Human Toxicity, Cancer (Tossicità umana, cancerogena): considera gli effetti cancerogeni di sostanze chimiche.
- Human Toxicity, Non-Cancer (Tossicità umana, non cancerogena): include gli effetti tossici non cancerogeni.
- Particulate Matter/Respiratory Inorganics (Materiale particolato): valuta gli impatti sulle vie respiratorie dovuti a particolato.
- Ionizing Radiation, Human Health (Radiazioni ionizzanti): misura l'impatto delle radiazioni sulla salute umana.
- Photochemical Ozone Formation (Formazione di ozono fotochimico): riguarda l'inquinamento atmosferico da ozono troposferico.
- Acidification (Acidificazione): valuta il contributo all'acidificazione di suoli e acque.
- Eutrophication, Terrestrial (Eutrofizzazione terrestre): misura l'eccesso di nutrienti nei suoli.
- Eutrophication, Freshwater (Eutrofizzazione delle acque dolci): considera l'eccesso di nutrienti nei corsi d'acqua.
- Eutrophication, Marine (Eutrofizzazione marina): valuta l'impatto degli apporti di nutrienti in ambiente marino.
- Ecotoxicity, Freshwater (Ecotossicità nelle acque dolci): misura l'impatto sulle specie acquatiche dolci.
- Land Use (Uso del suolo): considera l'impatto sull'ecosistema dovuto all'occupazione del suolo.
- Water Use (Uso dell'acqua): valuta il consumo idrico e l'impatto sulla disponibilità.
- Resource Use, Fossils (Uso di risorse fossili): misura il consumo di risorse fossili.
- Resource Use, Minerals and Metals (Uso di minerali e metalli): considera il consumo di risorse non rinnovabili.

Anche se nella metodologia PEF, i risultati possono essere classificati in tre forme, nello studio in questione sono utilizzate le seguenti due forme di risultati:

- Risultati caratterizzati: prodotto della somma degli impatti associati a ogni flusso di emissione o consumo all'interno di una specifica categoria di impatto. In questa fase, ogni flusso (es. diversi gas ad effetto clima alterante) è moltiplicato per un fattore di caratterizzazione, che rappresenta il suo potenziale di impatto relativo (es, il potenziale di riscaldamento globale per le emissioni di gas serra è espresso in CO<sub>2</sub>-equivalenti. Il metano (CH<sub>4</sub>) ha un fattore di caratterizzazione 27, il che significa che



ogni kg di metano rilasciato equivale a 27 kg di CO<sub>2</sub>-equivalente. Questo processo consente di aggregare e quantificare gli impatti in unità comuni per ogni categoria.

- **Risultati normalizzati:** risultati caratterizzati messi in relazione a un valore di riferimento, come la performance media per persona o per regione in un determinato anno. Lo scopo della normalizzazione è fornire un contesto per interpretare i risultati, rendendoli più comprensibili in termini relativi (ad esempio, quanto il prodotto analizzato contribuisce rispetto alla media globale o regionale in quella categoria di impatto). La normalizzazione non modifica il ranking delle opzioni, ma aiuta a capire l'importanza relativa di ciascuna categoria di impatto.

## 4. Struttura pilota

### 4.1 Descrizione della struttura pilota

Alma VFarm è una vertical farm sperimentale situata presso il Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari dell'Università di Bologna. L'impianto si sviluppa all'interno di una cella isoterma di 45 m<sup>2</sup> (5,54 x 8,15 m) di superficie e 2,64 m di altezza. L'impianto comprende due differenti tecnologie di coltivazione (Frm srl, Rovereto, TN, Italia): un sistema a flusso e riflusso, ed un sistema aeroponico ad alta pressione. Le tecnologie di coltivazione sono distribuite in 22 settori di coltivazione, di cui 10 a flusso e riflusso e 12 aeroponici, ciascuno articolato su 3 livelli sovrapposti che costituiscono le vasche di coltivazione. In aggiunta, 3 settori aeroponici supplementari sono dedicati alla fase di germinazione, ciascuno composto da 5 livelli sovrapposti.

L'impianto è dotato di un sistema HVAC (Monti&C srl, Borgo a Buggiano, PT, Italia) per il controllo termoigrometrico della cella isoterma. Il sistema HVAC è progettato per consentire il recupero dell'acqua condensata e deumidificata che è possibile utilizzare per alimentare il sistema di fertirrigazione.

Il sistema di fertirrigazione è articolato in 6 settori (2 idroponici e 4 aeroponici), tutti a ciclo completamente chiuso in cui la soluzione nutritiva drenata viene raccolta in serbatoi di ricircolo dove un fertirrigatore (NidoPro®, LogicSun, Cattolica, RN, Italia) monitora e, se necessario, regola i parametri di pH e conducibilità elettrica (EC) prima di reimmettere la soluzione nutritiva nel circuito.

Ogni vasca di coltivazione è dotata di un sistema di illuminazione LED dedicato (Flytech srl, Belluno, Italia), regolabile in intensità, spettro e fotoperiodo in modo indipendente per ciascun settore.



Ulteriori dettagli riguardanti la disposizione spaziale dei sistemi di coltivazione, le componenti HVAC e i flussi idrici sono illustrati in Figura 1 e Figura 2.

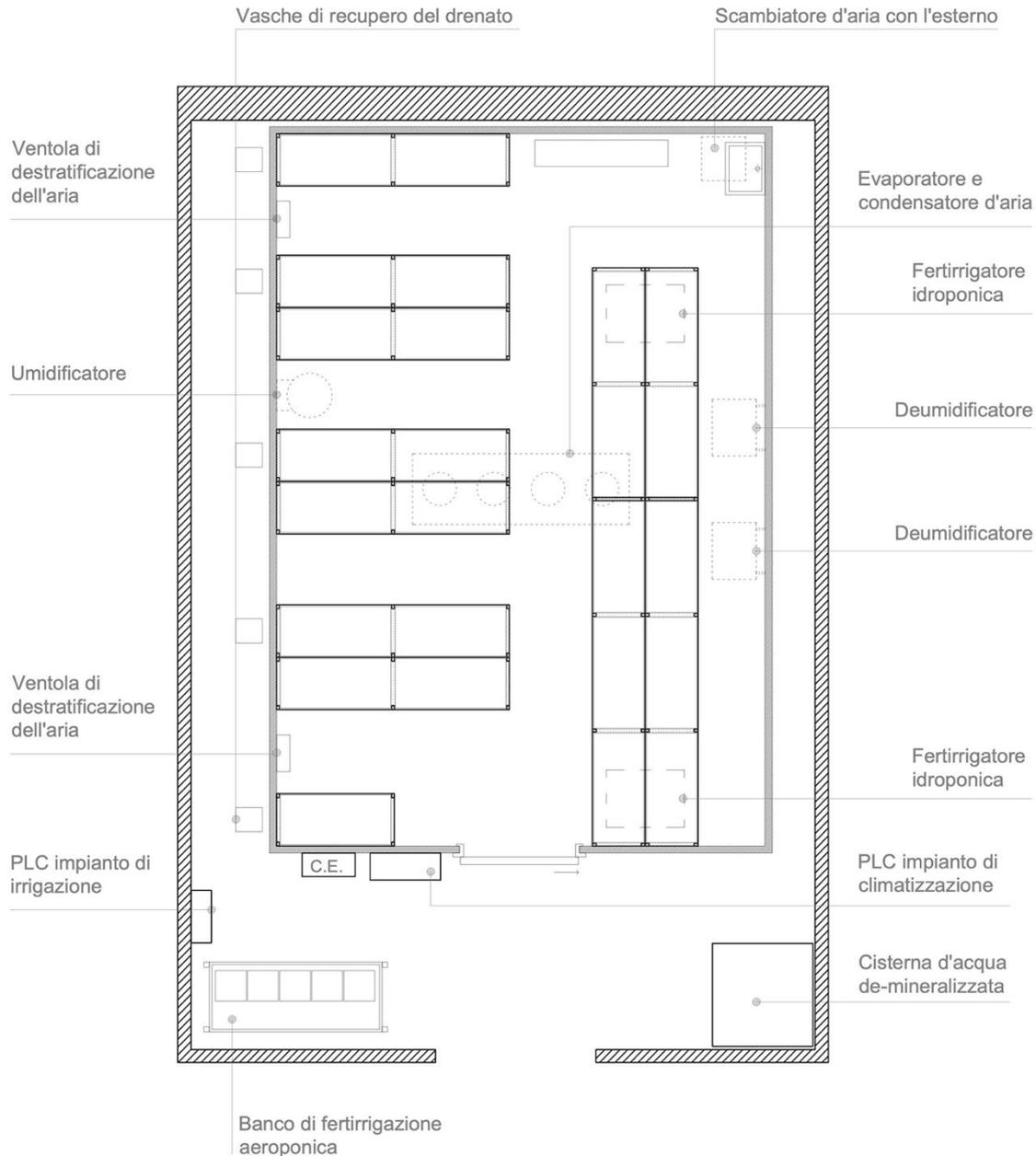


Figura 1. Impianto planimetrico della vertical farm sperimentale Alma VFarm (scala libera).

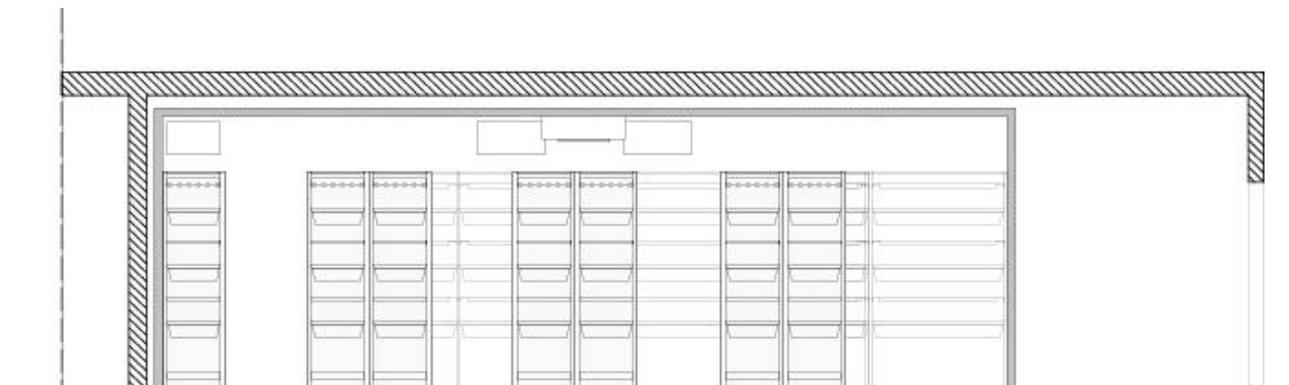


Figura 2. Sezione longitudinale della vertical farm sperimentale Alma VFarm (scala libera).

## 4.2 Procedura di stima dei consumi

La stima dei flussi energetici ed idrici attuali della vertical farm Alma VFarm è stata effettuata considerando un ciclo di coltivazione di *Lactuca sativa* L. var. Canasta della durata complessiva di 441 ore, escludendo la fase iniziale di germinazione, della durata di 48 ore.

I semi di lattuga (*Lactuca sativa* L. var. Canasta) sono stati seminati in plug di torba pressata (Jiffy Products International BV, Lindtsedijk, Olanda). Dopo la fase di preparazione, i plug seminati sono stati trasferiti in 4 sistemi di coltivazione aeroponica e in 10 sistemi a flusso e riflusso, per un totale di 12 vasche di coltivazione aeroponica e 30 vasche a flusso e riflusso.

Le due tecnologie di coltivazione dispongono di vasche di coltivazione con una superficie disponibile di 0,69 m<sup>2</sup> e di 0,67 m<sup>2</sup> rispettivamente per l'aeroponica e per il flusso e riflusso. Tuttavia, le superfici effettivamente coltivate sono state rispettivamente di 0,51 m<sup>2</sup> per le vasche aeroponiche e di 0,35 m<sup>2</sup> per quelle a flusso e riflusso. Pur essendo state utilizzate densità di coltivazione differenti nei due sistemi (1.050 piante m<sup>2</sup> in aeroponica e 1.670 piante m<sup>2</sup> nel flusso e riflusso), con conseguenti variazioni nella resa finale, l'obiettivo del ciclo di coltivazione è stato quello di valutare le prestazioni dei due metodi in un contesto produttivo realistico, adottando configurazioni comunemente impiegate in ambito commerciale per ciascun sistema. In tabella 2 è riportata una sintesi delle vasche di coltivazione e delle superfici effettivamente utilizzate nella stima dei flussi.

Tabella 2 Riepilogo delle superfici coltivate

Metodo di coltivazione	Numero di vasche di coltivazione	Area per vasca (m <sup>2</sup> )	Area coltivata per vasca (m <sup>2</sup> )	Area coltivata totale (m <sup>2</sup> )
------------------------	----------------------------------	----------------------------------	--	---



Aeroponica	12	0,69	0,513	6,163
Flusso e riflusso	30	0,67	0,345	10,353

La fase di germinazione ha avuto durata di 48 ore, durante le quali sono stati mantenuti valori controllati di temperatura e umidità relativa pari a  $21 \pm 0,5$  °C e  $90 \pm 5\%$ , rispettivamente. L'illuminazione durante la germinazione è stata garantita da lampade LED (Flytech srl, Belluno, Italia) con un rapporto di radiazione rossa/blu di 3:1, un fotoperiodo di 16 ore di luce e un PPFd pari a  $170 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Al termine della germinazione, le plantule sono state mantenute all'interno dei sistemi aeroponico e a flusso e riflusso, dove sono cresciute fino al termine del ciclo mantenendo le stesse condizioni di illuminazione della fase di germinazione. Durante il ciclo di coltivazione sono stati mantenuti valori controllati di temperatura e umidità relativa: rispettivamente  $24/21 \pm 0,5$  °C e  $65/75 \pm 5\%$  nelle fasi di luce e buio. È stata inoltre fornita CO<sub>2</sub> supplementare, mantenendo una concentrazione costante di 850 ppm. Per l'intera durata dell'esperimento è stata utilizzata un'unica soluzione nutritiva, caratterizzata da una conducibilità elettrica pari a  $2,3 \pm 0,2$  dS m<sup>-1</sup> e un pH di  $5,8 \pm 0,2$ . La composizione della soluzione è la seguente: N-NO<sub>3</sub>: 14 mM; N-NH<sub>4</sub>: 4,4 mM; P: 1,0 mM; K: 5,0 mM; S: 2,0 mM; Ca: 5,2 mM; Mg: 1,2 mM; Fe: 17,9 μM, Cu: 2,0 μM, Zn: 3,8 μM, B: 11,6 μM, Mn: 18,2 μM, Mo: 0,5 μM

Un riepilogo completo delle condizioni di coltivazione adottate è presentato in tabella 3.

Tabella 3 Riepilogo delle condizioni di coltivazione.

	Temperatura (°C)	Umidità relativa (%)	Fotoperiodo (h)	pH	Conducibilità elettrica (dS m <sup>-1</sup> )	Concentrazione di CO <sub>2</sub> (ppm)
<b>Luce</b>	$24 \pm 0,5$	$65 \pm 5$	16	$5,8 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,2$	850
<b>Buio</b>	$21 \pm 0,5$	$75 \pm 5$	8	$5,8 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,2$	850

Il ciclo di crescita si è concluso a 411 ODG (Ore Dalla Germinazione), momento in cui sono stati raccolti i dati relativi al peso fresco delle intere superfici coltivate, pari ad un valore medio di  $2,98 \text{ kg m}^{-2}$  per ciascun ripiano aeroponico e  $3,24 \text{ kg m}^{-2}$  per ciascun ripiano a flusso e riflusso.

Durante l'intero ciclo di coltivazione, a partire dalla prima ora fino al termine, sono stati monitorati tramite contatori dedicati i consumi energetici delle seguenti componenti:

- Lampade LED;
- Sistema HVAC suddiviso in: riscaldamento, raffrescamento, umidificazione, deumidificazione e ventilazione.



Sono stati inoltre registrati i dati relativi al consumo idrico e al recupero dell'acqua condensata e deumidificata dal sistema HVAC.

### 4.3 Risultati ed elaborazione

I risultati sintetici ottenuti al termine del ciclo colturale mediante misura diretta dei pesi freschi e contabilizzazione dei flussi energetici e idrici sono mostrati in tabella 4.

Tabella 4 Sintesi dei risultati del ciclo colturale.

Area totale coltivata (m <sup>2</sup> )	Peso fresco sistema flusso e riflusso (kg m <sup>-2</sup> )	Peso fresco sistema aeroponico (kg m <sup>-2</sup> )	Acqua recuperata dal sistema di deumidificazione (L)	Consumo energetico deumidificatori (kWh)
16,52	3,24	2,98	571,05	432,50

I dati sopra riportati sono ritenuti sufficienti ai fini dei calcoli necessari alla redazione del presente documento e dell'elaborazione dell'ipotesi di design ottimizzato. Ulteriori approfondimenti riguardanti la ripartizione dettagliata dei consumi e le performance in termini di efficienza d'uso delle risorse saranno oggetto di una pubblicazione scientifica dedicata (attualmente in fase di elaborazione).

A partire dai dati raccolti è stato calcolato il carico termico per metro quadrato coltivato dovuto all'attività dei deumidificatori che, rimuovendo il vapore acqueo in eccesso dall'ambiente derivante sia dall'evapotraspirazione delle piante che da fenomeni di evaporazione dell'acqua dalle vasche di coltivazione, mantengono livelli adeguati di umidità relativa. Tale processo comporta la liberazione di calore dovuta all'attività dei deumidificatori e alla condensazione del vapore acqueo che libera calore sensibile.

Per stimare il carico termico dovuto alla liberazione del calore sensibile, si è fatto riferimento al calore latente di condensazione pari a 0,63 kWh L<sup>-1</sup>. Moltiplicando tale valore per il volume totale di acqua rimossa (571,05 L) si ottiene un carico termico complessivo pari a 359,76 kWh (Tab. 5).

Tabella 5 Riepilogo dati di calcolo del calore latente di condensazione.

Area totale coltivata (m <sup>2</sup> )	Acqua recuperata dal sistema di deumidificazione (L)	Calore latente di condensazione (kWh L <sup>-1</sup> )	Carico termico acqua deumidificata (kW h)
16,52	571,05	0,63	359,76



Dividendo per l'area totale coltivata ( $16,52 \text{ m}^2$ ) i valori di carico termico dovuto all'attività dei deumidificatori ( $432,50 \text{ kWh}$ ) e al carico termico dell'acqua deumidificata ( $359,76 \text{ kWh}$ ), otteniamo rispettivamente valori di  $26,18 \text{ kWh m}^{-2}$  e  $21,78 \text{ kWh m}^{-2}$ . Complessivamente, partendo dai dati del ciclo di coltivazione, otteniamo un carico termico per il processo di deumidificazione di  $47,96 \text{ kWh m}^{-2}$ .

## 4.4 Design ottimizzato

Per sviluppare un design ottimizzato della vertical farm Alma VFarm, mantenendo invariati sia il ciclo di coltivazione sia il sistema HVAC attualmente installato, è necessario ipotizzare l'utilizzo dell'intera superficie coltivabile disponibile. Questo consente di valutare se esiste un margine operativo sufficiente per un eventuale ampliamento delle superfici di coltivazione.

In questa analisi progettuale, i principali contributi all'incremento della temperatura interna della vertical farm considerati sono: il processo di deumidificazione e il sistema di illuminazione LED. Il contributo termico del sistema di ventilazione viene considerato trascurabile nell'ambito di questa ipotesi.

Per la stima del carico termico associato alla deumidificazione, ci si riferisce ai dati ottenuti durante il ciclo di coltivazione della lattuga presentato nei paragrafi precedenti. Si assume inoltre, che tutte le vasche di coltivazione installate siano operative, sfruttando la superficie coltivabile totale disponibile all'interno dell'impianto. Alma VFarm è attualmente dotata di 30 vasche a flusso e riflusso, che corrispondono a una superficie coltivabile complessiva di  $20,10 \text{ m}^2$ , e di 36 vasche aeroponiche, per un totale di  $24,98 \text{ m}^2$  coltivabili. Una sintesi delle superfici coltivabili potenziali è riportata in tabella 6.

Tabella 6 Sintesi delle superfici coltivabili disponibili.

Metodo di coltivazione	Vasche di coltivazione	Area per vasca di coltivazione ( $\text{m}^2$ )	Area coltivata per vasca di coltivazione ( $\text{m}^2$ )	Area coltivata totale ( $\text{m}^2$ )
Flusso e riflusso	30	0,67	0,67	20.10
Aeroponica	36	0,69	0,69	24.98

La superficie massima coltivabile, ottenuta sommando i settori aeroponici e a flusso e riflusso, ammonta complessivamente a  $45,08 \text{ m}^2$ . Ipotizzando di sfruttare interamente tale superficie e applicando i valori di carico termico specifico per metro quadrato coltivato calcolati in precedenza, si ottiene un carico termico associato al funzionamento dei deumidificatori pari a  $1.180,55 \text{ kWh}$ , ed un carico termico dovuto all'acqua deumidificata pari



a 977,32 kWh. In tabella 7 sono riportati i dati utilizzati per i calcoli precedenti riferiti ad uno scenario di pieno utilizzo della vertical farm Alma VFarm.

Tabella 7 Sintesi dei dati di carico termico delle attività di deumidificazione.

Area coltivata (m <sup>2</sup> )	Carico termico deumidificatori (kWh <sup>-1</sup> )	Acqua deumidificata (L)	Carico termico acqua deumidificata (kWh <sup>-1</sup> )
1	26,18	34,57	21,78
45,08	1.180,55	1.558,55	977,32

Un' ulteriore componente rilevante nel calcolo del carico termico è rappresentata dal sistema di illuminazione LED. Per l'analisi qui proposta, si ipotizza l'impiego di lampade a spettro fisso (Flygrow®, Flytech srl, Belluno, Italia), caratterizzate da un rapporto tra radiazione rossa e blu pari a 3,\*2 e da un'intensità luminosa media di 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Ogni lampada ha un assorbimento elettrico pari a 0,120 kW ed un'efficienza radiativa stimata del 60%.

In via cautelativa, considerando possibili riduzioni dell'efficienza nel tempo, si assume una dissipazione termica pari al 50% dell'energia assorbita, ovvero 0,060 kW per lampada. Ciascun apparecchio di dimensioni di circa 0,70 m<sup>2</sup> illumina un singolo ripiano rendendo il numero totale di lampade direttamente proporzionale al numero di ripiani attivi.

Nel caso di utilizzo completo della vertical farm si considerano 66 ripiani attivi e, conseguentemente, 66 lampade. Per il calcolo del carico termico, si ipotizza un fotoperiodo di 16 ore di luce e 8 ore di buio, per cui il tempo di accensione delle lampade sul totale del ciclo produttivo di 441 ore corrisponde a 294 ore (16/24). Sulla base di queste ipotesi, la dissipazione termica complessiva imputabile all'impianto di illuminazione LED risulta pari a 1.164,24 kWh (Tab. 8), contribuendo in modo significativo al carico termico che deve essere gestito dal sistema HVAC.

Tabella 8 Sintesi dei dati di carico termico dell'impianto di illuminazione LED

Lampade LED	Dissipazione termica lampade (kW)	Ore di funzionamento (h)	Carico termico lampade (kWh)
66	0,06	294	1.164,24

Il calore generato dai motori delle ventole di de-stratificazione è considerato trascurabile nell'ambito della presente ipotesi progettuale. Pertanto, assumendo l'utilizzo completo di



tutte le vasche di coltivazione della vertical farm Alma VFarm, il carico termico complessivo stimato per un ciclo di coltivazione di lattuga di 441 ore ammonta a 3.326,46 kWh. Tale valore è ottenuto sommando i contributi relativi al funzionamento dei deumidificatori, al calore sensibile associato all'acqua deumidificata e alla dissipazione termica del sistema di illuminazione LED.

Nell'ambito di questa ipotesi di design ottimizzato della vertical farm Alma VFarm, si prevede di mantenere invariato il sistema HVAC attualmente installato. In questo contesto, la gestione del carico termico, ovvero la capacità dell'impianto HVAC di dissipare il calore generato dalle attività interne, costituisce il principale fattore limitante.

Il raffreddamento dell'ambiente all'interno della vertical farm è assicurato da un gruppo frigorifero, la cui capacità frigorifera, espressa in kilowatt (kW), indica la quantità di calore che l'impianto è in grado di rimuovere. L'efficienza del sistema è espressa dal Coefficient of Performance (COP), parametro che dipende dalla temperatura dell'ambiente in cui opera il condensatore. Nel caso di Alma VFarm, il condensatore è installato all'esterno della struttura, in una zona ombreggiata. Sulla base dei dati climatici riportati da ARPAE (2019) relativi alla Città metropolitana di Bologna, si può stimare una temperatura media annua di 14,05 °C. Tale valore consente, attraverso l'analisi della scheda tecnica del condensatore, di stimare un COP medio e una conseguente capacità frigorifera media installata pari a 15,5 kW.

Sulla base di tale stima, si può ipotizzare la capacità refrigerante totale disponibile nel corso di un intero ciclo di coltivazione di 441 ore, pari a 6.835,50 kWh. Confrontando questo valore con il carico termico complessivo ipotizzato (3.326,46 kWh) si ottiene un surplus di capacità refrigerante pari a 3.509,04 kWh, ovvero circa il 105,76% in più rispetto al fabbisogno stimato per le condizioni di coltivazione considerate.

Questo margine operativo suggerisce la possibilità di espandere la superficie coltivabile di ulteriori 47,68 m<sup>2</sup>, che, sommati alla superficie attualmente disponibile di 45,08 m<sup>2</sup> portano a un totale teorico coltivabile pari a 92,76 m<sup>2</sup>. In tabella 9 sono riportati i dati di sintesi del calcolo del surplus di potere refrigerante.

Tabella 9 Sintesi dei dati di surplus di potere refrigerante.

Capacità frigorifera totale (kWh)	Carico termico totale deumidificatori (kWh)	Carico termico totale acqua deumidificata (kWh)	Carico termico totale lampade LED (kWh)	Surplus potere refrigerante (kWh)
6.835,50	1.180,55	977,32	1.164,24	3.509,04

Pertanto, nell'ipotesi di utilizzo della vertical farm Alma VFarm per la coltivazione di lattuga con un ciclo di 441 ore, risulta disponibile circa la metà della capacità refrigerante totale installata. In un'ottica di ottimizzazione energetica e massimizzazione dell'efficienza del



sistema HVAC, è quindi possibile ipotizzare un aumento delle superfici coltivabili fino al completo sfruttamento del potenziale refrigerante disponibile pari a una superficie complessiva coltivabile di 92,76 m<sup>2</sup>.

In tale contesto progettuale, si possono prevedere due scenari alternativi di design in cui aumenta il numero di vasche di coltivazione. Il valore viene calcolato dividendo la superficie complessiva coltivabile (92,76 m<sup>2</sup>) per la superficie delle vasche di coltivazione (rispettivamente 0,67 m<sup>2</sup> per il flusso e riflusso, 0,69 m<sup>2</sup> per l'aeroponica). I due scenari ipotizzati prevedono

1. L'installazione esclusiva di sistemi a flusso e riflusso, che permetterebbe l'allestimento di 138 vasche di coltivazione.
2. L'installazione esclusiva di sistemi aeroponici, che consentirebbe l'inserimento di 133 vasche di coltivazione.

Queste ipotesi rappresentano un possibile punto di partenza per la definizione di un layout ottimizzato della vertical farm, mirato a migliorare l'efficienza d'uso delle risorse e ad incrementare la produttività complessiva. In tabella 10 sono riportati sinteticamente i calcoli per i due scenari.

Tabella 10 Sintesi dei calcoli per i due scenari.

	Superficie potenzialmente coltivabile (m <sup>2</sup> )	Superficie vasca di coltivazione (m <sup>2</sup> )	Numero massimo vasche di coltivazione
<b>Flusso e riflusso</b>	92,76	0,67	138
<b>Aeroponica</b>	92,76	0,69	133

Inoltre, considerata la limitata crescita in altezza della lattuga coltivata in un ciclo di 441 ore, si può ipotizzare di aumentare il numero di ripiani per settore, passando dagli attuali 3 a 4 ripiani per ogni settore di coltivazione. Nell'ottica di efficientare l'uso degli spazi, si ipotizza di rimuovere i settori di germinazione e di effettuare la germinazione in una camera dedicata lasciando la vertical farm esclusivamente per finalità di crescita delle piante.

Nel contesto di una configurazione ottimizzata, si prevede una semplificazione del sistema di fertirrigazione rispetto all'assetto attuale. L'intero impianto verrebbe alimentato da una vasca principale da 1.000 L destinata alla soluzione nutritiva, affiancata da tre serbatoi da 100 L ciascuno contenenti le soluzioni concentrate dei nutrienti e il regolatore di pH. Il controllo della soluzione verrebbe affidato ad un unico fertirrigatore (NidoPro®, LogicSun, Cattolica, RN, Italia), che potrà operare in combinazione con una pompa ad alta pressione



nel caso si adottino esclusivamente sistemi aeroponici, oppure con una pompa centrifuga per sistemi idroponici a flusso e riflusso.

Il sistema prevede inoltre una vasca di recupero da 200 L dedicata alla raccolta del drenaggio, dotata di un'unità di filtrazione per il trattamento e il successivo reinserimento della soluzione nutritiva nel ciclo di fertirrigazione, contribuendo così alla riduzione del consumo idrico e al miglioramento dell'efficienza complessiva.

Infine, per garantire una fonte integrativa e sostenibile di approvvigionamento idrico, si propone l'installazione di una vasca supplementare da 300 L destinata alla raccolta dell'acqua condensata dal sistema HVAC. Quest'acqua potrà essere riutilizzata per il riempimento della vasca principale, riducendo ulteriormente la dipendenza da fonti esterne.

## 4.5 Impianto architettonico

A seguito dell'implementazione impiantistica al fine di ottimizzare i consumi di AlmaVFarm, si è dunque operato un processo di riprogettazione dell'impianto architettonico che consentisse di accomodare l'incremento del numero di vasche di coltivazione. La strategia adottata è stata quella di intervenire in planimetria cercando di limitare il più possibile il consumo di suolo, andando ad ottimizzare la densità delle vasche di coltivazione (Figura 3). Come si può vedere infatti nella sezione longitudinale (Figura 4), i livelli di coltivazione passando da 3 a 4, andando a mantenere la stessa altezza dell'AlmaVFarm, 2,64 metri. Inoltre, per consentire una maggiore facilità operativa a fronte di un aumento di densità in altezza delle vasche di coltivazione, lo spazio di corridoio che intercorre fra le ripiani è stato aumentato dagli 80 cm attuali, a 100 cm.

La nuova configurazione planimetrica ottimizzata quindi consente di ospitare 140 vasche di coltivazione, equivalenti a 93,8 m<sup>2</sup> di superficie coltivata in idroponica e di 96,6 m<sup>2</sup> in aeroponica, su una superficie utile netta (SUN) di 62 m<sup>2</sup>. Rispetto ai dati ottimizzati dell'impianto HVAC, l'ottimizzazione del design architettonico prevede dunque un leggero aumento delle vasche, di conseguenza, un aumento della superficie coltivata. Tuttavia, si considera che un aumento del 1-3% della superficie coltivata conseguente all'ottimizzazione planimetrica dell'impianto architettonico non consista in uno stress rilevante per l'impianto HVAC ottimizzato. In base a queste considerazioni quindi, a fronte di un aumento della SUN del 37%, si consente un aumento della superficie coltivabile maggiore del 100%.

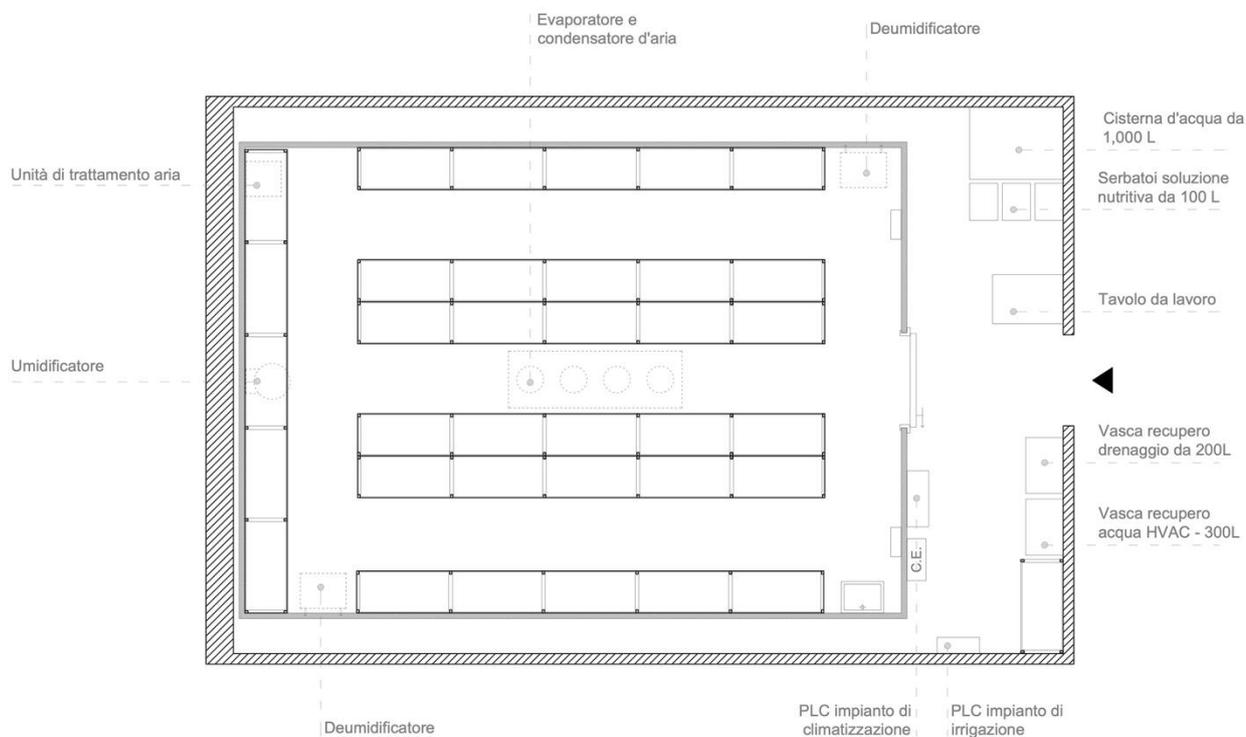


Figura 3. Planimetria di Alma VFarm con design ottimizzato (scala libera).

Infine, considerando la superficie totale comprendente del comparto impiantistico (PL, taniche, e fertirrigazione), la superficie netta totale della AlmaVFarm ottimizzata è di 92 m<sup>2</sup>, registrando un aumento di consumo di suolo del solo 23% rispetto alla configurazione originale (75m<sup>2</sup>).

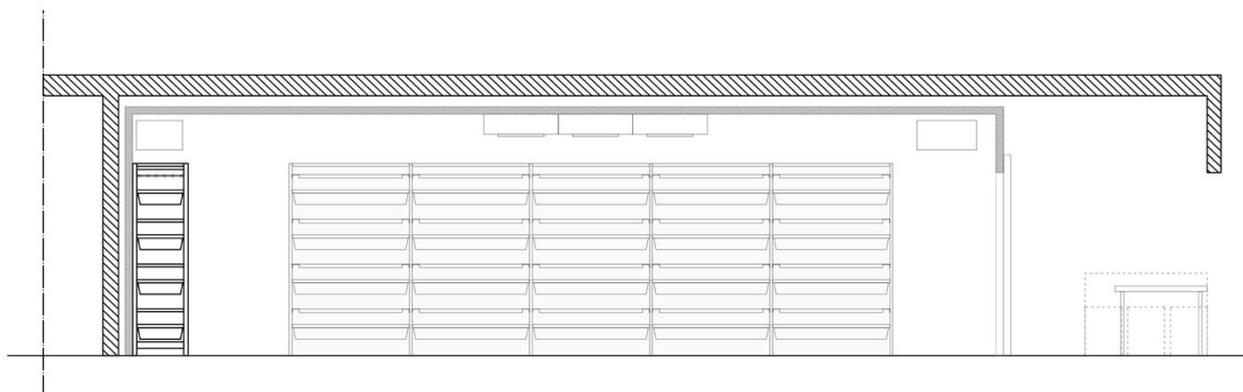


Figura 4. Sezione longitudinale di AlmaVFarm con design ottimizzato (scala libera).



## 4.6 Valutazione d'impatto della struttura pilota

Coerentemente con la letteratura, la valutazione ha rilevato l'energia elettrica come il principale hotspot ambientale della produzione di lattuga all'interno della struttura pilota in 13 categorie di impatto sulle 16 analizzate, come si può evincere dalle due figure. La 5 analizza gli impatti ambientali scomponendoli tra elettricità, struttura e consumabili (portati al 100%), mentre la **Error! Reference source not found. Error! Reference source not found.** analizza gli stessi risultati pesati secondo il set di normalizzazione e pesatura del metodo Environmental Footprint 3.1 **Error! Reference source not found.** Nello specifico, il maggiore contributo può essere osservato nelle categorie *Climate Change*, *Energy Resources - non renewable* e *Eutrophication - freshwater*, tutte riconducibili al forte consumo di elettricità. I consumabili registrano un impatto rilevante nelle categorie *Ozone depletion*, *Material resources: metals/minerals* e *Land use*: in particolare, gli impatti sono riconducibili ai substrati utilizzati per l'aeroponica e l'idroponica, con un'incidenza di circa il 50% maggiore del primo sistema rispetto al secondo. Infine, i materiali costruttivi attribuibili alla struttura di coltivazione non risultano essere rilevanti rispetto agli impatti di elettricità e consumabili. L'impatto dei fertilizzanti è minimo, a causa di un apporto limitato dovuto all'efficienza garantita dal sistema di coltivazione controllato.

Tabella 11 Risultati caratterizzati dall'analisi di impatto ambientale della struttura pilota.

Impact category	Unità	Totale	Elettricità	Consumabili	Struttura
Acidification	mol H <sup>+</sup> -Eq	4.85E+00	4.50E+00	3.18E-01	3.64E-02
Climate change	kg CO <sub>2</sub> -Eq	1.49E+03	1.38E+03	1.03E+02	8.49E+00
Ecotoxicity: freshwater	CTUe	1.55E+03	1.06E+03	4.60E+02	2.84E+01
Energy resources: non-renewable	MJ, net calorific value	2.18E+04	1.95E+04	2.26E+03	6.98E+01
Eutrophication: freshwater	kg P-Eq	2.21E-01	1.98E-01	1.95E-02	3.47E-03
Eutrophication: marine	kg N-Eq	8.16E-01	7.30E-01	7.68E-02	8.81E-03
Eutrophication: terrestrial	mol N-Eq	8.87E+00	7.87E+00	9.13E-01	8.96E-02
Human toxicity: carcinogenic	CTUh	7.22E-07	5.07E-07	1.60E-07	5.48E-08
Human toxicity: non-carcinogenic	CTUh	4.63E-06	4.23E-06	3.20E-07	8.34E-08
Ionising radiation: human health	kBq U235-Eq	1.48E+01	1.32E+01	1.38E+00	2.19E-01
Land use	dimensionless (pts)	3.56E+03	8.47E+01	3.46E+03	1.78E+01
Material resources: metals/minerals	kg Sb-Eq	3.30E-04	6.51E-05	2.62E-04	3.07E-06
Ozone depletion	kg CFC-11-Eq	5.56E-05	2.86E-05	2.69E-05	6.67E-08
Particulate matter formation	disease incidence	2.15E-05	1.77E-05	3.08E-06	6.81E-07
Photochemical oxidant formation: human health	kg NMVOC-Eq	3.99E+00	3.59E+00	3.72E-01	2.67E-02



<b>Water use</b>	m3 world Eq deprived	8.74E+02	8.35E+02	3.56E+01	3.76E+00
------------------	----------------------	----------	----------	----------	----------

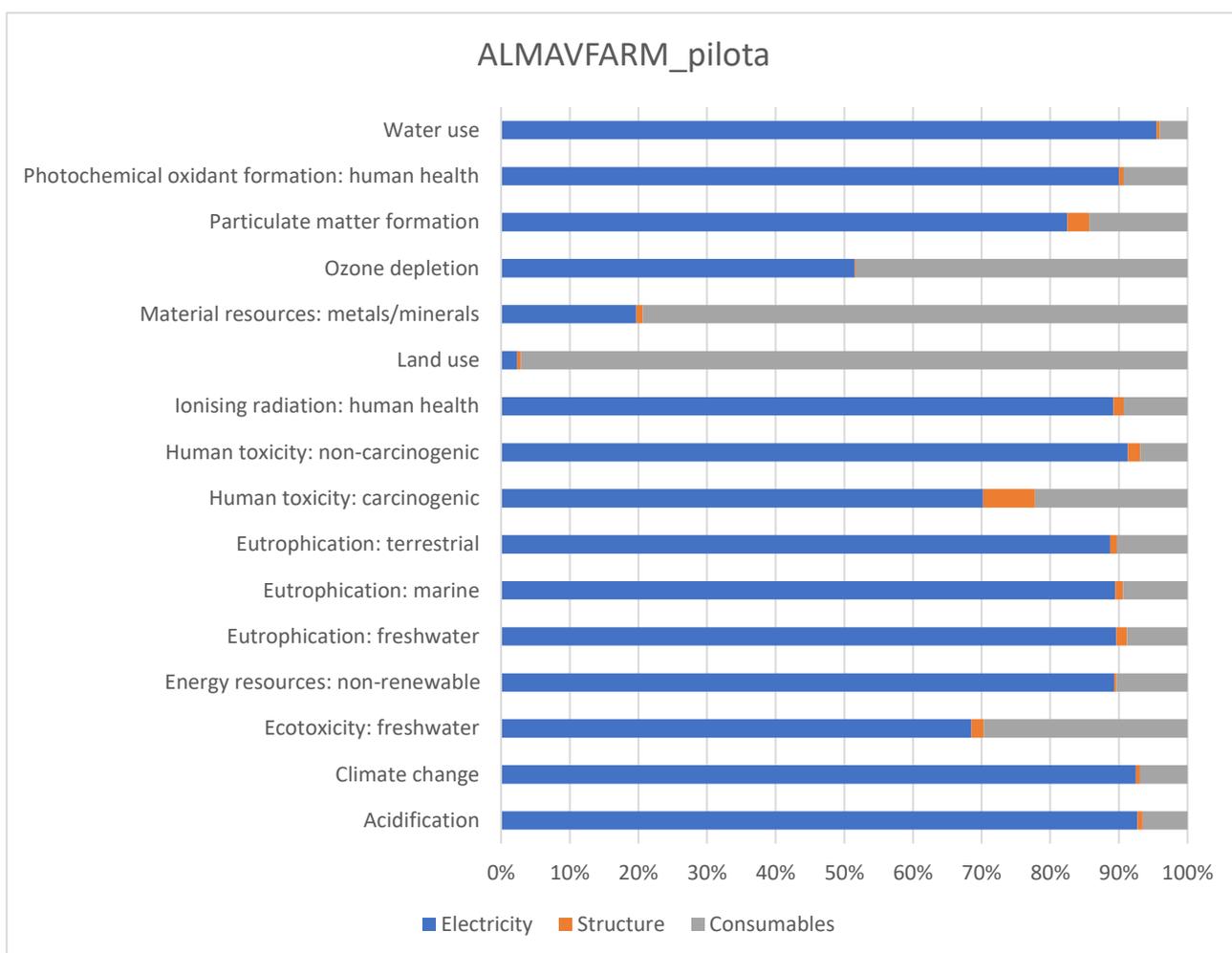


Figura 5 Analisi di impatto ambientale AlmaVFarm a livello pilota

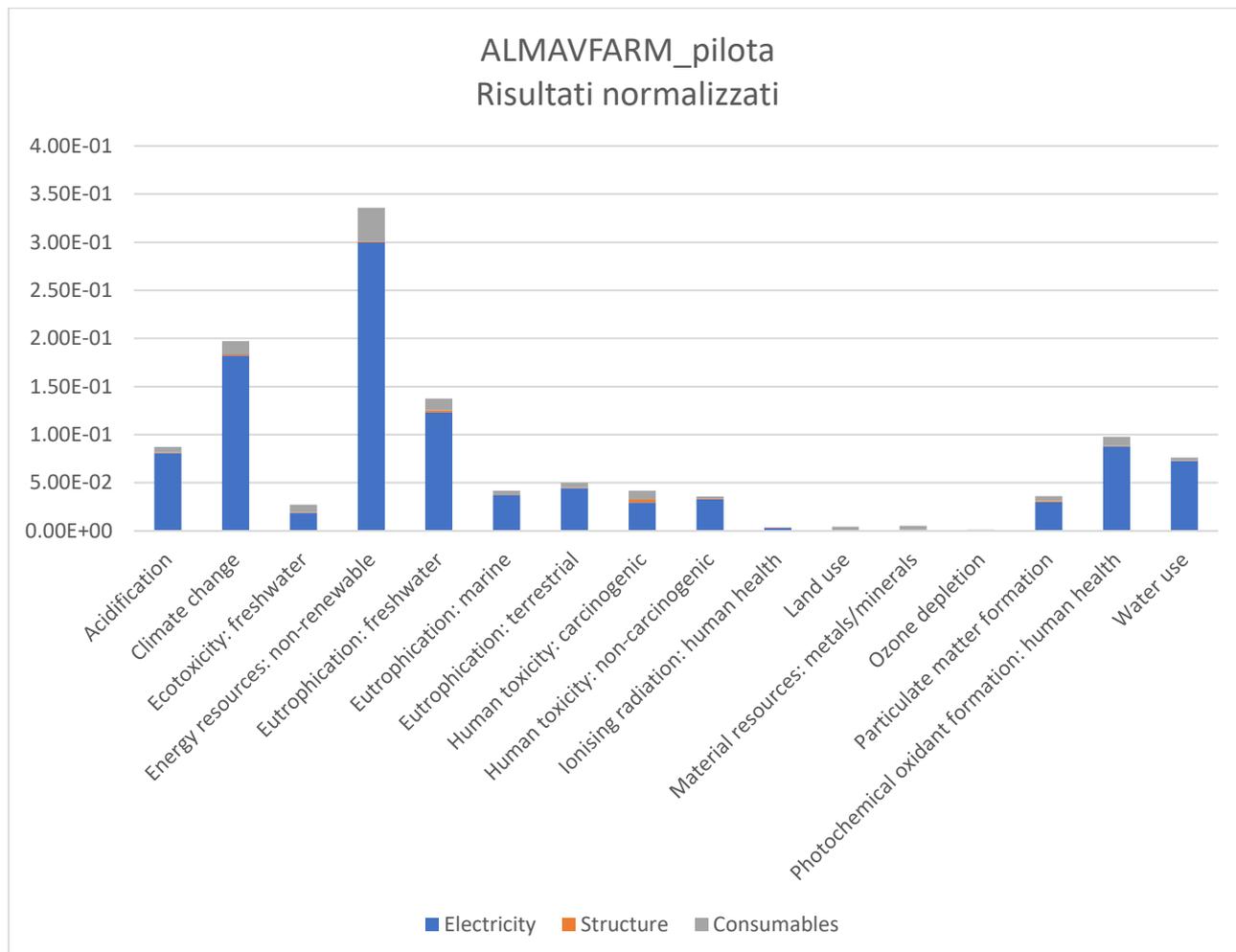


Figura 6 Analisi di impatto ambientale AlmaVFarm a livello pilota, risultati normalizzati

## 4.7 Valutazione d'impatto della struttura ottimizzata

### 4.6.1 Scenario A: ottimizzazione e occupazione totale con sistema idroponico

La valutazione ha messo in luce come, all'interno della struttura ottimizzata dotata esclusivamente di sistemi idroponici, l'energia elettrica rappresenti il principale hotspot ambientale nella produzione di lattuga baby leaf. Il consumo energetico è il processo che genera la maggior parte degli impatti in 15 categorie di impatto – ad eccezione di *Material Resources: Metals/Minerals* – con contributi dall'81% al 98%. La

Figura 7 mostra la scomposizione degli impatti ambientali tra elettricità, struttura e consumabili, ciascuno normalizzato al 100% per un ciclo di coltivazione di lattuga baby-leaf.



La Figura 8 presenta gli stessi risultati ponderati secondo il set di normalizzazione e pesatura dell'Environmental Footprint 3.1.

I contributi più elevati del consumo energetico sono stati osservati nelle categorie *Energy Resources – Non-renewable*, *Climate Change*, ed *Eutrophication: freshwater*, tutte riconducibili all'elevato consumo elettrico e alla composizione del mix energetico italiano che presenta tutt'ora un'importante porzione di energia prodotta da fonti fossili (metano).

Nell'unica categoria in cui l'elettricità non rappresenta l'hotspot principale, i consumabili del processo produttivo sono i responsabili del 44% delle esternalità. Infatti, i fertilizzanti utilizzati per arricchire la soluzione nutritiva causano impatti sulla categoria *Material Resources: Metals/Minerals* a causa delle attività di estrazione di minerali necessari alla loro produzione. Infine, per quanto riguarda la struttura, i suoi impatti sono trascurabili a causa della loro allocazione sulla vita utile dell'impianto e alla loro entità ridotta in confronto agli impatti dell'elettricità e dei consumabili.

Tabella 12 Risultati caratterizzati dell'analisi di impatto ambientale con design ottimizzato.

Impact category	Unità	Totale	Elettricità	Consumabili	Struttura
Acidification	mol H <sup>+</sup> -Eq	9.63E+00	9.46E+00	1.70E-01	3.52E-03
Climate change	kg CO <sub>2</sub> -Eq	2.97E+03	2.92E+03	5.24E+01	1.09E+00
Ecotoxicity: freshwater	CTUe	3.00E+03	2.72E+03	2.76E+02	0.00E+00
Energy resources: non-renewable	MJ, net calorific value	4.35E+04	4.24E+04	1.12E+03	9.39E+00
Eutrophication: freshwater	kg P-Eq	4.45E-01	4.34E-01	1.02E-02	6.45E-05
Eutrophication: marine	kg N-Eq	1.60E+00	1.56E+00	4.07E-02	0.00E+00
Eutrophication: terrestrial	mol N-Eq	1.74E+01	1.69E+01	5.12E-01	0.00E+00
Human toxicity: carcinogenic	CTUh	1.45E-06	1.34E-06	1.07E-07	0.00E+00
Human toxicity: non-carcinogenic	CTUh	9.11E-06	8.96E-06	1.58E-07	0.00E+00
Ionising radiation: human health	kBq U235-Eq	2.99E+01	2.91E+01	7.53E-01	0.00E+00
Land use	dimensionless	6.37E+03	5.41E+03	9.66E+02	0.00E+00
Material resources: metals/minerals	kg Sb-Eq	8.27E-04	2.93E-04	5.35E-04	0.00E+00
Ozone depletion	kg CFC-11-Eq	1.35E-04	1.09E-04	2.55E-05	7.57E-08
Particulate matter formation	disease incidence	4.03E-05	3.87E-05	1.59E-06	0.00E+00
Photochemical oxidant formation: human health	kg NMVOC-Eq	7.85E+00	7.66E+00	1.92E-01	0.00E+00
Water use	m <sup>3</sup> world Eq deprived	1.75E+03	1.73E+03	2.01E+01	9.21E-01

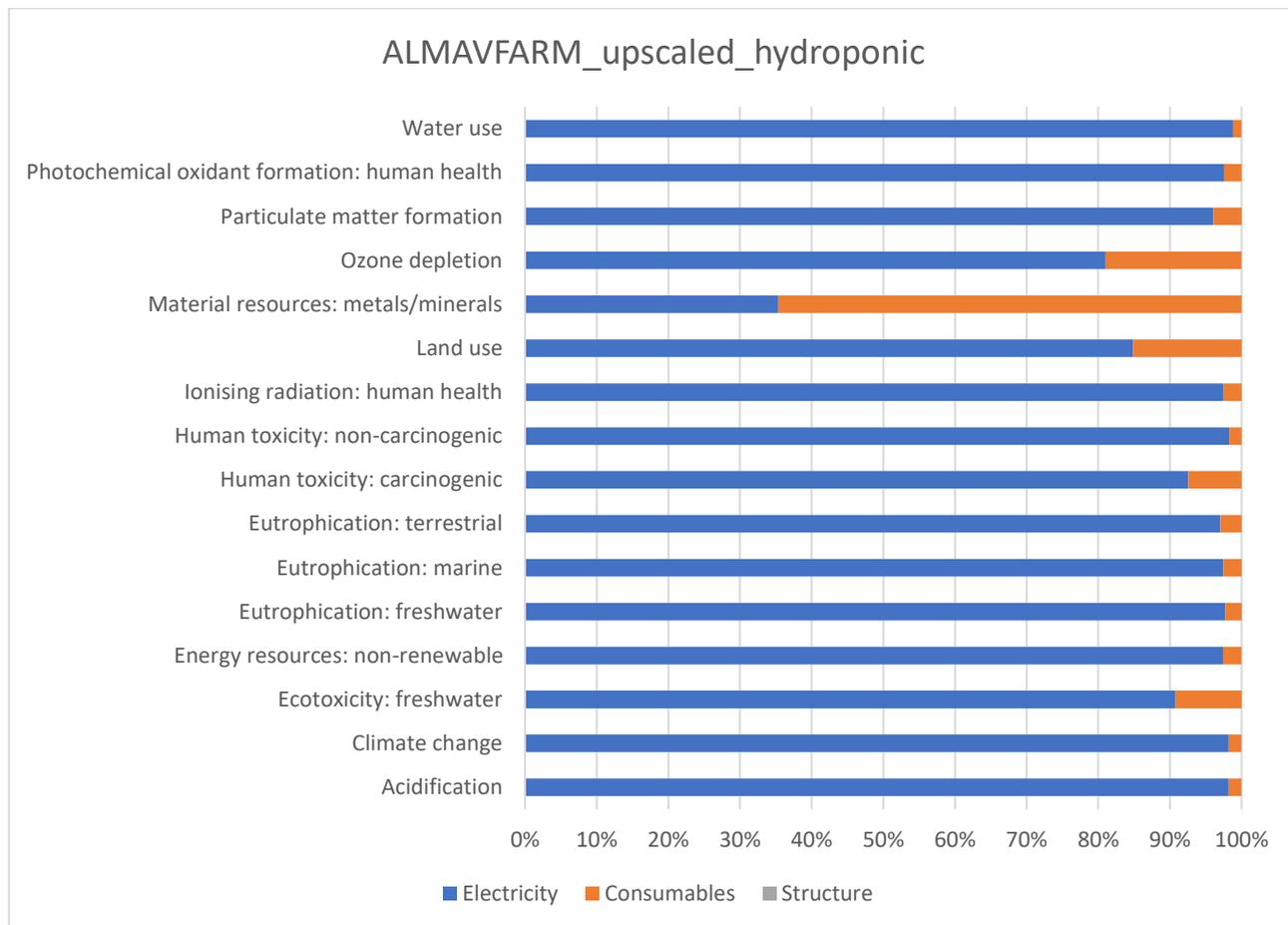


Figura 7 Analisi di impatto ambientale AlmaV Farm con design ottimizzato

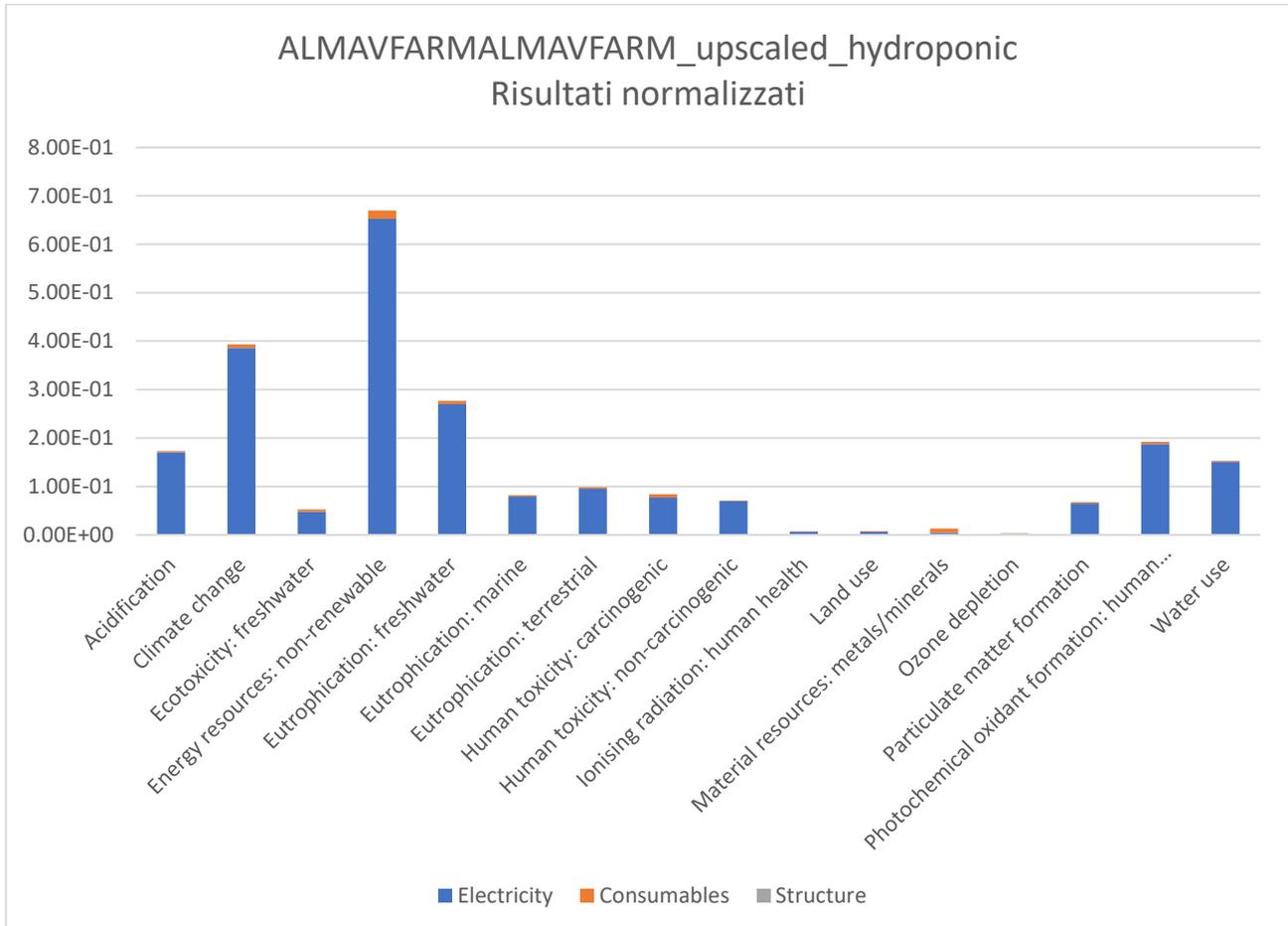


Figura 8 Analisi di impatto ambientale AlmaVFarm con design ottimizzato, risultati normalizzati

#### 4.6.2 Scenario B: ottimizzazione e occupazione totale con sistema aeroponico

Non diversamente dalla struttura a piena occupazione con sistemi idroponici, la struttura ottimizzata dotata esclusivamente di sistemi aeroponici presenta un analogo hotspot energetico. I contributi della compagine energetica superano, infatti, l'80% in ben 15 delle 16 categorie di impatto esaminate, come illustrato nelle due figure sottostanti. La Figura 9 mostra la scomposizione degli impatti ambientali tra elettricità, struttura e consumabili, ciascuno normalizzato al 100%, mentre la Figura 10 presenta gli stessi risultati ponderati secondo il set di normalizzazione e pesatura dell'Environmental Footprint 3.1.

In particolare, gli impatti più rilevanti sono stati osservati nelle categorie *Climate Change*, *Energy Resources – Non-renewable* ed *Eutrophication: freshwater*, il che è riconducibile



all'elevato consumo elettrico. Nella sola categoria in cui l'elettricità non costituisce l'hotspot principale – *Material Resources: Metals/Minerals* – sono i consumabili del processo produttivo i responsabili degli impatti più significativi. Il loro contributo percentuale (55%) risulta infatti superiore a quello dell'elettricità (44%). In questo contesto, l'impatto maggiore è riconducibile ai substrati necessari per il sistema aeroponico. I fertilizzanti – consumabili di tipo chimico – apportano a loro volta un contributo non trascurabile (15%), suggerendo l'impiego di sostanze o processi produttivi che richiedono risorse minerali o metalliche critiche per la loro sintesi. Nelle restanti categorie d'impatto, l'uso efficiente del sistema di coltivazione controllato fa sì che il loro impatto resti contenuto. Infine, per quanto riguarda i materiali costruttivi associati alla struttura di coltivazione, il loro impatto ambientale risulta del tutto marginale rispetto a quello di elettricità e consumabili.

Tabella 13 Risultati caratterizzati dell'analisi di impatto ambientale con design ottimizzato con sistema aeroponico

Impact category	Unità	Totale	Elettricità	Consumabili	Struttura
Acidification	mol H+-Eq	9,05E+00	8,88E+00	1,63E-01	0.00E+00
Climate change	kg CO2-Eq	2,77E+03	2,72E+03	5,18E+01	9,02E-01
Ecotoxicity: freshwater	CTUe	2,30E+03	2,08E+03	2,20E+02	4,06E-01
Energy resources: non-renewable	MJ, net calorific value	3,95E+04	3,84E+04	1,06E+03	9,29E+00
Eutrophication: freshwater	kg P-Eq	3,99E-01	3,90E-01	9,34E-03	0.00E+00
Eutrophication: marine	kg N-Eq	1,48E+00	1,44E+00	3,84E-02	3,99E-06
Eutrophication: terrestrial	mol N-Eq	1,60E+01	1,55E+01	4,79E-01	8,91E-04
Human toxicity: carcinogenic	CTUh	1,07E-06	9,88E-07	8,00E-08	8,41E-11
Human toxicity: non-carcinogenic	CTUh	8,49E-06	8,34E-06	1,53E-07	0.00E+00
Ionising radiation: human health	kBq U235-Eq	2,68E+01	2,61E+01	6,87E-01	8,51E-03
Land use	dimensionless	6,24E+03	5,25E+03	9,95E+02	0.00E+00
Material resources: metals/minerals	kg Sb-Eq	2,89E-04	1,27E-04	1,62E-04	0.00E+00
Ozone depletion	kg CFC-11-Eq	6,97E-05	5,64E-05	1,34E-05	0.00E+00
Particulate matter formation	disease incidence	3,64E-05	3,49E-05	1,50E-06	0.00E+00
Photochemical oxidant formation: human health	kg NMVOC-Eq	7,23E+00	7,05E+00	1,80E-01	8,75E-04
Water use	m3 world Eq deprived	1,67E+03	1,65E+03	1,98E+01	2,27E-01

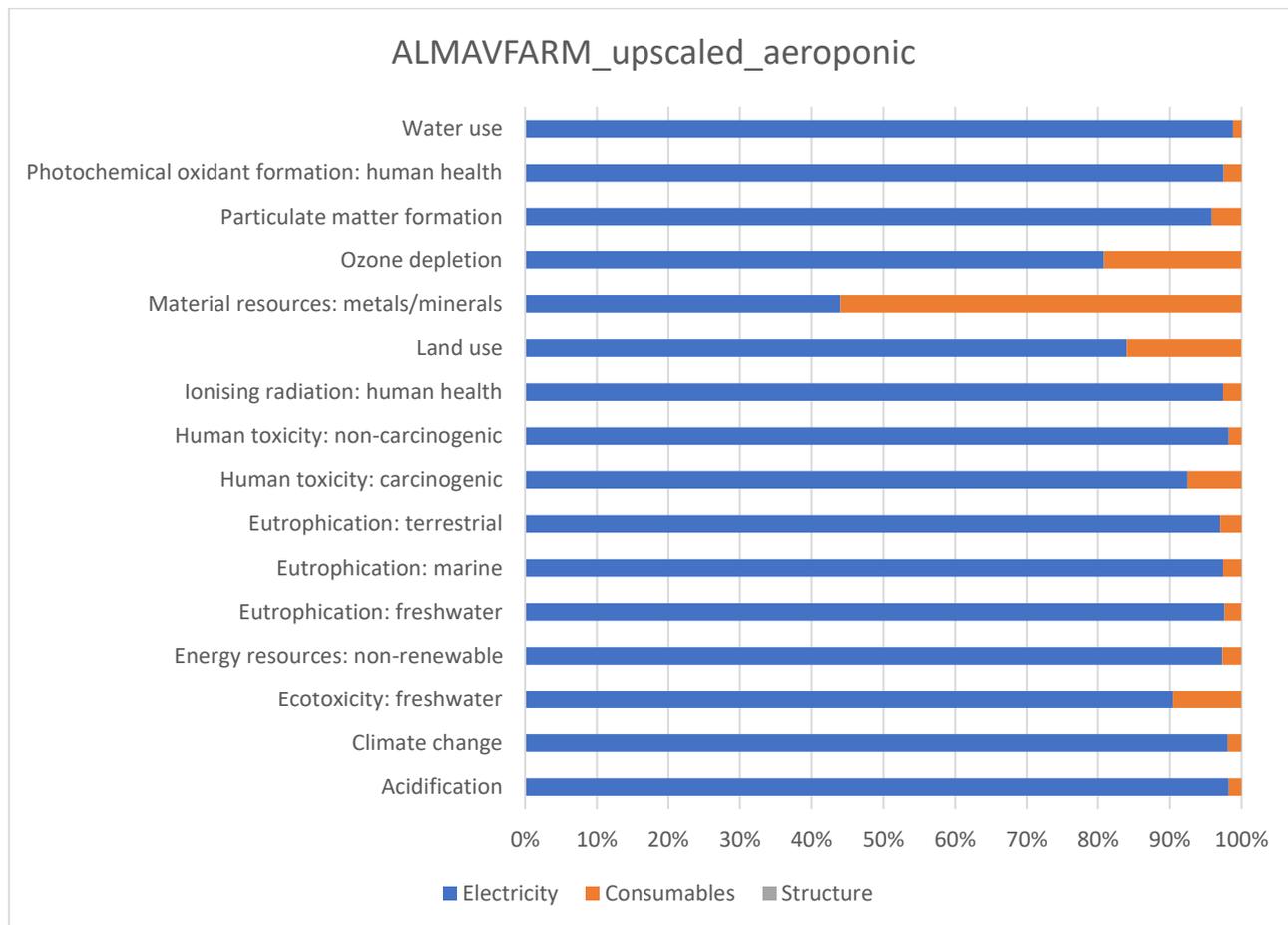


Figura 9 Analisi di impatto ambientale AlmaV Farm con design ottimizzato con sistema aeroponico

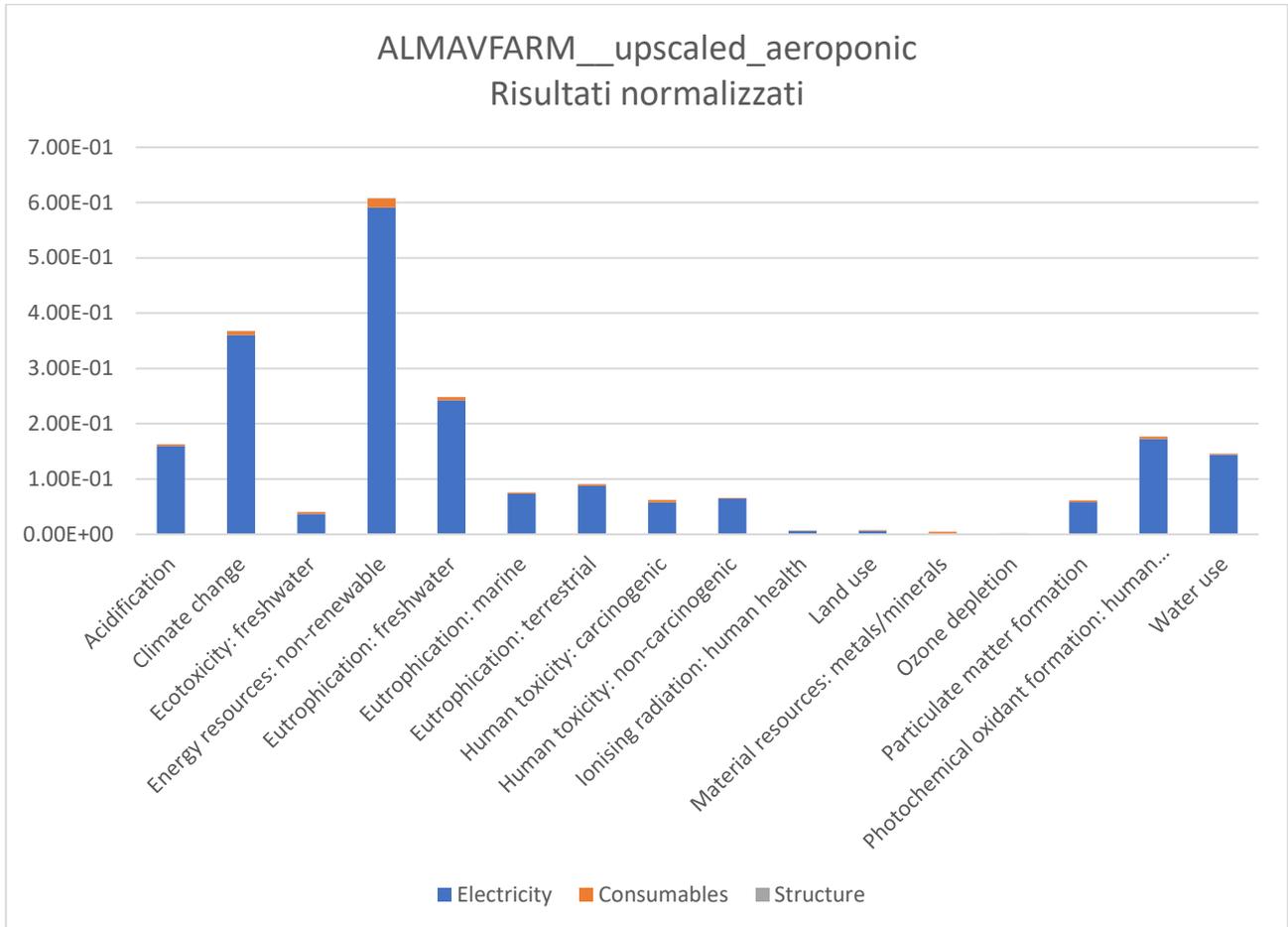


Figura 10 Analisi di impatto ambientale AlmaVFarm con design ottimizzato con sistema aeroponico, risultati normalizzati



## 5. Comparazione e discussione dei risultati della valutazione di sostenibilità

L'analisi dell'impatto ambientale condotta sui tre scenari – struttura pilota, struttura ottimizzata con sistema idroponico (Scenario A), e struttura ottimizzata con sistema aeroponico (Scenario B) – ha messo in evidenza trend ricorrenti in termini di hotspot ambientali e contributi specifici delle diverse componenti produttive (elettricità, consumabili, struttura).

In primo luogo, il consumo elettrico può essere identificato come hotspot dominante poichè in tutti e tre gli scenari è stato evidenziato come il principale fattore di impatto ambientale. L'elettricità contribuisce in modo rilevante – spesso superiore all'80% – alla maggior parte delle categorie di impatto analizzate, in particolare *Climate Change*, *Energy Resources – Non-renewable* e *Eutrophication – Freshwater*. Questo è strettamente legato al mix energetico nazionale, ancora fortemente dipendente da fonti fossili, evidenziando l'importanza di una transizione energetica verso fonti rinnovabili per la sostenibilità dei sistemi di agricoltura indoor.

I consumabili, seppur generalmente secondari rispetto all'elettricità, assumono importanza crescente in alcune categorie specifiche, come *Material Resources: Metals/Minerals* e *Land Use*. L'impatto è più marcato nei sistemi aeroponici a causa dell'uso di substrati tecnologicamente avanzati e fertilizzanti specifici. In particolare, lo Scenario B evidenzia come i consumabili possano superare l'elettricità in alcune categorie, rappresentando fino al 55% dell'impatto sui metalli/minerali.

Infine, in tutti gli scenari analizzati, l'impatto ambientale associato alla struttura fisica dell'impianto risulta trascurabile. Questo è dovuto sia alla distribuzione dell'impatto lungo l'intera vita utile dell'impianto sia alla relativa efficienza dell'uso di materiali. La progettazione e la durabilità delle strutture sono quindi un punto di forza per la sostenibilità del sistema.

Se si effettua una comparazione dei tre scenari in termini di impatto ambientale per ciclo produttivo (Figura 11) è possibile apprezzare come lo scenario aeroponico (scenario B) generi maggiori impatti ambientali per ciclo produttivo. Infatti, il sistema aeroponico rispetto alla struttura pilota e allo scenario idroponico esercita dei maggiori impatti principalmente nelle categorie *Acidification*, *Climate change*, *Energy resources: non-renewable*,



*Eutrophication: freshwater, Eutrophication: marine, e Water use* a causa della maggiore richiesta di energia elettrica e di acqua.

Adottando una prospettiva di prodotto, e quindi suddividendo gli impatti per kg di lattuga baby leaf ottenuta dagli impianti, si può notare come lo scenario idroponico sia quello più performante in termini di impatto ambientale (Figura 12). Infatti, entrambi gli scenari ottimizzati permettono di ridurre l'impatto generato per la produzione della lattuga baby leaf. Nel caso dello scenario A (idroponico) si può osservare una riduzione del 71% degli impatti rispetto allo scenario attuale della struttura pilota, mentre per lo scenario B (aerotonico) si registrano riduzioni d'impatto del 42%. Se si confrontano tra loro gli scenari ottimizzati si può notare come lo scenario idroponico generi circa la metà (51%) degli impatti prodotti dallo scenario B a parità di prodotto. Tale fenomeno è riconducibile al minor consumo energetico e idrico dello scenario A e anche alla maggiore produttività per ciclo che è in grado di offrire.

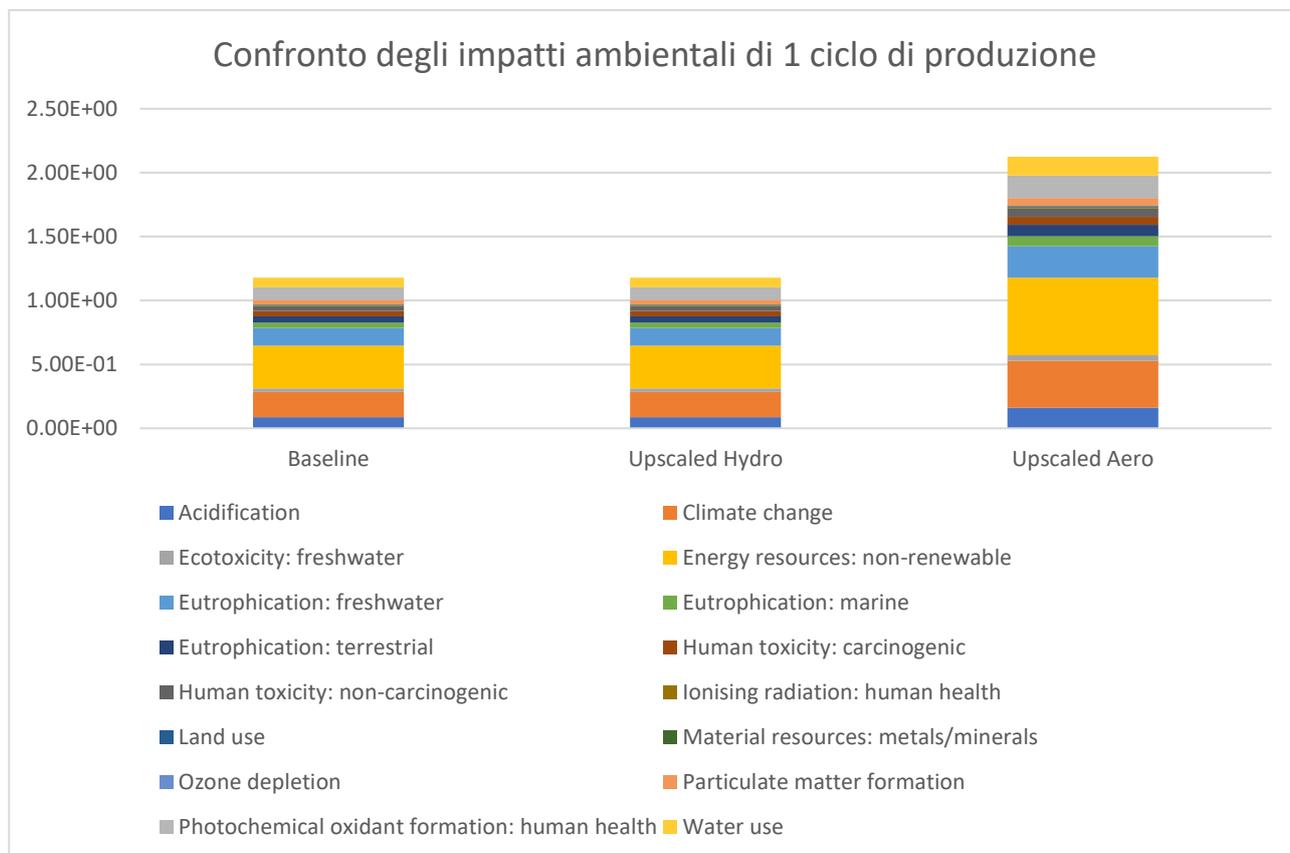


Figura 11 Impatti delle strutture ottimizzate a confronto con la struttura pilota per ciclo produttivo

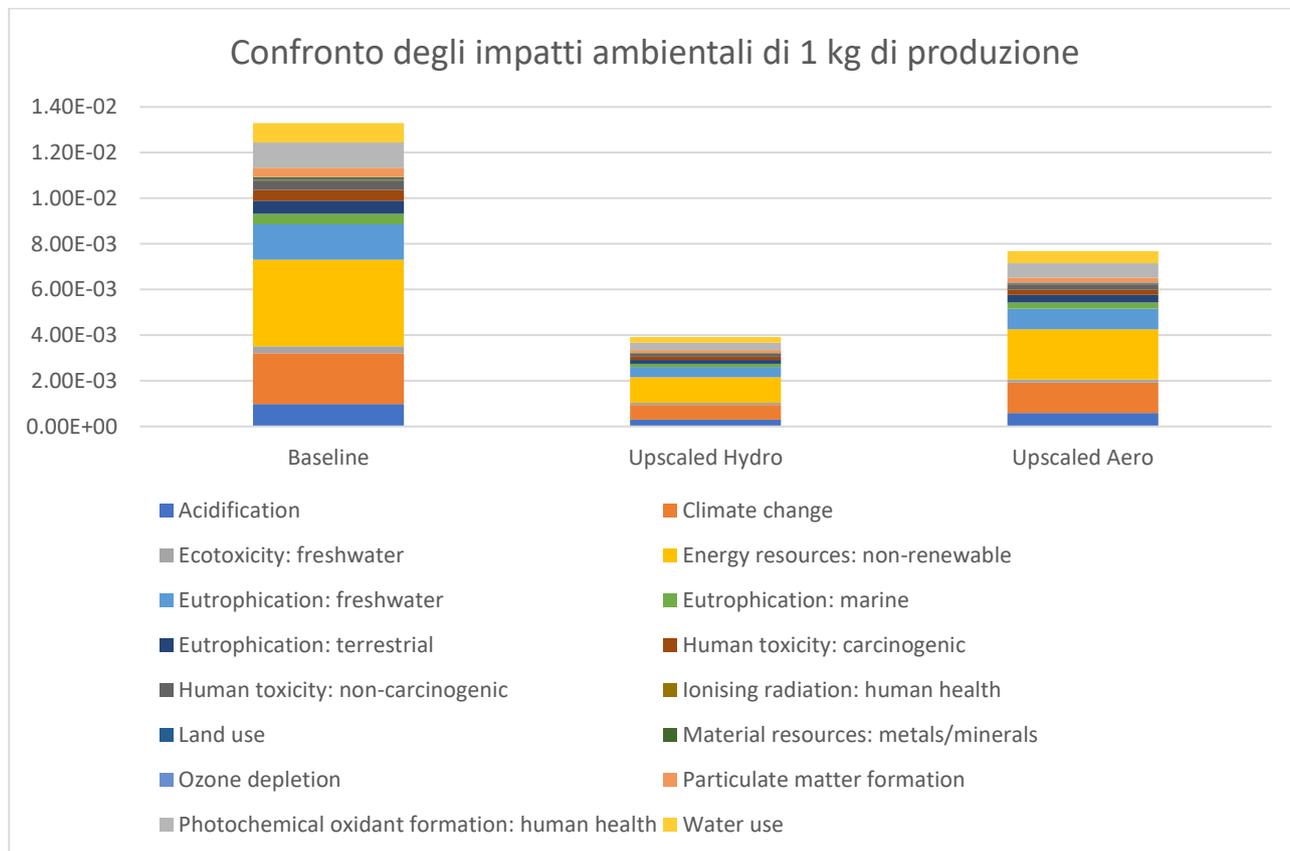


Figura 12 Impatti delle strutture ottimizzate a confronto con la struttura pilota per kg di prodotto ottenuto

## 6. Conclusioni

L'analisi dell'impatto ambientale condotta sui tre scenari – struttura pilota, struttura ottimizzata con sistema idroponico e struttura ottimizzata con sistema aeroponico – ha permesso di identificare chiaramente il consumo di energia elettrica come hotspot dominante, seguito dall'impatto dei consumabili, soprattutto nei sistemi tecnologicamente avanzati. Tuttavia, i risultati ottenuti suggeriscono una riflessione più ampia sul ruolo che il vertical farming può assumere in un futuro sostenibile. L'ottimizzazione degli impianti, come evidenziato dallo scenario idroponico, rappresenta una strategia di sviluppo che non solo riduce gli impatti ambientali per unità di prodotto, ma rappresenta anche una leva strategica per ripensare il sistema agroalimentare urbano, accorciando le filiere e rendendo la produzione più resiliente e vicina al consumo. L'integrazione di fonti energetiche rinnovabili resta un elemento chiave per la riduzione dell'impatto di questi sistemi produttivi e per la loro applicabilità su larga scala



e in diversi contesti. Pertanto, una combinazione tra ottimizzazione delle strutture produttive e uso di energia da fonti energetiche rinnovabili possono promuovere il vertical farming come modello di riferimento per una nuova agricoltura urbana, capace di produrre alimenti in contesti con scarsa disponibilità di suolo e riducendo il consumo di risorse.

## **7. Bibliografia e sitografia**

Zampori, L. and Pant, R., Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-00653-4, doi:10.2760/265244, JRC115959.