



VFARM

Vertical Farming Sostenibile

D2.1. PRODUTTIVITÀ ED EFFICIENZA D'USO DELLE RISORSE NELLA COLTIVAZIONE DI ORTICOLE E AROMATICHE NEL VERTICAL FARMING



Acronimo:	VFARM
Titolo completo:	Vertical Farming Sostenibile
Codice progetto:	2020ELWM82
Finanziamento	PRIN
Coordinatore:	Università di Bologna
Inizio del progetto:	8 Maggio, 2022
Durata del progetto:	36 mesi

	Caratteristiche del documento
Titolo:	D2.1. PRODUTTIVITÀ ED EFFICIENZA D'USO DELLE RISORSE NELLA COLTIVAZIONE DI ORTICOLE E PIANTE AROMATICHE NEL VERTICAL FARMING
Work Package:	2
Partner responsabile:	University of Bologna and University of Turin
Autori principali:	Ilaria Zauli, Giuseppina Pennisi, Francesco Orsini,
Altri autori:	Vivek Jadhav, Alessandro Pistillo, Silvana Nicola, Cosimo Matteo Profico, Fabiana Marino
Numero di pagine:	29



Indice dei contenuti

1. Introduzione	4
1.1 Obiettivi del progetto.....	4
1.2 Obiettivi del Deliverable	5
2. Produzione di baby-leaf in vertical farm: coltivazione con diverse combinazioni di intensità luminosa e fotoperiodo per la produzione di cavolo nero (<i>Brassica oleracea</i> . cv. 'Baby Kale #4.51) in sistema aeroponico - UNIBO	7
2.1 Materiali e metodi	7
2.2 Risultati	9
3. Studio preliminare di validazione delle potenzialità di crescita di rucola in vertical farm: risultati morfologici, di resa ed efficienza d'uso della luce per la produzione di rucola (<i>Eruca sativa</i> Mill.) - UNIBO	12
3.1 Materiali e metodi	12
3.2 Risultati	13
4. Analisi della densità ottimale, produzione ed efficienza d'uso della luce delle risorse per la produzione di specie modello: il caso di lattuga e basilico - UNIBO	14
4.1 Materiali e metodi	14
4.2 Risultati	15
5. Produzione di baby-leaf biofortificate in vertical farm: studio della coltivazione di due varietà di basilico con diverse dosi di selenato di sodio in termini di resa, contenuto di metaboliti e RUE - UNIBO	18
5.1 Materiali e metodi	18
5.2 Risultati	19
6. Valutazione delle condizioni luminose ottimali per la produzione di seedling di specie orticole in vertical farming - UNIBO.....	22



6.1 Materiali e metodi	22
6.2 Risultati	23
7. Specie ad elevato interesse per il vertical farming: studio preliminare di validazione delle potenzialità di crescita di pomodoro nano, analizzando la sua adattabilità in termini di resa ed efficienza d'uso della luce - UNIBO	27
7.1 Materiali e metodi	27
7.2 Risultati	28

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 WP2 ha lo scopo di studiare l'adattabilità di 7 tipologie di prodotti al *vertical farming*, focalizzandosi in particolare su:

1. Orticole e aromatiche;
2. Microgreens;
3. Fiori edibili;
4. Spezie;
5. Piccoli frutti;



6. Funghi;
7. Produzione acquaponica.

Nello specifico, l'obiettivo di questa deliverable (2.1) è l'analisi delle rese colturali e d'efficienza d'uso delle risorse di specie orticole e aromatiche altamente adattabili al vertical farming. Fra queste, sono state analizzate lattuga (*Lactuca sativa* L.) e basilico (*Ocimum basilicum* L.), che rappresentano le specie modello più studiate in letteratura, così come alcune Brassicacee, come ad esempio rucola (*Eruca sativa* Mill.). ma anche prodotti di IV gamma pronti al consumo come, ad esempio, cavolo nero (*Brassica oleracea* var. 'Baby Kale #4.51) raccolto allo stadio di baby-leaf. Infine, il pomodoro nano (*Solanum lycopersicum* cv. 'Micro-Tom'), rappresenta una specie che sta acquisendo rilevanza come pianta modello per studi fisiologici su orticole da frutto nelle vertical farm e, perciò, il suo studio in queste strutture rappresenta una priorità.

Nello specifico, gli obiettivi analizzati in questa deliverable sono:

- a) Analisi della resa, morfologia ed efficienza d'uso delle risorse (RUE) per la produzione di cavolo nero baby-leaf in vertical farm in sistema aeroponico con diverse combinazioni di intensità e fotoperiodo.
- b) Studio preliminare di validazione delle potenzialità di crescita di rucola in vertical farm: risultati morfologici, di resa ed efficienza d'uso della luce per la produzione di rucola.
- c) Analisi della densità ottimale ed efficienza d'uso della luce (L-EUE) per la produzione di specie modello quali lattuga e basilico.
- d) Produzione di baby-leaf biofortificate in vertical farm: studio della coltivazione di due varietà di basilico con diverse dosi di selenato di sodio in termini di resa, contenuto di metaboliti e RUE.
- e) Valutazione delle condizioni luminose ottimali per la produzione di seedling di specie orticole in vertical farming.



- f) Specie ad elevato interesse per il vertical farming: studio preliminare di validazione delle potenzialità di crescita di pomodoro nano, analizzando la sua adattabilità in termini di resa ed efficienza d'uso della luce.

2. Produzione di baby-leaf in vertical farm: coltivazione con diverse combinazioni di intensità luminosa e fotoperiodo per la produzione di cavolo nero (*Brassica oleracea*. cv. 'Baby Kale #4.51) in sistema aeroponico - UNIBO

2.1 Materiali e metodi

Le piante di kale (*Brassica oleracea*. cv. 'Baby Kale #4.51) sono state coltivate nel sistema aeroponico 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 1400 piante m⁻². Dopo la semina, le piante sono state sottoposte a 4 specifici trattamenti con luci LED, mantenute costanti per tutto il ciclo e di seguito schematizzate (Tabella 1).



Tabella 1. Schema delle condizioni luminose applicate, indicante le combinazioni di densità di flusso dei fotoni fotosintetici (PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e fotoperiodo (h d^{-1}) per ciascun trattamento mantenendo costanti l'integrale luminoso giornaliero (DLI, $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e spettro rosso:blu (RB, con rapporto 3:1).

Trattamenti luminosi	Fotoperiodo (h d^{-1})	PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	DLI ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	Spettro
24h ₁₄₀	24	140	11.9	RB ₃
20h ₁₆₅	20	165		
16h ₂₁₀	16	210		
14h ₂₃₅	14	235		

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), kg FW m^{-2} ;
- Efficienza d'uso dell'energia luminosa (L-EUE), espressa come g FW kWh^{-1} ;
- Efficienza d'uso della superficie coltivata (SUE), misurata come la resa annuale ed espressa come $\text{kg m}^{-2} \text{y}^{-1}$;
- Peso secco (DW) delle piante;
- Area fogliare specifica (Specific Leaf Area, SLA), calcolata come il rapporto tra area fogliare e la biomassa secca delle piante espressa in $\text{cm}^2 \text{g}^{-1} \text{DW}$;



- indice dell'area fogliare (LAI) ricavata moltiplicando i valori dell'area fogliare per la superficie occupata dalla coltivazione ed espressa come $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$.

2.2 Risultati

L'utilizzo del trattamento LED con minore intensità luminosa e fotoperiodo più lungo, ovvero 24 ore a $140 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ha permesso una maggiore resa fresca rispetto agli altri 3 trattamenti che vedevano una crescente intensità luminosa associata ad un minore fotoperiodo (Figura 1A). Similmente, l'efficienza d'uso dell'energia luminosa ha mostrato lo stesso trend della resa, dovuto a un simile consumo energetico (Figura 1B).

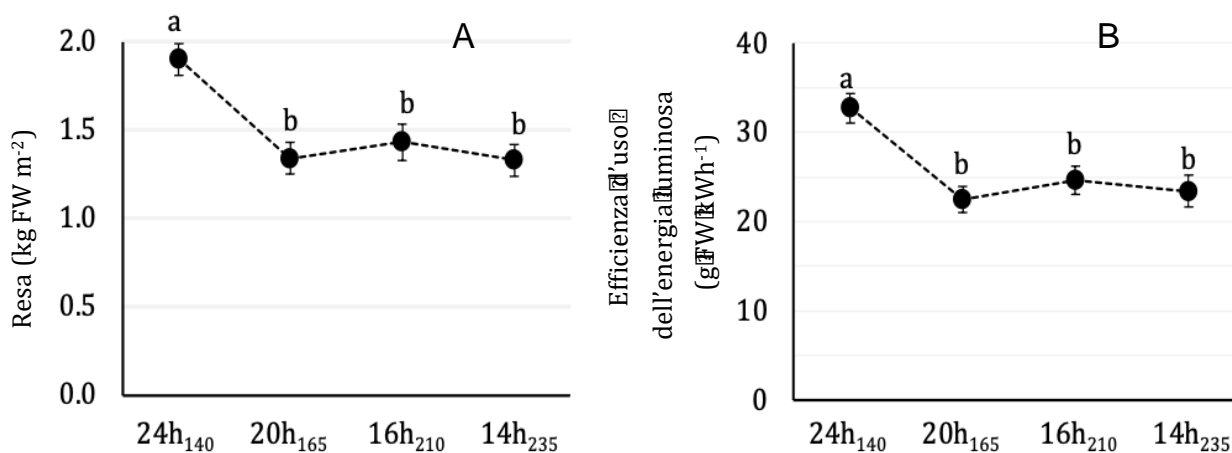


Figura 1. Valori di A) Resa (kg FW m^{-2}) e B) Efficienza nell'uso dell'energia luminosa (L-EUE, g FW kWh^{-1}) di piante di cavolo nero (kale baby-leaf) coltivate in aeroponica per 21 giorni sotto i quattro trattamenti luminosi con combinazioni specifiche di fotoperiodo e intensità. Vengono riportati i dati \pm errori standard ($n = 12$). Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test post-hoc di Tukey per la separazione delle medie con $p < 0.05$.

IL calcolo dell'efficienza d'uso della superficie coltivata (SUE) fornisce invece un indice di produzione annuale sulla base della superficie di AlmaVFarm.



Anche in questo caso, la SUE indica una maggiore efficienza per il trattamento 24₁₄₀, che permette di ottenere circa 32 kg m⁻² y⁻¹ (Figura 2)

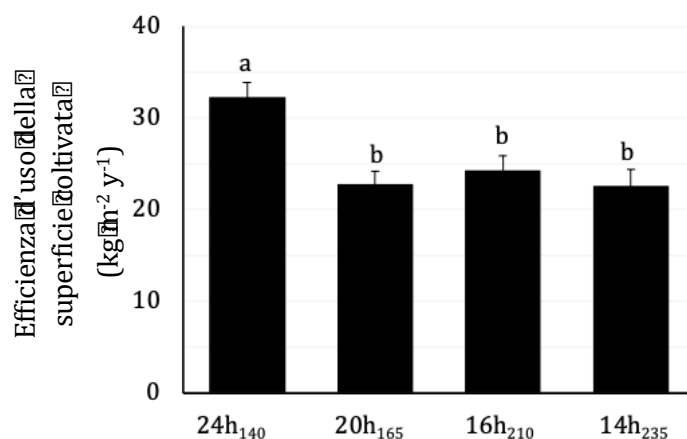


Figura 2. Efficienza d'uso della superficie coltivata (SUE, kg m⁻² y⁻¹) di piante di cavolo nero (kale baby-leaf) coltivate in aeroponica in risposta a quattro trattamenti luminosi con combinazioni specifiche di fotoperiodo e intensità. Vengono riportati i dati \pm errori standard ($n = 12$). Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test post-hoc di Tukey per la separazione delle medie con $p < 0.05$.

Infine, il fotoperiodo più lungo ha comportato anche un aumento della biomassa secca delle foglie (Tabella 2). Allo stesso modo, le piante sottoposte a un fotoperiodo più lungo abbinate ad un'intensità luminosa inferiore (24₁₄₀) mostrano valori più alti di area fogliare specifica (SLA) e indice di area fogliare (LAI): in particolare, in 24₁₄₀ è stato rilevato un valore significativamente più elevato per il LAI (4.24 m² m⁻²), rispetto agli altri trattamenti che in media presentavano 2.6 m² m⁻² rispettivamente. Allo stesso modo, fotoperiodi più lunghi hanno prodotto valori SLA più elevati, sebbene senza differenze rilevate tra i trattamenti con 24 ore e 20 ore, mentre entrambi mostravano differenze significative rispetto ai trattamenti con intensità luminosa più elevata ovvero 16 ore e 14 ore (Tabella 2).



Tabella 2. Risultati del peso secco delle foglie (g piante DW⁻¹), dell'area fogliare specifica (SLA, cm² g⁻¹ DW) e dell'indice dell'area fogliare (LAI, m² m⁻²) per ciascun trattamento. Vengono riportati i dati \pm errori standard (n = 12). Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test post-hoc di Tukey per la separazione delle medie con $p < 0.05$.

Trattamenti luminosi	Peso secco foglie (g DW piante ⁻¹)	Area fogliare specifica (cm ² g ⁻¹ DW)	Indice area fogliare (m ² m ⁻²)
24 ₁₄₀	1.71 \pm 0.08 a	4.24 \pm 0.16 a	8.04 \pm 0.26 a
20 ₁₆₅	1.28 \pm 0.07 b	2.88 \pm 0.19 ab	8.70 \pm 0.35 b
16 ₂₁₀	1.19 \pm 0.07 b	2.44 \pm 0.15 b	7.52 \pm 0.24 b
14 ₂₃₅	1.15 \pm 0.06 b	2.4 \pm 0.17 b	7.78 \pm 0.37 b



3. Studio preliminare di validazione delle potenzialità di crescita di rucola in vertical farm: risultati morfologici, di resa ed efficienza d'uso della luce per la produzione di rucola (*Eruca sativa* Mill.) - UNIBO

3.1 Materiali e metodi

I semi di rucola (*Eruca sativa* Mill.) sono stati coltivati per 27 DAS in vassoi di polietilene contenenti il 70% di torba e il 30% di vermiculite e posti nel sistema a ciclo chiuso ebb-and-flow della vertical farm sperimentale AlmaVFarm. Le piante sono state coltivate in condizioni ambientali costanti (temperatura 24/21°C, umidità 65/75%, giorno/notte, 850 ppm di CO₂). Per quanto riguarda il sistema di illuminazione LEDs, il trattamento luminoso prevedeva un fotoperiodo di 16 h d⁻¹, un PPFD pari a 200 μmol m⁻² s⁻¹ e infine uno spettro caratterizzato da un rapporto RB pari a 3:1 (RB₃).

Sono stati poi calcolati i seguenti parametri per una valutazione della crescita, produzione annuale ed efficienza d'uso della luce della coltura:

- Resa, espressa in kg di peso fresco (fresh weight, FW), kg FW m⁻²;
- Efficienza d'uso della superficie coltivata (SUE), misurata come la resa annuale ed espressa come kg m⁻² y⁻¹;
- Efficienza d'uso dell'energia (EUE), espressa come g FW kWh⁻¹;
- Contenuto di sostanza secca delle foglie (Dry Matter Content, DMC) espressa in %;



3.2 Risultati

La resa ottenuta per le piante di rucola in 27 giorni è stata pari a 3.1 kg FW m⁻² (Tabella 3). Considerando i calcoli d'efficienza d'uso delle risorse, la possibilità di coltivare fino a 13 cicli l'anno rivelano la potenziale efficienza d'uso della superficie coltivata calcolata equivalente a 41 kg m⁻² y⁻¹, mentre l'efficienza d'uso della luce osservata è pari a 25.4 g FW kWh⁻¹ (Tabella 3). Infine, il contenuto di sostanza secca registrato è stato in media 7.2% (Tabella 3).

Tabella 3. Valori di resa (kg FW m⁻²), contenuto di sostanza secca (%), efficienza d'uso della superficie coltivata (kg m⁻² y⁻¹) ed efficienza nell'uso dell'energia (EUE, g FW kWh⁻¹) di piante di rucola coltivate in sistema ebb-and-flow per 27 giorni sotto trattamento RB₃. Vengono riportati i dati ± errori standard (n = 18).

	Resa (kg FW m⁻²)	SUE (kg m⁻² y⁻¹)	EUE (g FW kWh⁻¹)	Contenuto di sostanza secca (%)
Rucola	3.1	41	25.4	7.2



4. Analisi della densità ottimale, produzione ed efficienza d'uso della luce delle risorse per la produzione di specie modello: il caso di lattuga e basilico - UNIBO

4.1 Materiali e metodi

I semi di basilico (*Ocimum basilicum* L.) e lattuga (*Lactuca sativa* L. var. Canasta) sono stati seminati in vassoi di polietilene contenenti il 70% di torba e il 30% di vermiculite e posti nel sistema a ciclo chiuso ebb-and-flow della vertical farm sperimentale AlmaVFarm. Dopo una settimana dalla germinazione (7 DAS), il diradamento è stato effettuato in base alla densità di impianto e, in particolare, ciascuna specie è stata sottoposta a tre densità di impianto, ovvero 123, 237 e 680 piante m^{-2} denominata bassa, media e alta rispettivamente. Le piante sono state coltivate in condizioni ambientali costanti (temperatura 24/21°C, umidità 65/75%, giorno/notte, 850 ppm di CO_2). Per quanto riguarda il sistema di illuminazione LEDs, il trattamento luminoso prevedeva un fotoperiodo di 16 h d^{-1} , un PPFd pari a 200 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ e infine uno spettro caratterizzato da un rapporto RB pari a 3:1 (RB₃).

La raccolta è stata eseguita in tre diversi momenti del ciclo colturale, ovvero 15, 22 e 29 DAS. Sono stati poi calcolati i seguenti parametri per una valutazione della crescita, produzione annuale ed efficienza d'uso della luce della coltura:



- Peso fresco, espresso in g di peso fresco (fresh weight, FW) per pianta, g FW pianta⁻¹;
- Efficienza d'uso dell'energia luminosa (L-EUE) a 29 DAS, espressa come g FW kWh⁻¹;

4.2 Risultati

Il peso fresco massimo per le piante di basilico è stato ottenuto a fine ciclo, 29 DAS, con le tre densità che non presentavano nessuna differenza statisticamente significativa e un valore medio di 6.1 g FW (Figura 3A). Tuttavia, quando la resa al m² è stata calcolata, si sono osservate differenze statisticamente significative fra le diverse densità di coltivazione per tutte le giornate di misurazioni, e in particolare con la produttività massima ottenuta per la densità alta a 29 DAS pari a 3.4 kg FW m⁻² (Figura 3B).

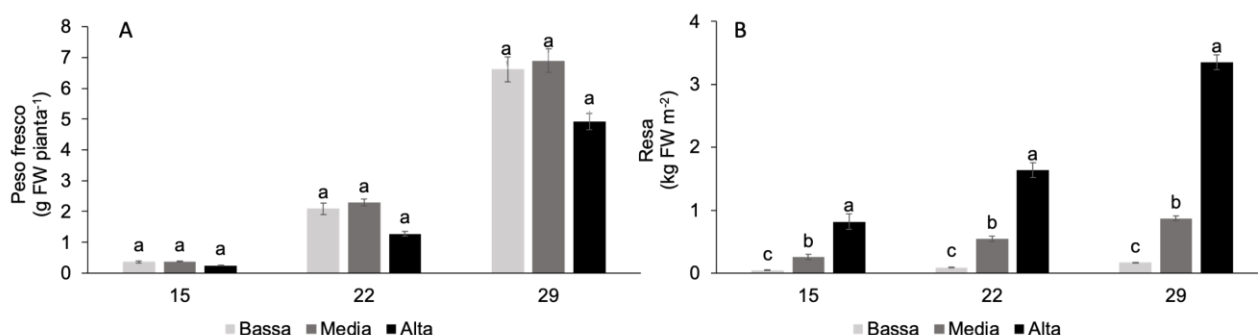


Figura 3. Risultati per A) peso fresco per pianta (g FW pianta⁻¹) e B) resa (kg FW m⁻²) a 15, 22 e 29 DAS per le piante di basilico coltivate in sistema ebb-and-flow in risposta a tre diverse densità di coltivazione: bassa (123 piante m⁻²), media (237 piante m⁻²) e alta (680 piante m⁻²). Vengono riportati i dati \pm errori standard (n = 15). Lettere diverse indicano differenze significative (p < 0.05).

Anche per le piante di lattuga, il peso fresco massimo è stato ottenuto a fine ciclo, 29 DAS. Tuttavia, a differenza del basilico, le tre densità presentavano differenze statisticamente significative, con le piante coltivate a densità alta e bassa risultanti del minor (13.6 g FW pianta⁻¹) e maggior (24.3 g FW pianta⁻¹) peso fresco alla raccolta rispettivamente (Figura 4A). Tuttavia, questo trend è



stato invertito quando la resa è stata misurata, con le piante coltivate a densità alta risultanti nella produttività maggiore (9.2 kg FW m⁻²), contro una media di 3.6 kg FW m⁻² delle piante coltivate a media e bassa densità (Figura 4B).

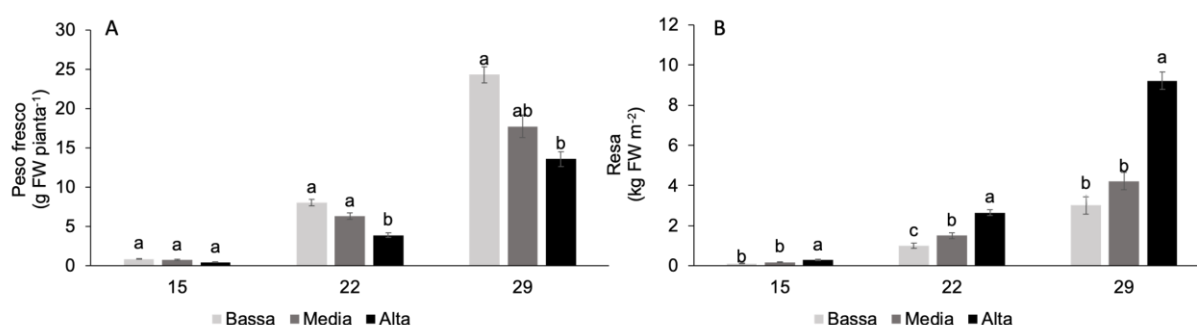


Figura 4. Risultati per A) peso fresco per pianta (g FW pianta⁻¹) e B) resa (kg FW m⁻²) a 15, 22 e 29 DAS per le piante di basilico coltivate in sistema ebb-and-flow in risposta a tre diverse densità di coltivazione: bassa (123 piante m⁻²), media (237 piante m⁻²) e alta (680 piante m⁻²). Vengono riportati i dati \pm errori standard (n = 15). Lettere diverse indicano differenze significative (p < 0.05).

Infine, dai valori d'efficienza d'uso dell'energia luminosa (L-EUE) calcolati a fine ciclo (29 DAS) si è osservato per entrambe le specie una maggiore efficienza a densità di coltivazione alta, con un massimo di 116.2 e 42.2 g FW kWh⁻¹ rispettivamente (Figura 5). Tuttavia, sebbene per la lattuga non si siano osservate differenze significative fra la densità media e bassa, per le piante di basilico coltivate a densità minore si è registrato il dato più basso in termini di L-EUE rispetto anche alla densità media (Figura 5).

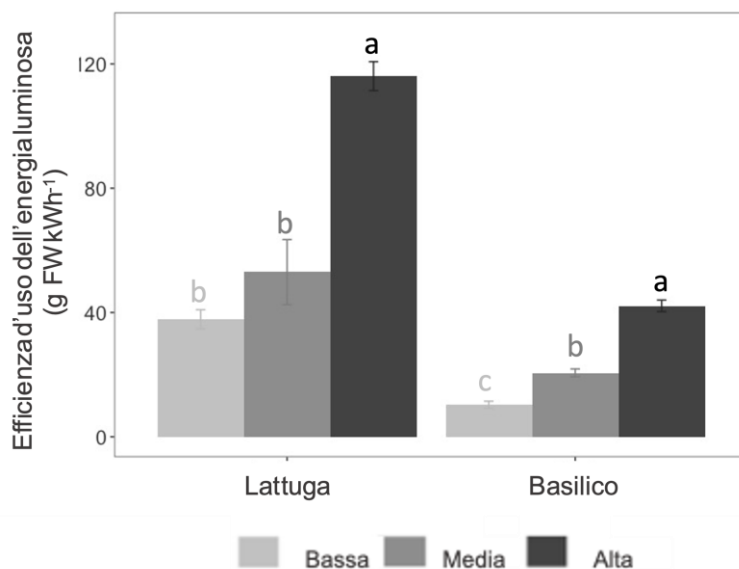


Figura 5. Efficienza d'uso dell'energia luminosa (g FW kWh⁻¹) a 29 DAS per le piante di lattuga e basilico coltivate in sistema ebb-and-flow in risposta a tre diverse densità di coltivazione: bassa (123 piante m⁻²), media (237 piante m⁻²) e alta (680 piante m⁻²). Vengono riportati i dati \pm errori standard (n = 15). Lettere diverse indicano differenze significative (p < 0.05).



5. Produzione di baby-leaf biofortificate in vertical farm: studio della coltivazione di due varietà di basilico con diverse dosi di selenato di sodio in termini di resa, contenuto di metaboliti e RUE - UNITO

5.1 Materiali e metodi

Le piante di basilico verde e rosso (*Ocimum basilicum* L. “Fine Verde” e “Red Rubin”) sono state coltivate nel sistema idroponico *MitTech* (micro-PFAL) dell’Università di Torino per 35 DAS fino al raggiungimento della fase commerciale di produzione delle *baby-leaf* (altezza 20-25 cm) ad una densità di semina di circa 770 piante m⁻². Dopo 10 DAS, le piante sono state trasferite nel sistema NFT. Lo spettro luminoso impiegato era composto, in percentuale, da lunghezze d’onda nella regione del blu (12%), verde (15%), rosso (61%) e rosso lontano (far-red, 11%), ottenendo un rapporto RB pari a 5:1. Il PPFD è stato mantenuto costante a 255 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e la temperatura e l’umidità di coltivazione sono DAS dalla semina sono stati effettuati i trattamenti fogliari con selenato di sodio con le seguenti dosi: 0 (V-0), 5 (V-5) 10 (V-10), e 15 (V-15) $\mu\text{M L}^{-1}$. I trattamenti fogliari sono stati effettuati utilizzando uno spray e ciascun trattamento è stato interrotto non appena la chioma delle foglie risultava completamente bagnata (ca. 15 secondi).

Lo schema sperimentale impiegato ha previsto una randomizzazione completa dei 4 trattamenti con 2 repliche per ciascuno.



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

- Resa, espressa in kg di peso fresco (Fresh Weight, FW), kg FW m^{-2} ;
- Clorofille totali, espresse come mg g^{-1} FW;
- Fenoli totali, espressi come nmol mg^{-1} FW
- Concentrazione di selenio nelle foglie, misurata come mg kg^{-1} di peso secco (Dry Weight, DW);
- Efficienza d'uso della superficie coltivata (SUE), misurata come la resa annuale ed espressa come $\text{kg m}^{-2} \text{y}^{-1}$;
- Efficienza d'uso dell'energia luminosa (L-EUE), espressa come g FW KWh^{-1} ;

5.2 Risultati

L'utilizzo del selenato di sodio per via fogliare non ha ridotto significativamente la resa del basilico rosso nei diversi trattamenti considerati. Invece, la concentrazione del selenio nei tessuti fogliari del basilico rosso è incrementata linearmente al crescere delle dosi fogliari (Tabella 4). Gli indici SUE e L-EUE non sono risultati significativamente diversi rispetto al controllo.



Tabella 4. Risultati nelle piante di basilico rosso di resa (kg m^{-2}), contenuto di selenio (mg kg^{-1}), clorofille totali (mg kg^{-1}), fenoli totali (nmol mg^{-1}), efficienza d'uso della superficie coltivata (SUE, $\text{kg m}^{-2} \text{y}^{-1}$) ed efficienza nell'uso dell'energia luminosa (L-EUE, g FW kWh^{-1}) per ciascun trattamento fogliare con diverse dosi di selenato di sodio (0, 5, 10, 15 $\mu\text{M L}^{-1}$). Vengono riportati i dati \pm errori standard. Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test post-hoc di Bonferroni per la separazione delle medie con $p < 0.05$.

Trattamento e relativa dose di selenato di sodio ($\mu\text{M L}^{-1}$)	Resa (kg m^{-2})	Selenio ($\text{mg kg}^{-1} \text{DW}$)	Clorofille totali ($\text{mg kg}^{-1} \text{FW}$)	Fenoli totali ($\text{nmol mg}^{-1} \text{FW}$)	SUE ($\text{kg m}^{-2} \text{y}^{-1}$)	L-EUE (g FW kWh^{-1})
V-0	3.16 \pm 0.17 a	0.04 \pm 0.01 c	1.52 \pm 0.08 a	43.11 \pm 1.31 a	34.3 \pm 1.83 a	31.56 \pm 1.69 a
V-5	3.13 \pm 0.15 a	22.76 \pm 0.98 b	0.95 \pm 0.08 b	44.57 \pm 0.15 a	31.56 \pm 1.64 a	31.29 \pm 1.51 a
V-10	3.28 \pm 0.04 a	28.35 \pm 1.49 b	1.29 \pm 0.05 ab	43.59 \pm 0.65 a	33.02 \pm 0.47 a	32.82 \pm 0.43 a
V-15	2.71 \pm 0.17 a	37.06 \pm 1.48 a	1.04 \pm 0.06 b	43.74 \pm 0.03 a	31.29 \pm 1.79 a	27.08 \pm 1.65 a
p-value	ns	***	**	ns	ns	ns

ns : non significativo

* : p-value < 0.1

** : p-value < 0.05

*** : p-value < 0.01

Nel basilico verde le diverse dosi di selenio hanno determinato una riduzione della resa finale. La dose 10 μM di selenato di sodio rispetto alle altre dosi saggate non ha ridotto significativamente la resa. Come riportato nel basilico rosso, anche in basilico verde la concentrazione di selenio è aumentata linearmente al crescere delle dosi di selenato di sodio saggate (Tabella 5). Gli indici SUE e L-EUE sono diminuiti all'incrementare della dose, ma non sono risultati significativamente diversi rispetto al controllo per le piante cresciute con la dose di selenato di sodio 10 e 15 μM .



Tabella 5. Risultati nelle piante di basilico verde di resa (kg m^{-2}), contenuto di selenio (mg kg^{-1}), clorofille totali (mg kg^{-1}), fenoli totali (nmol mg^{-1}), efficienza d'uso della superficie coltivata (SUE, $\text{kg m}^{-2} \text{y}^{-1}$) ed efficienza nell'uso dell'energia luminosa (L-EUE, g FW kWh^{-1}) per ciascun trattamento col selenio effettuato. Vengono riportati i dati \pm errori standard. Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test post-hoc di Bonferroni per la separazione delle medie con $p < 0.05$.

Trattamenti fogliari con selenio	Resa (kg m^{-2})	Selenio (mg kg^{-1})	Clorofille totali (mg kg^{-1})	Fenoli totali (nmol mg^{-1})	SUE ($\text{kg m}^{-2} \text{y}^{-1}$)	L-EUE (g FW kWh^{-1})
V-0	3.05 \pm 0.27 a	0.08 \pm 0.01 c	1.50 \pm 0.02 a	25.17 \pm 1.39 a	33.13 \pm 2.85 a	30.48 \pm 2.62 a
V-5	1.87 \pm 0.07 b	25.97 \pm 0.61 b	1.32 \pm 0.09 a	22.98 \pm 0.75 a	20.35 \pm 0.81 b	18.72 \pm 0.74 b
V-10	2.74 \pm 0.06 ab	32.75 \pm 2.77 ab	1.89 \pm 0.02 a	19.75 \pm 0.24 a	29.79 \pm 0.62 ab	27.41 \pm 0.57 ab
V-15	2.17 \pm 0.16 ab	37.91 \pm 0.43 a	1.31 \pm 0.09 a	20.70 \pm 0.87 a	23.59 \pm 1.74 ab	21.71 \pm 1.60 ab
p-value	**	***	ns	ns	*	*

ns : non significativo

* : p-value < 0.1

** : p-value < 0.05

*** : p-value < 0.01



6. Valutazione delle condizioni luminose ottimali per la produzione di seedling di specie orticole in vertical farming - UNIBO

6.1 Materiali e metodi

Piante di cetriolo (*Cucumis sativus* cv. Marketmore 76), melanzana (*Solanum melongena* cv. Violetta lunga di Romagna), pomodoro (*Solanum lycopersicum* cv. Ciliegia), sono state coltivate utilizzando il sistema idroponico ebb-and-flow presente nella struttura sperimentale AlmaVFarm per 28 giorni dopo la semina (Days After Sowing, DAS) con una densità di circa 640 piante m^{-2} . Subito dopo la semina, cinque trattamenti caratterizzati da differenti rapporti tra radiazione rossa:blu (RB) sono stati applicati (Tabella 6). Le piante sono state coltivate mantenendo costanti i valori di intensità luminosa ($200 \mu mol m^{-2} s^{-1}$) e fotoperiodo ($16 h d^{-1}$). Inoltre, sono state mantenute stabili per tutto il ciclo di coltivazione le condizioni ambientali di temperatura ($24^{\circ}C$ giorno/ $21^{\circ}C$ notte), umidità relativa (65% giorno/ 75% notte) e concentrazione di CO_2 (850 ppm).

Tabella 6. Schema dei trattamenti luminosi applicati: intensità totale (PPFD, $\mu mol m^{-2} s^{-1}$), intensità radiazione rossa (R, $\mu mol m^{-2} s^{-1}$), intensità radiazione blu (B, $\mu mol m^{-2} s^{-1}$), rapporto radiazione rossa:blu (R:B, %).

Trattamento luminoso	PPFD ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$)	R ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$)	B ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$)	R:B (%)
RB ₁	200	100	100	1
RB ₃	200	150	50	3
RB ₅	200	165	35	5
RB ₇	200	175	25	7
RB ₉	200	180	20	9



Settimanalmente, a partire da 14 DAS e successivamente a 21 e 28 DAS sono state eseguite le seguenti misure morfologiche sulle piante di cetriolo, melanzana e pomodoro:

- Distanza tra cotiledoni ed apice vegetativo, misurata in mm;
- Area fogliare (Leaf Area, LA), calcolata in cm²;
- Contenuto di sostanza secca delle foglie (Dry Matter Content, DMC) espressa in %;
- Diametro dello stelo, espresso in mm.

6.2 Risultati

Per i seedling di cetriolo, si è registrato per il trattamento RB₁ a 21 DAS la minore distanza tra i cotiledoni e l'apice vegetativo rispetto i trattamenti RB₅ ed RB₇, portando quindi a piante più compatte (Figura 6A). Un andamento simile si è evidenziato anche a 28 DAS, tuttavia senza registrare differenze statisticamente significative. Infine, per quanto riguarda gli altri parametri morfologici misurati quali LA, DMC e diametro dello stelo, non sono emerse differenze statisticamente significative in nessuna delle giornate di misura (Figura 6B, 6C, 6D).

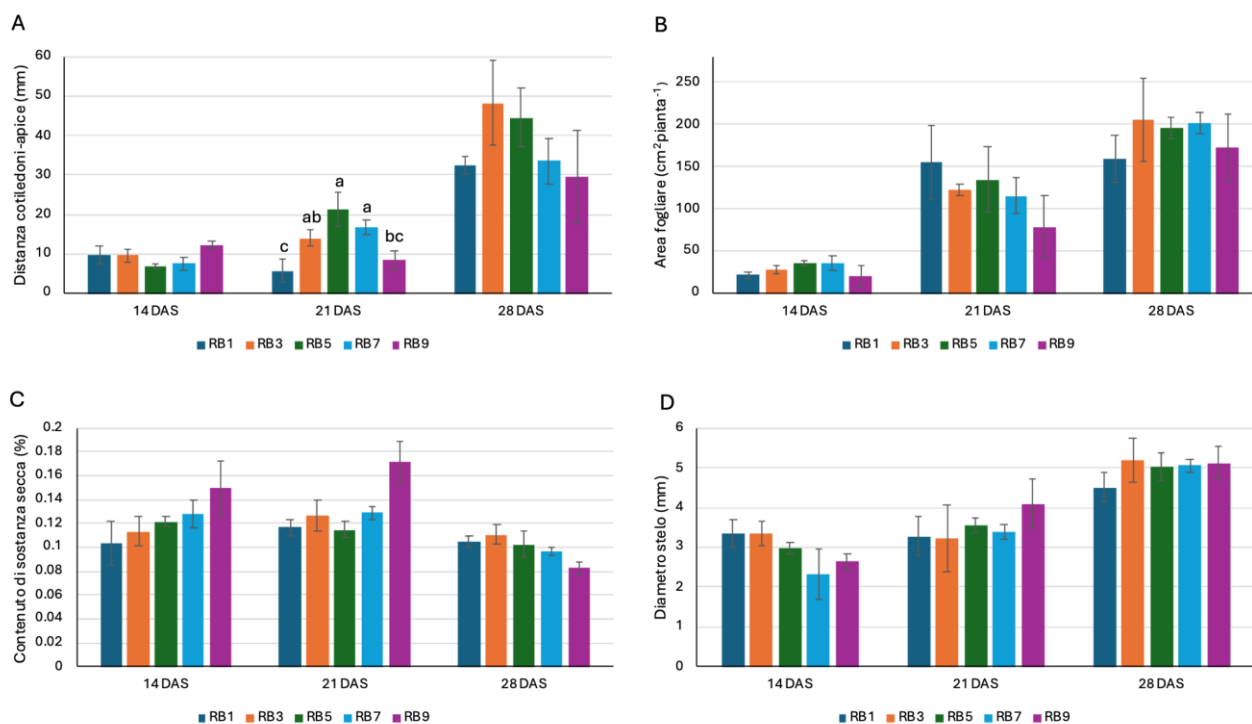


Figura 6. Risultati ottenuti in piante di cetriolo per la A) Distanza tra cotiledoni ed apice vegetativo (mm); B) Area fogliare (LA, cm²); C) Contenuto di sostanza secca delle foglie (DMC, %); D) Diametro dello stelo (mm). Valori misurati a 14, 21 e 28 DAS per i 5 trattamenti luminosi RB₁, RB₃, RB₅, RB₇, RB₉. Vengono riportati i dati ± errori standard. Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test post-hoc di Tukey per la separazione delle medie con $p < 0.05$.

Contrariamente ai seedling di cetriolo, per le piante di melanzana misurando la distanza tra colletto ed apice vegetativo si evidenzia una differenza statisticamente significativa tra i trattamenti RB₃ ed RB₇ solo a 14 DAS, col valore minore registrato per il trattamento RB₃ (Figura 7A). Sempre a 14 DAS si è evidenziata una maggiore area fogliare per le piante coltivate utilizzando uno spettro luminoso RB₁ rispetto le piante del trattamento RB₉ (Figura 7B). Relativamente il contenuto di sostanza secca, si registrano differenze statisticamente significative a 28 DAS tra piante coltivate con trattamenti RB₁ ed RB₃, entrambe con valori inferiori rispetto le piante coltivate con rapporto RB_{≥7} (Figura 7C). Infine, in riferimento al diametro dello stelo, l'andamento

differisce tra 14 DAS e 21 DAS. Difatti, nel primo caso si registra il valore più basso per le piante coltivate utilizzando il trattamento RB₉ rispetto RB₁, mentre nella misurazione successiva il trattamento RB₅ porta ad avere le piante con il diametro dello stelo minore rispetto i trattamenti RB₁ ed RB₉ (Figura 7D).

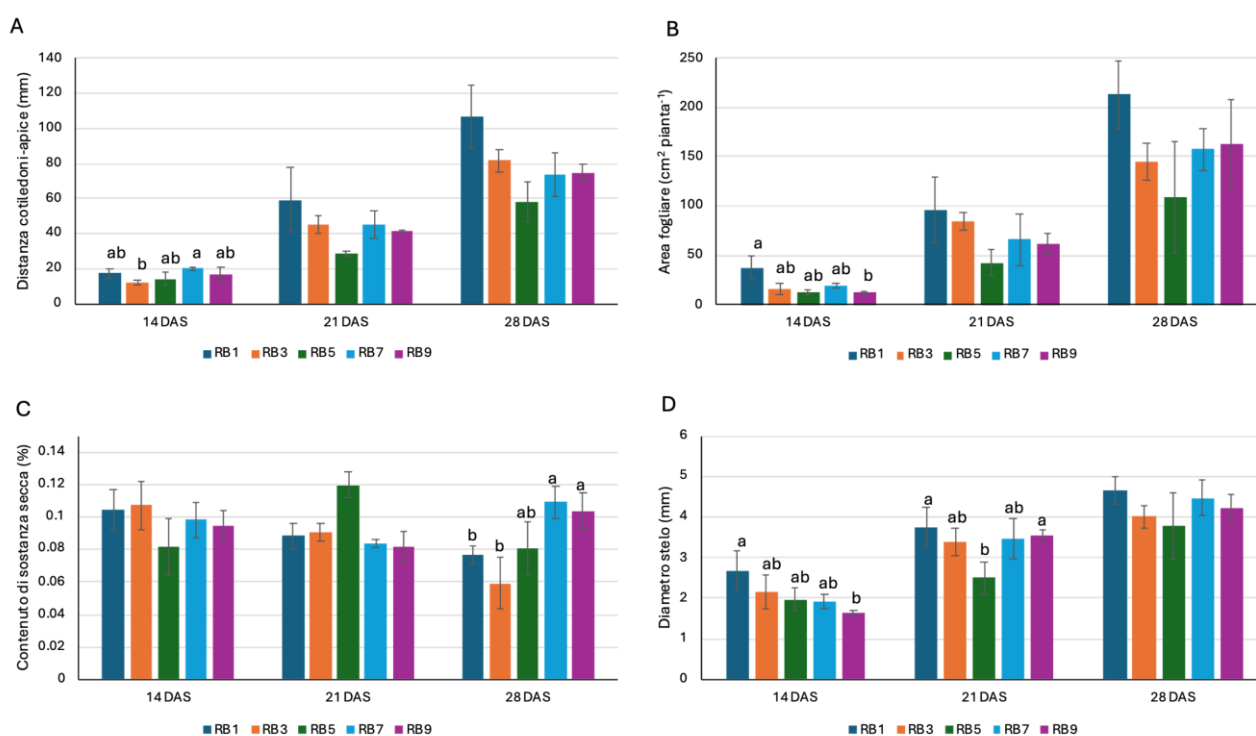


Figura 7. Risultati ottenuti in piante di melanzana per la A) Distanza tra cotiledoni ed apice vegetativo (mm); B) Area fogliare (LA, cm²); C) Contenuto di sostanza secca delle foglie (DMC, %); D) Diametro dello stelo (mm). Valori misurati a 14, 21 e 28 DAS per i 5 trattamenti luminosi RB₁, RB₃, RB₅, RB₇, RB₉. Vengono riportati i dati ± errori standard. Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test post-hoc di Tukey per la separazione delle medie con $p < 0.05$.

Invece, nelle piante di pomodoro coltivate col trattamento luminoso RB₉, a 14 DAS si sono osservati i valori più bassi di distanza tra colletto ed apice vegetativo (Figura 8A) e di area fogliare (Figura 8B), mentre non emergono differenze statisticamente significative per gli stessi parametri nelle misure

successive. Relativamente il contenuto di sostanza secca delle foglie (Figura 8C) i valori più alti si registrano per i trattamenti RB_1 e $RB_{\geq 7}$ a 14 DAS, con una tendenza poi a ridurre il DMC nelle settimane successive registrando a 28 DAS il contenuto minore nei seedling di pomodoro coltivati con un rapporto $RB \geq 7$. Infine, per quanto riguarda il diametro dello stelo, a 28 DAS differenze statisticamente significative sono emerse tra i trattamenti RB_1 ed RB_7 , che rispettivamente hanno registrato il valore minore e maggiore (Figura 8D).

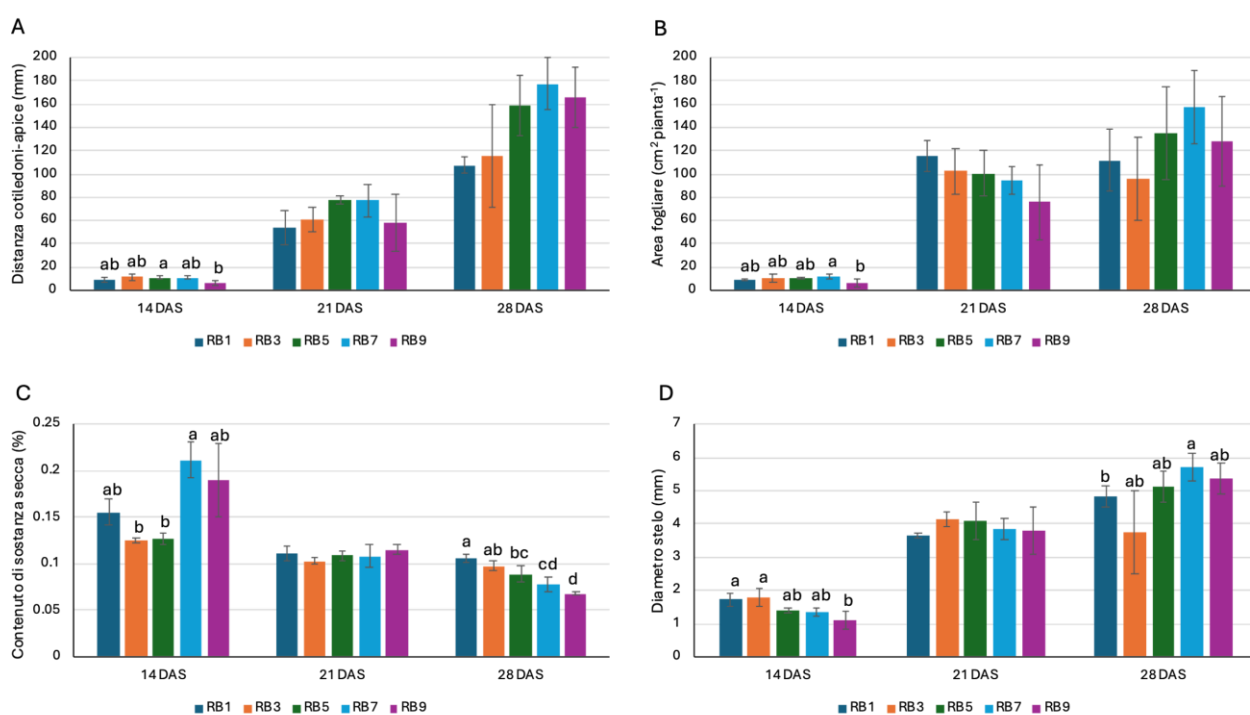


Figura 8. Risultati ottenuti in piante di pomodoro per la A) Distanza tra cotiledoni ed apice vegetativo (mm); B) Area fogliare (LA, cm²); C) Contenuto di sostanza secca delle foglie (DMC, %); D) Diametro dello stelo (mm). Valori misurati a 14, 21 e 28 DAS per i 5 trattamenti luminosi RB_1 , RB_3 , RB_5 , RB_7 , RB_9 . Vengono riportati i dati \pm errori standard. Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test post-hoc di Tukey per la separazione delle medie con $p < 0.05$.



7. Specie ad elevato interesse per il vertical farming: studio preliminare di validazione delle potenzialità di crescita di pomodoro nano, analizzando la sua adattabilità in termini di resa ed efficienza d'uso della luce - UNIBO

7.1 Materiali e metodi

I semi di pomodoro nano (*Solanum lycopersicum* cv. 'Micro-Tom') sono stati coltivati per 109 DAS in vassoi di polietilene contenenti il 70% di torba e il 30% di vermiculite e posti nel sistema a ciclo chiuso ebb-and-flow della vertical farm sperimentale AlmaVFarm. Le piante di pomodoro nano sono state coltivate in condizioni ambientali costanti (temperatura 24/21°C, umidità 65/75%, giorno/notte, 850 ppm di CO₂). Per quanto riguarda il sistema di illuminazione artificiale, la luce fornita consisteva in un fotoperiodo di 16 h d⁻¹, un PPFD pari a 200 μmol m⁻² s⁻¹ e infine uno spettro caratterizzato da un rapporto RB pari a 3:1 (RB₃).

Sono stati poi calcolati i seguenti parametri per una valutazione della crescita e produzione di frutti ed efficienza d'uso della luce della coltura:

- Resa, espressa in kg di peso fresco dei frutti (fresh weight, FW), kg FW m⁻²;
- Efficienza d'uso della superficie coltivata (SUE), misurata come la resa annuale dei frutti ed espressa come kg m⁻² y⁻¹;
- Efficienza d'uso della luce (EUE), espressa come g FW kWh⁻¹.



7.2 Risultati

La resa ottenuta per le piante di pomodoro nano in termini di frutti in 109 giorni è stata pari a 6.3 kg FW m⁻² (Tabella 7). Considerando i calcoli d'efficienza d'uso delle risorse, la possibilità di coltivare fino a 3 cicli l'anno rivelano la potenziale efficienza d'uso della superficie coltivata calcolata equivalente a 41 kg m⁻² y⁻¹, mentre l'efficienza d'uso della luce osservata è pari a 13.1 g FW kWh⁻¹ (Tabella 7).

Tabella 7. Valori di resa dei frutti (kg FW m⁻²), efficienza d'uso della superficie coltivata (kg m⁻² y⁻¹) ed efficienza nell'uso dell'energia (EUE, g FW kWh⁻¹) di piante di pomodoro nano coltivate in sistema ebb-and-flow per 109 giorni sotto trattamento RB₃. Vengono riportati i dati ± errori standard (n = 16).

	Resa (kg FW m⁻²)	SUE (kg m⁻² y⁻¹)	EUE (g FW kWh⁻¹)
Pomodoro nano	6.3	21	13.1