



**VFARM**

# Vertical Farming Sostenibile

## **D3.2. ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE IN 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 del documento</b>
<b>Titolo:</b>	<b>D3.2 ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE IN VERTICAL FARM</b>
<b>Work Package:</b>	<b>3</b>
<b>Partner responsabile:</b>	<b>University of Bologna</b>
<b>Autori principali:</b>	<b>Ilaria Zauli, Laura Carotti, Giuseppina Pennisi, Francesco Orsini</b>
<b>Altri autori:</b>	
<b>Numero di pagine:</b>	<b>24</b>



## Indice dei contenuti

1. Introduzione.....	4
1.1 Obiettivi del progetto .....	4
1.2 Obiettivi del Deliverable.....	5
1.3 Illuminazione artificiale in vertical farm e gestione della qualità spettrale .....	5
2. Valutazione dell'integrazione di uno spettro bianco in un rapporto rosso:blu per ottimizzare la produzione di cavolo baby-leaf in vertical farm .....	7
2.1 Materiali e metodi.....	7
2.2 Risultati .....	8
2.3 Conclusione.....	10
3. Gestione ottimale della dose di radiazione del rosso lontano (FR) per la crescita di lattuga in vertical farm.....	12
3.1 Materiali e metodi.....	12
3.2 Risultati.....	13
3.3 Conclusione.....	17
4. Ottimizzazione dell'efficienza nell'uso della luce in una vertical farm tramite modulazione dell'intensità della luce, del fotoperiodo e della radiazione FR .	18
4.1 Materiali e metodi .....	18
4.2 Risultati.....	19
4.3 Conclusione.....	23
5. Bibliografia.....	24



# 1. Introduzione

## 1.1 Obiettivi del progetto

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 mira a 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.

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).



## 1.2 Obiettivi del Deliverable

Il WP3 ha lo scopo di progettare soluzioni tecnologiche ottimali per le *vertical farm*, focalizzandosi in particolare su:

1. Sistemi di coltivazione
2. Illuminazione LED
3. Tecnologie al plasma (PAW) per il controllo delle fitopatologie e l'aumento della crescita delle piante
4. Sensori e diagnostica per la gestione automatizzata delle colture
5. Ottimizzazione del controllo del clima e dell'efficienza nell'uso delle risorse.

L'obiettivo di questa deliverable (3.2) è l'analisi dell'utilizzo di illuminazione artificiale in vertical farm. I casi studio presentati si riferiscono a prove sperimentali condotte all'interno di AlmaVFarm, la vertical farm sperimentale dell'Università di Bologna (Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari). In particolare, questo deliverable vuole riportare le ricerche svolte per studiare gli effetti principali dell'utilizzo di diversi rapporti rosso:blu (RB) e l'inclusione di lunghezze d'onda nella regione del verde (G) e del rosso lontano (FR) sulla coltivazione di diverse specie orticole, includendo sia specie modello come lattuga (*Lactuca sativa* L.) o colture innovative come baby-leaf quali cavolo (*Brassica oleracea*).

## 1.3 Illuminazione artificiale in vertical farm e gestione della qualità spettrale

La luce è una risorsa cruciale per le piante, infatti guida i loro processi fotosintetici e di crescita, con una funzione importante nel condizionare sia la loro morfologia che fisiologia (Fankhauser e Chory, 1997). Nell'agricoltura indoor, poiché la luce è fornita esclusivamente tramite dispositivi artificiali, è possibile fornire specifiche condizioni luminose in base alle esigenze delle piante. In particolare, con la regolazione puntuale dell'intensità luminosa, del



fotoperiodo o la qualità spettrale, lo sviluppo delle piante può essere influenzato, sia positivamente che negativamente. Le luci LED sono oggi la prima scelta nel campo dell'orticoltura, grazie alle loro caratteristiche di regolazione e progettazione, che li rendono altamente adattabili a diverse colture (Kozai, 2016).

Le ricette di illuminazione più utilizzate solitamente includono fotoni nella regione del rosso (R) e blu (B), spesso in combinazione fra loro (risultanti in un mix rosso:blu, RB), poiché i picchi di assorbimento della clorofilla, il principale pigmento responsabile dell'assorbimento della luce, corrispondono alle lunghezze d'onda del rosso e del blu (Stamford et al., 2023). La luce bianca (W) comprende invece tutta la radiazione fotosinteticamente attiva (PAR), quindi le lunghezze d'onda del rosso e del blu oltre alla regione del verde. Il verde (500-600 nm) ha una maggiore capacità di penetrare e quindi di stimolare la fotosintesi negli strati inferiori della coltivazione rispetto alla luce R e B (Stamford et al., 2023). Inoltre, l'inclusione di una componente bianca nello spettro è stata suggerita come mezzo per facilitare il lavoro umano e l'identificazione visiva dei sintomi di stress nelle piante, anche se comporta costi energetici più elevati rispetto a una sola miscela RB (Kusuma et al., 2020).

Recentemente, le lunghezze d'onda del rosso lontano (FR, 700–750 nm) sono state ampiamente studiate nei sistemi di coltivazione indoor a causa dei loro effetti morfologici sulle piante (ad esempio, espansione delle foglie e allungamento dello stelo), con conseguente aumento della resa. Difatti, l'utilizzo di FR induce la cosiddetta "sindrome da evitamento dell'ombra" (SAS), una serie di risposte della pianta che permettono di catturare quanta più luce possibile (Smith, 2000). Quando le piante si trovano in un ambiente con scarsa illuminazione (dove il rapporto R:FR, un indicatore del grado di ombra, è basso), è necessario per la pianta avere una maggiore intercettazione della luce per poter svilupparsi (Casal e Smith, 1989; Franklin, 2008) portando all'allungamento del fusto e delle foglie, insieme a cambiamenti nell'orientamento verso l'alto di quest'ultime (Franklin, 2008; Fankhauser e Batschauer; 2016).



## 2. Valutazione dell'integrazione di uno spettro bianco in un rapporto rosso:blu per ottimizzare la produzione di cavolo baby-leaf in vertical farm

### 2.1 Materiali e metodi

Le piante di kale (*Brassica oleracea*. cv. 'Baby Kale #4.51) sono state seminate e poste nel sistema ebb-and-flow di AlmaVFarm per 21 giorni dalla semina (Days After Sowing, DAS) fino al raggiungimento della fase commerciale di produzione delle baby-leaf ad una densità di semina di circa 1950 piante  $m^{-2}$ . Dopo la semina, le piante sono state sottoposte a 4 specifici trattamenti con luci LED, caratterizzati nei primi due trattamenti da due diversi rapporti RB, ovvero R:B=1:1 (RB<sub>1</sub>) e R:B=3:1 (RB<sub>3</sub>), e i restanti trattamenti dagli stessi rapporti con incluso uno sfondo di spettro bianco (W), ottenendo W-RB<sub>3</sub> e W-RB<sub>1</sub>. I trattamenti luminosi condividevano lo stesso fotoperiodo e intensità luminosa come mostrato in Tabella 1.

Tabella 1. Schema delle condizioni luminose applicate, indicante gli spettri utilizzati (RB<sub>3</sub>, W-RB<sub>3</sub>, RB<sub>1</sub> e W-RB<sub>1</sub>), il fotoperiodo (h d<sup>-1</sup>) e l'intensità luminosa ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) per ciascun trattamento.

Trattamenti luminosi	Fotoperiodo (h d <sup>-1</sup> )	Intensità luminosa ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
RB <sub>3</sub>	16	220
W-RB <sub>3</sub>		
RB <sub>1</sub>		
W-RB <sub>1</sub>		



Sono stati poi calcolati i seguenti parametri per una valutazione della crescita, resa ed efficienza d'uso delle risorse della coltura sotto i diversi trattamenti luminosi:

- Resa, espressa in kg di peso fresco (fresh weight, FW),  $\text{kg FW m}^{-2}$ ;
- Efficienza d'uso dell'energia luminosa (L-EUE), espressa come  $\text{g FW kWh}^{-1}$ ;
- Efficienza d'uso dell'acqua (WUE), espressa come  $\text{g FW L}^{-1} \text{H}_2\text{O}$ ;
- Efficienza d'uso della superficie coltivata (SUE), misurata come la resa annuale ed espressa come  $\text{kg m}^{-2} \text{y}^{-1}$ ;

## 2.2 Risultati

La resa finale ottenuta dopo 21 giorni di coltivazione ha mostrato un aumento statisticamente significativo della produzione quando è stata applicata una percentuale maggiore di R. Infatti, entrambi i trattamenti in cui il rapporto  $\text{RB}=3:1$ , nonostante la presenza di una porzione bianca, hanno prodotto la resa più elevata (in media  $4 \text{ kg FW m}^{-2}$ ). Al contrario, con il rapporto  $\text{RB}=1:1$ , è stata registrata una resa inferiore (media di  $2.9 \text{ kg FW m}^{-2}$ ) (Fig. 1).

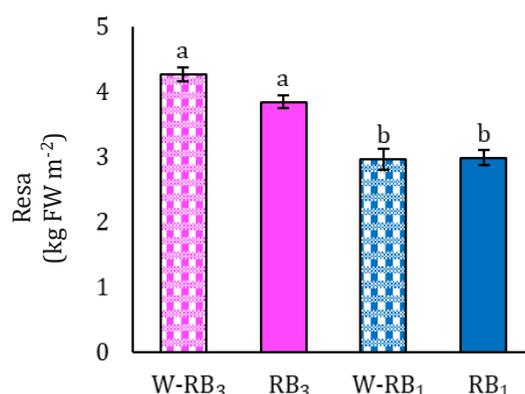


Figura 1. Resa finale ( $\text{kg FW m}^{-2}$ ) di cavolo baby-leaf coltivato per 21 giorni sotto i quattro diversi spettri di luce nel sistema ebb-and-flow. Vengono riportati i dati  $\pm$  errori standard ( $n = 30$ ). Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test post-hoc di Tukey per la separazione media con  $p < 0.05$ .



Dal punto di vista dell'uso delle risorse, si evidenzia una chiara tendenza per quanto riguarda i parametri di WUE, L-EUE e SUE, con un effetto notevole nel rapporto RB pari a 3 (Fig. 2). Considerando il WUE e che il consumo di acqua era lo stesso per tutti i regimi di illuminazione, i dati ottenuti hanno seguito lo stesso andamento della resa: il WUE più alto è stato osservato per W-RB<sub>3</sub> e RB<sub>3</sub> rispettivamente con 24.5 e 22.1 g di FW L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O, senza mostrare differenze significative (Fig. 2A). Invece, quando si tratta del parametro del L-EUE, i risultati si basano sulla resa e sul consumo energetico che è unico per ogni trattamento luminoso. In questo caso, gli spettri con il consumo energetico più basso, vale a dire W-RB<sub>3</sub> e RB<sub>3</sub> sono stati anche quelli con la resa maggiore, consentendo una L-EUE media di 64.5 g FW kWh<sup>-1</sup> (Fig. 2B), senza mostrare differenze statisticamente significative fra loro, ma solo in confronto a W-RB<sub>1</sub> e RB<sub>1</sub>. Per il calcolo del SUE, la massima efficienza nell'uso della superficie è stata valutata a circa 69 kg m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup> per W-RB<sub>3</sub> e RB<sub>3</sub> (Fig. 2C).

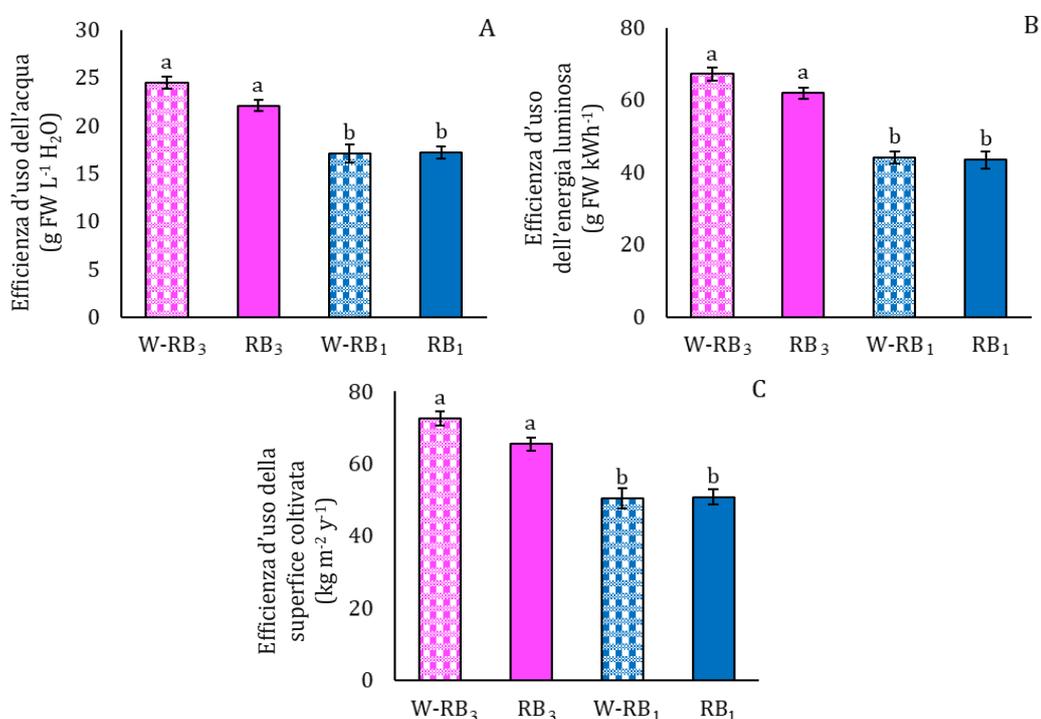


Figura 2. Efficienza nell'uso dell'acqua (WUE, g FW L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O), B) efficienza nell'uso dell'energia luminosa (L-EUE, g FW kWh<sup>-1</sup>) e C) efficienza d'uso della superficie coltivata (SUE, kg m<sup>-2</sup> y<sup>-1</sup>) di cavolo baby-leaf coltivato per 21 giorni sotto i quattro diversi spettri di luce nel sistema ebb-and-flow. Vengono riportati i dati ± errori standard (n = 30). Lettere diverse indicano differenze statisticamente significative secondo il test post-hoc di Tukey per la separazione media con p < 0.05.

## 2.3 Conclusione

Le risposte delle piante ai trattamenti luminosi sono spesso specie-specifiche. In questo lavoro sono stati presentati dati utili alla produzione di cavolo baby-leaf in un sistema ebb-and-flow in vertical farm. In questo caso, l'utilizzo di uno spettro luminoso con una percentuale più elevata di R ha comportato una maggiore resa fresca, contribuendo così a migliorare l'efficienza nell'uso dell'acqua, della superficie coltivata e dell'energia per l'illuminazione. Tuttavia, l'inclusione di uno spettro di fondo bianco completo (comprese le lunghezze



d'onda nella regione del verde) nell'RB<sub>3</sub> (W-RB<sub>3</sub>), non ha influenzato maggiormente la crescita e l'efficienza nell'uso delle risorse della coltura, non mostrando variazioni significative.



### **3. Gestione ottimale della dose di radiazione del rosso lontano (FR) per la crescita di lattuga in vertical farm**

#### **3.1 Materiali e metodi**

Le piante di lattuga (*Lactuca sativa* L., var. Canasta) sono state coltivate nel sistema aeroponico di AlmaVFarm per 14 giorni dalla semina fino al raggiungimento dello stadio della seconda foglia vera. Successivamente, sono state trapiantate e spostate nel sistema ebb-and-flow della stessa struttura per ulteriori 29 giorni dal trapianto (Days After Transplant, DAT), fino alla raccolta, con una densità di semina di circa 153 piante  $\text{m}^{-2}$ . Dal trapianto ai 29 DAT, le piante sono state sottoposte a 5 specifici trattamenti con luci LED: un trattamento di controllo composto da R:B=3:1 (RB<sub>3</sub>) e quattro diversi trattamenti in cui 10, 30, 50 e 70  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  di radiazione R e B sono stati sostituiti dalla stessa quantità di radiazione FR. In tutti i trattamenti, il rapporto RB è stato mantenuto costante a 3:1, così come l'intensità luminosa usata (200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e il fotoperiodo (16 h  $\text{d}^{-1}$ ). La Tabella 2 riassume i trattamenti luminosi usati.



Tabella 2. Caratteristiche spettrali (intensità della radiazione  $RB_3$  e  $FR$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), frazione far-red ( $FR/R+FR$ ) e percentuale di radiazione far-red nello spettro per i cinque diversi trattamenti luminosi applicati.

Trattamenti luminosi	$RB_3$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	$FR$ ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Frazione $FR$ ( $FR/R+FR$ )	Percentuale $FR$ (%)
$RB_3$	200	0	0	0
$RB_3$ -10	190	10	0.07	5
$RB_3$ -30	170	30	0.2	15
$RB_3$ -50	150	50	0.3	25
$RB_3$ -70	130	70	0.4	35

Sono stati poi calcolati i seguenti parametri per una valutazione della crescita, resa ed efficienza d'uso delle risorse della coltura sotto i diversi trattamenti luminosi:

- Peso fresco (fresh weight, FW) delle foglie (LFW),  $\text{g pianta}^{-1}$ ;
- Peso secco (dry weight, DW) delle foglie (LDW),  $\text{g pianta}^{-1}$ ;
- Efficienza d'uso dell'energia luminosa (L-EUE), espressa come  $\text{g FW kWh}^{-1}$ ;
- Efficienza d'uso della luce (LUE), misurato come  $\text{g DW mol}^{-1}$ ;
- Indice di area fogliare, calcolato come  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ;
- Altezza della pianta, misurata in  $\text{cm pianta}^{-1}$ ;
- Area fogliare specifica, derivata dall'area fogliare ( $\text{cm}^2 \text{pianta}^{-1}$ ) e calcolata come  $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ;
- Rapporto lunghezza/larghezza foglia, misurato in  $\text{cm cm}^{-1}$ .

## 3.2 Risultati

Il peso fresco e secco delle foglie sono stati influenzati dalla quantità di radiazione  $FR$  a partire da 15 DAT (Fig. 3A, 3B). Per entrambi i parametri, non sono state osservate differenze statisticamente significative tra  $RB_3$ -10 e il controllo in qualsiasi fase del ciclo di crescita. Alla raccolta finale, 29 DAT,



quando è stato applicato  $FR > 30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  l'aumento del FW è variato dal 47 al 64% rispetto al controllo, raggiungendo  $28.22 \text{ g pianta}^{-1}$  con il trattamento  $RB_3-70$  (Fig. 3A). I valori di DW hanno invece mostrato un andamento diverso rispetto a quelli del FW. In particolare, a 29 DAT, solo  $RB_3-30$  e  $RB_3-50$  hanno aumentato il DW rispetto a  $RB_3$  (+42 e +45%) (Fig. 3B).

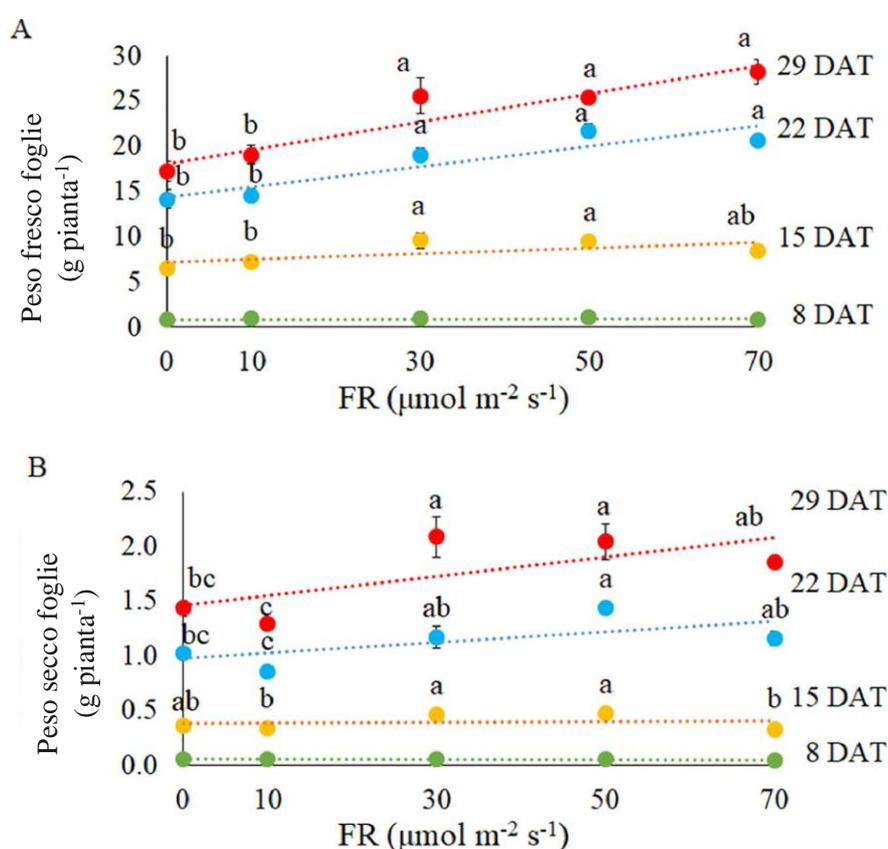


Fig. 3. Risultati per A) peso fresco delle foglie ( $\text{g pianta}^{-1}$ ) e B) peso secco delle foglie ( $\text{g pianta}^{-1}$ ) delle piante a 8, 15, 22 e 29 DAT coltivate con cinque trattamenti. I trattamenti luminosi contenevano rispettivamente 0, 10, 30, 50 e  $70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  di radiazione FR. Ogni valore è la media di tre repliche, ciascuna con 5 piante replicate. Le barre verticali rappresentano gli errori standard. Lettere diverse indicano differenze significative, secondo il test ANOVA e il test post-hoc di Tukey per la separazione media con  $p \leq 0.05$ .

Anche l'efficienza nell'uso dell'energia luminosa è variata a partire da 15 DAT in base alla radiazione FR presente nello spettro, con un aumento a 15 DAT



con RB<sub>3</sub>-30 e RB<sub>3</sub>-50 (+45–47%), a 22 DAT con RB<sub>3</sub>-30, RB<sub>3</sub>-50 50 e RB<sub>3</sub>-70 (+28–52 %) e lo stesso a 29 DAT (+48–67 %) (Tab. 3).

*Tabella 3. Efficienza nell'uso dell'energia luminosa (L-EUE; g FW kWh<sup>-1</sup>) di lattughe a 8, 15, 22 e 29 DAT coltivate con cinque trattamenti luminosi. I trattamenti luminosi contenevano rispettivamente 0, 10, 30, 50 e 70 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> di radiazione FR. Vengono riportati i dati ± errori standard. Lettere diverse indicano differenze significative, secondo il test ANOVA e il test post-hoc di Tukey per la separazione media con p ≤ 0.05.*

Trattamenti luminosi	Efficienza d'uso dell'energia luminosa (g FW kWh <sup>-1</sup> )			
	8 DAT	15 DAT	22 DAT	29 DAT
<b>RB<sub>3</sub></b>	6.51 ± 0.40 a	24.73 ± 1.35 c	36.42 ± 2.55 d	32.18 ± 2.16 b
<b>RB<sub>3</sub>-10</b>	7.19 ± 0.22 a	28.10 ± 1.72 bc	40.27 ± 0.48 cd	36.43 ± 2.07 b
<b>RB<sub>3</sub>-30</b>	6.71 ± 0.51 a	36.29 ± 3.25 a	46.70 ± 1.80 bc	47.78 ± 3.72 a
<b>RB<sub>3</sub>-50</b>	8.36 ± 0.38 a	35.80 ± 1.56 a	55.49 ± 1.61 a	49.21 ± 2.18 a
<b>RB<sub>3</sub>-70</b>	6.60 ± 0.64 a	32.44 ± 1.32 abc	53.19 ± 0.62 ab	53.75 ± 2.46 a

È stata riscontrata una correlazione positiva e significativa tra l'indice dell'area fogliare (LAI) e LUE (R<sup>2</sup>=0,52, valore p ≤ 0.01) e L-EUE (R<sup>2</sup>=0.92, valore p ≤ 0.001) a 29 DAT (Fig. 4A), così come tra L-EUE e L:W (R<sup>2</sup>=0.63, valore p ≤ 0.001, Fig. 4B), PH (R<sup>2</sup>=0.77, valore p ≤ 0.001, Fig. 4C) e l'area fogliare specifica (R<sup>2</sup>=0.52, valore p ≤ 0.01, Fig. 4D) a partire da 29 DAT.

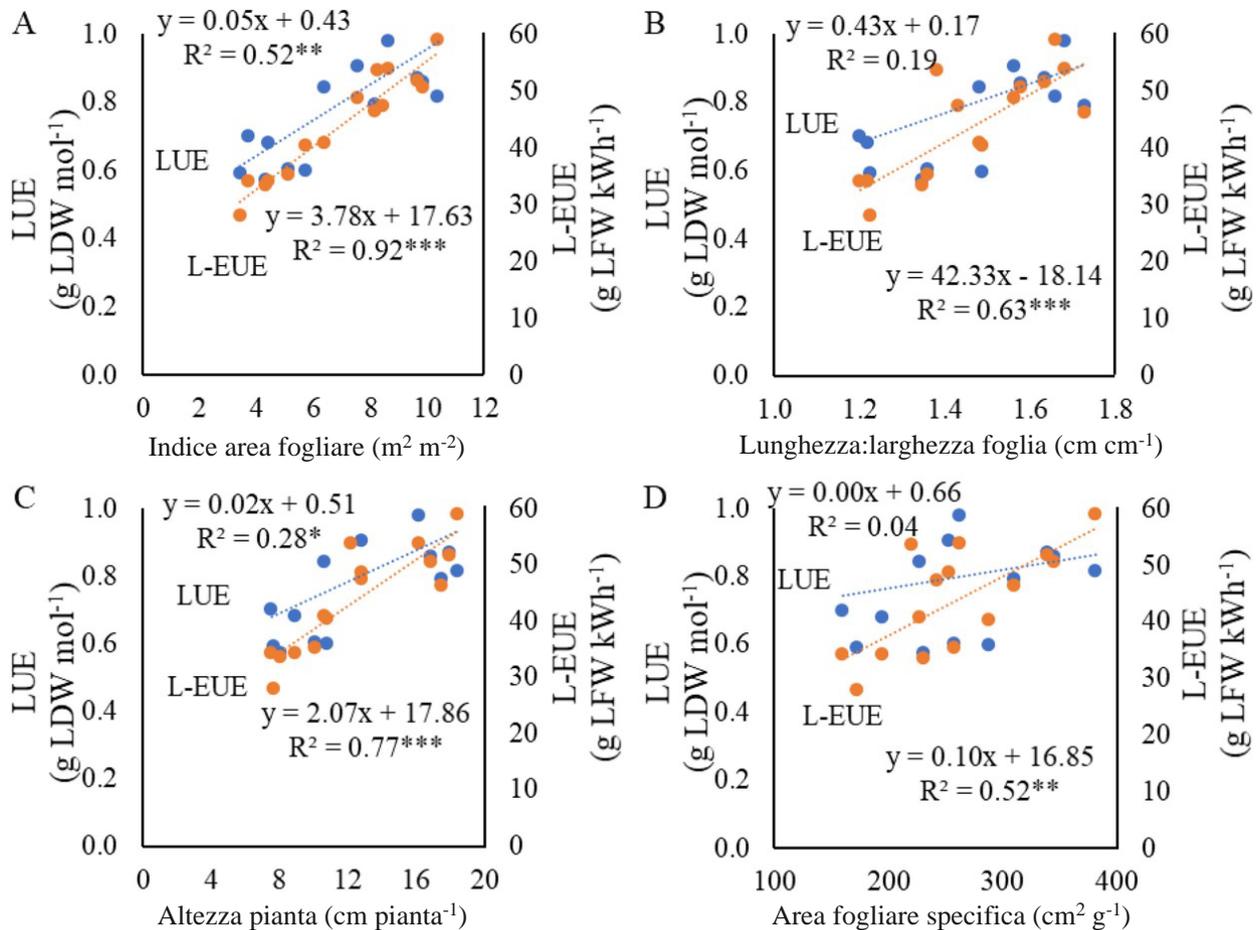


Figura 4. Relazione tra efficienza d'uso dell'energia luminosa (LUE; g LDW mol<sup>-1</sup>) ed efficienza d'uso dell'energia luminosa (L-EUE; g LFW kWh<sup>-1</sup>) con A) indice di area fogliare (m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>); B) rapporto lunghezza:larghezza della foglia (cm cm<sup>-1</sup>); C) altezza della pianta (cm pianta<sup>-1</sup>) e D) area fogliare specifica (cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>). Ogni punto rappresenta il risultato di LUE o L-EUE delle lattughe al raccolto finale (29 DAT) coltivate con cinque trattamenti. Ogni punto è la media di 5 piante replicate. Per le relazioni lineari vengono forniti equazioni, coefficienti di determinazione ( $R^2$ ) e p-value ( $\alpha = 0,05$ ). \*\*\* indica significatività a  $p \leq 0.001$ , \*\* indica significatività a  $p \leq 0.01$  e \* indica significatività a  $p \leq 0.05$ .



### 3.3 Conclusione

La sostituzione di parte del R e del B con la radiazione FR ha avuto effetti significativi sulla crescita, sull'architettura e sulla fisiologia delle piante di lattuga coltivate in vertical farm. Alla raccolta finale, sia il peso fresco delle foglie che il peso secco delle foglie delle lattughe sono aumentati con l'inclusione di 30 o 50  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  di FR. Il maggiore accumulo di biomassa è stato supportato dalla maggiore espansione fogliare. L'adozione di RB<sub>3</sub>-30 e RB<sub>3</sub>-50 ha inoltre promosso l'efficienza nell'uso della luce (+45 e +42%, rispettivamente), l'efficienza nell'uso dell'energia luminosa (+48 e +53%, rispettivamente) e quindi la prestazione energetica complessiva del sistema. L'adozione di RB<sub>3</sub>-30 e RB<sub>3</sub>-50 è quindi risultata una valida strategia per aumentare la resa per la produzione di lattuga, ma sono necessari ulteriori studi, anche in relazione all'intensità della radiazione blu, per evitare l'effetto negativo sulla pigmentazione fogliare.



## **4. Ottimizzazione dell'efficienza nell'uso della luce in una vertical farm tramite modulazione dell'intensità della luce, del fotoperiodo e della radiazione FR**

### **4.1 Materiali e metodi**

Le piante di lattuga (*Lactuca sativa* L., var. Canasta) sono state coltivate nel sistema aeroponico dedicato alla germinazione di AlmaVFarm per 14 giorni dalla semina fino al raggiungimento dello stadio della seconda foglia vera. Successivamente, sono state spostate nel sistema aeroponico ad alta pressione della stessa struttura per ulteriori 27 giorni dal trapianto (Days After Transplant, DAT), fino alla raccolta, con una densità di semina di circa 131 piante  $m^{-2}$ . Dal trapianto ai 27 DAT, le piante sono state sottoposte a 8 specifici trattamenti con luci LED, con diverse combinazioni di intensità luminosa, fotoperiodo e radiazione FR, riassunti in Tabella 4. Tutti i trattamenti luminosi erano caratterizzati dallo stesso rapporto tra luce R:B=3:1 (RB<sub>3</sub>) e integrale di luce giornaliera (DLI) mantenuto costante tra tutti le condizioni di luce con valore medio di 14.4  $mol\ m^{-2}\ d^{-1}$ . I trattamenti luminosi con 16 h  $d^{-1}$  sono considerati il controllo.



Tabella 4. Caratteristiche spettrali (intensità della radiazione  $RB_3$  e FR,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), frazione far-red (FR/R+FR), percentuale di radiazione far-red nello spettro e consumo energetico giornaliero delle lampade ( $\text{kWh m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) per gli otto diversi trattamenti luminosi applicati.

Spettro	Combinazioni luminose	FR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	RB ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Fotoperiodo (h $\text{d}^{-1}$ )	Frazione FR (FR/R+FR)	Percentuale FR (%)
$RB_3$	16 <sub>250</sub>	0	250	16	0	0
	18 <sub>220</sub>	0	220	18	0	0
	22 <sub>180</sub>	0	180	22	0	0
	24 <sub>170</sub>	0	170	24	0	0
$RB_3$ -50FR	16 <sub>250</sub>	50	200	16	0.21	20
	18 <sub>220</sub>	50	170	18	0.23	23
	22 <sub>180</sub>	50	130	22	0.27	28
	24 <sub>170</sub>	50	120	24	0.28	29

Sono stati poi calcolati i seguenti parametri per una valutazione della resa ed efficienza d'uso delle risorse sotto gli 8 diversi trattamenti luminosi:

- Peso fresco (fresh weight, FW) delle foglie (LFW), g pianta<sup>-1</sup>;
- Efficienza d'uso dell'energia luminosa (L-EUE), espressa come g FW kWh<sup>-1</sup>;
- Efficienza d'uso della luce (LUE), misurato come g di peso secco (dry weight) DW mol<sup>-1</sup>;
- Costo dell'illuminazione per biomassa prodotta, espresso come euro kg<sup>-1</sup>.

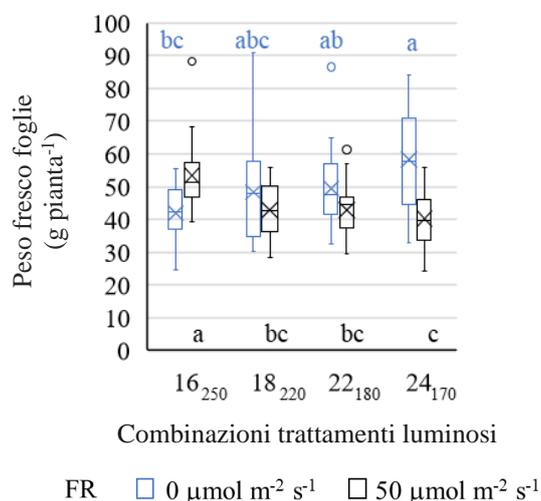
## 4.2 Risultati

Si è osservato un aumento della resa (+39%) utilizzando lo spettro  $RB_3$  in combinazione con un fotoperiodo esteso e un'intensità luminosa ridotta (24<sub>170</sub>) rispetto alle piante coltivate con 16<sub>250</sub> (41.99 g FW pianta<sup>-1</sup>) (Fig. 5).

L'aggiunta della radiazione FR ( $RB_3$ -50FR) ha comportato una tendenza contraria, con una diminuzione lineare del peso fresco come risultato



dell'aumento del fotoperiodo e della diminuzione dell'intensità della luce (Fig. 5). In questo caso, le lattughe coltivate con i tre trattamenti con fotoperiodo superiore a 18 h d<sup>-1</sup> hanno mostrato una diminuzione del FW tra il 20 e il 25%, rispetto al fotoperiodo di controllo di 16 h d<sup>-1</sup> (53.38 g pianta<sup>-1</sup>). Confrontando i risultati delle piante coltivate con lo stesso fotoperiodo e intensità luminosa ma con i due diversi spettri, è stata riportata una differenza statistica solo a 16<sub>250</sub> e a 24<sub>170</sub>. In particolare, si è osservato un incremento del FW pari a +27% a 16<sub>250</sub> per RB<sub>3</sub>-50FR rispetto a RB<sub>3</sub> e al contrario un decremento del -30% quando 24<sub>170</sub> è stato combinato con RB<sub>3</sub>-50FR rispetto a RB<sub>3</sub> (Fig. 5).



*Figura 5. Risultati per il peso fresco delle foglie (g pianta<sup>-1</sup>) per la produzione di lattuga sotto i trattamenti con fotoperiodo crescente e un'intensità luminosa decrescente (combinazioni trattamenti luminosi 16<sub>250</sub>, 18<sub>220</sub>, 22<sub>180</sub>, 24<sub>170</sub>) abbinata allo spettro con solo RB<sub>3</sub> (box plot blu) oppure allo spettro dove 50 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> di RB<sub>3</sub> sono sostituiti con 50 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> di FR (box plot neri). Ogni boxplot rappresenta i dati di tre repliche, ciascuna con 9 piante replicate. In ogni box plot, la linea orizzontale rappresenta il valore mediano e il simbolo X rappresenta il valore medio. Lettere diverse indicano differenze significative, secondo il test ANOVA a due vie e il test post-hoc di Tukey per la separazione media con p < 0.05.*

I dati sul LUE hanno mostrato una risposta positiva all'aumento del fotoperiodo e alla diminuzione dell'intensità della luce con RB<sub>3</sub>. In questo caso, rispetto al controllo 16<sub>250</sub>, i trattamenti 22<sub>180</sub> e 24<sub>170</sub> hanno migliorato il LUE



rispettivamente del +38 e del 56 (Fig. 6A). Aggiungendo la luce FR, la risposta del LUE alle variazioni del fotoperiodo e dell'intensità della luce è stata annullata (Fig. 6A). Considerando l'effetto dello spettro, con il trattamento di  $24_{170}$ , l'uso di  $RB_3-50FR$  ha diminuito il LUE del -29%, rispetto a  $RB_3$  (Fig. 6A). Riguardo il L-EUE, si è osservato un aumento con l'aumento del fotoperiodo e la diminuzione dell'intensità della luce, con lo spettro  $RB_3$ . In particolare, il  $24_{170}$  con  $RB_3$  ha aumentato significativamente il L-EUE del +33% rispetto al controllo (Fig. 6B). Al contrario, con l'introduzione del FR, il L-EUE è diminuito linearmente con l'aumento del fotoperiodo e la diminuzione dell'intensità (Fig. 6B). Con lo spettro  $RB_3$ , il costo dell'illuminazione (LC) è diminuito linearmente con l'aumento del fotoperiodo e la diminuzione dell'intensità della luce, diminuendo quindi il costo dell'illuminazione per kg di prodotto. Il trattamento con fotoperiodo continuo ( $24_{170}$ ) ha diminuito l'LC del -23% rispetto al controllo con  $16 \text{ h d}^{-1}$  (1,73 euro  $\text{kg}^{-1}$ ) (Fig. 6C). Nel caso dello spettro con il FR incorporato, l'LC è aumentato linearmente all'aumentare del fotoperiodo e al diminuire dell'intensità luminosa, con i trattamenti luminosi con fotoperiodo  $\geq 18 \text{ h d}^{-1}$  con un aumento del LC da +26 a 38% rispetto a a  $16_{250}$  con FR (1.35 euro  $\text{kg}^{-1}$ ) (Fig. 6C).

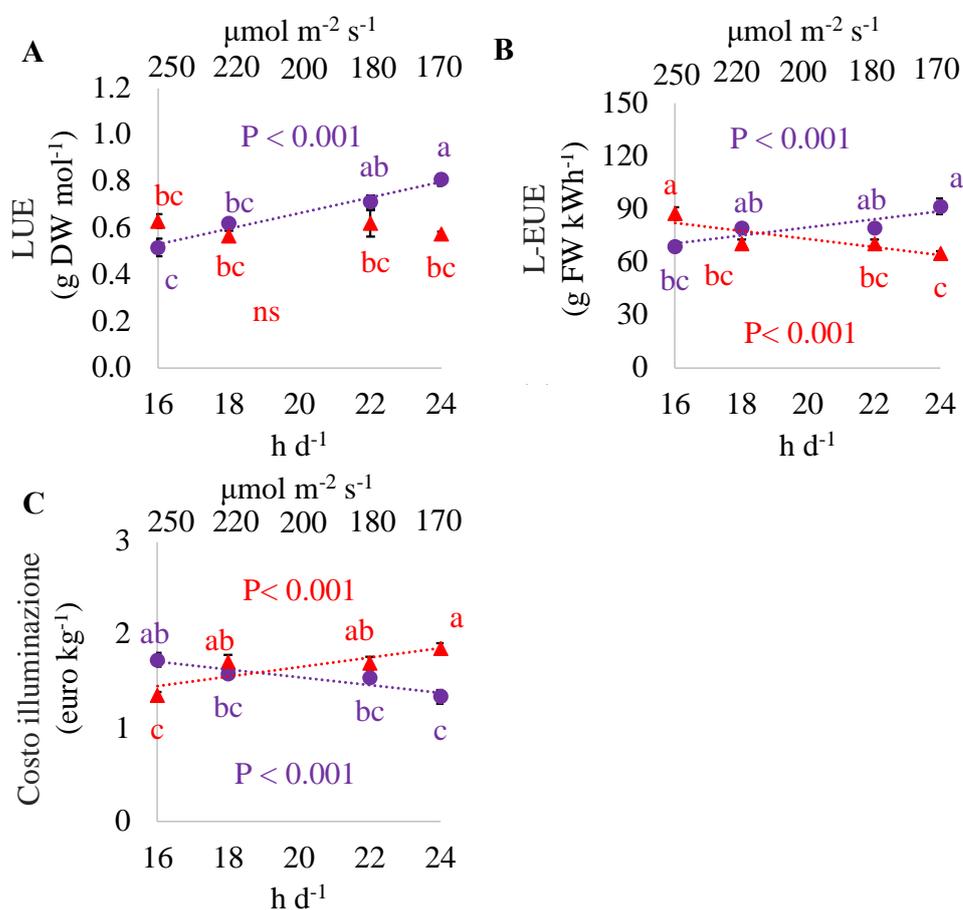


Figura 6. Risultati per A) efficienza d'uso dell'energia luminosa (LUE; g LDW mol<sup>-1</sup>), B) efficienza d'uso dell'energia luminosa (L-EUE; g LFW kWh<sup>-1</sup>) e C) costo dell'illuminazione (euro kg<sup>-1</sup> FW) per la produzione di lattuga sotto i trattamenti con fotoperiodo crescente e un'intensità luminosa decrescente (combinazioni trattamenti luminosi 16<sub>250</sub>, 18<sub>220</sub>, 22<sub>180</sub>, 24<sub>170</sub>) abbinato allo spettro con solo RB<sub>3</sub> (cerchio viola) oppure allo spettro dove 50 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> di RB<sub>3</sub> sono sostituiti con 50 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> di FR (triangolo rosso). Ogni valore è la media di tre repliche, ciascuna con 9 piante replicate. Le barre verticali rappresentano gli errori standard. Lettere diverse indicano differenze significative, secondo il test ANOVA e il test post-hoc di Tukey per la separazione media con p < 0.05. I valori P rappresentano il significato della componente lineare.



### 4.3 Conclusione

Il fotoperiodo, l'intensità della luce e lo spettro hanno effetti profondi sulla crescita e sulla morfologia delle lattughe. Questo studio ha dimostrato che anche le specifiche combinazioni di tutti questi fattori influenzano i parametri di crescita delle piante. Coltivando piante di lattuga con uno spettro con sola radiazione R:B (RB<sub>3</sub>) con DLI costante ma applicando un fotoperiodo continuo abbinato a una PPF inferiore (24<sub>170</sub> con RB<sub>3</sub>), il peso fresco delle foglie è aumentato. Questo aumento della biomassa fogliare ha portato ad un aumento dei parametri LUE, L-EUE e, quindi, una riduzione dei costi di illuminazione. Quando 50  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  di radiazione FR sono state integrate nello spettro (RB<sub>3</sub>-50), solo l'utilizzo di un fotoperiodo minore abbinato ad un'intensità maggiore, 16<sub>250</sub>, ha portato ad un aumento del peso fresco rispetto all'RB<sub>3</sub> alle stesse condizioni, con conseguente aumento del L-EUE e minore costo di illuminazione.



## 5. Bibliografia

- Carotti, L., Pistillo, A., Zauli, I., Pennisi, G., Martin, M., Gianquinto, G., & Orsini, F. (2024). Far-red radiation management for lettuce growth: Physiological and morphological features leading to energy optimization in vertical farming. *Scientia Horticulturae*, 334, 113264.
- Casal, J. J., & Smith, H. (1989). The function, action and adaptive significance of phytochrome in light-grown plants. *Plant, Cell & Environment*, 12(9), 855-862.
- Fankhauser, C., & Batschauer, A. (2016). Shadow on the plant: A strategy to exit. *Cell*, 164(1), 15-17.
- Fankhauser, C., and Chory, J. (1997). Light control of plant development. *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.* 13, 203–229.
- Franklin, K. A. (2008). Shade avoidance. *New Phytologist*, 179(4), 930-944.
- Kozai, T. (2016). Why LED lighting for urban agriculture? in LED lighting for urban agriculture, Kozai, T., Fujiwara, K., and Runkle, E. S., eds. (Singapore: Springer Singapore), pp. 3–18.
- Kusuma, P., Pattison, P. M., and Bugbee, B. (2020). From physics to fixtures to food: current and potential LED efficacy. *Hortic. Res.* 7, 56. <https://doi.org/10.1038/s41438-020-0283-7>.
- Smith, H. (2000). Phytochromes and light signal perception by plants—an emerging synthesis. *Nature*, 407(6804), 585-591.
- Stamford, J. D., Stevens, J., Mullineaux, P. M., and Lawson, T. (2023). LED Lighting: A grower's guide to light spectra. *HortScience* 58, 180–196. <https://doi.org/10.21273/HORTSC116823-22>.