



VFARM

Vertical Farming Sostenibile

D3.5 OTTIMIZZAZIONE DEL CONTROLLO DEL CLIMA E DELL'EFFICIENZA NELL'USO DELLE RISORSE



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 documento
Titolo del documento	D3.5 Ottimizzazione del controllo del clima e dell'efficienza nell'uso delle risorse
Work Package:	3
Partner responsabile:	University of Naples Federico II
Autori principali:	Giuseppe Carlo Modarelli, Antonio Pannico, Christophe El-Nakhel, Chiara Cirillo, Stefania De Pascale
Altri autori:	
Numero di pagine:	22



Contents

1	Introduzione	4
1.1	Obiettivi Progetto	4
1.2	Obiettivi del deliverable	5
1.3	Scenari di riduzione dell'uso dell'acqua nelle vertical farm (UNIBO):...	6
	Recupero dell'acqua dall'ambiente interno come strategie per aumentare l'efficienza d'uso dell'acqua in una vertical farm	6
	<i>Raccolta acqua piovana come strategie per aumentare l'efficienza d'uso dell'acqua in una vertical farm</i>	<i>8</i>
	Scenario 1: Tetto piano non ghiaioso come bacino di raccolta acqua piovana.	9
	Scenario 2: Superficie lastricata come bacino di raccolta acqua piovana.	10
2	Vertical Farm (UNINA).....	11
2.1	Descrizione delle camere di crescita	11
	Sistema di condizionamento dell'aria.....	13
	Impianto di illuminazione LED.....	15
3	Vertical Farm (UNITO).....	16
4	Vertical Farm (UNIPD).....	16
	Bibliografia	21



1 Introduzione

1.1 Obiettivi 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.

Il task 3.5 del WP3 ha come obiettivo quello di descrivere tutti i sistemi di controllo climatico implementati nelle vertical farm (micro, mini e maxi) previste come casi studio nel progetto e di valutare come sia la tipologia del sistema di controllo che strategie climatiche in vertical farm possano impattare sull'efficienza d'uso delle risorse.

Rispetto alle serre, le vertical farm consentono un controllo più rigoroso delle variabili ambientali, riducendo la necessità di compromessi tipica delle colture in serra (ad es. tra fornitura di CO₂ e raffreddamento tramite ventilazione) (Graamans et al., 2020). Attualmente, la gestione del clima in vertical farm si basa su algoritmi sviluppati nelle serre, con stime (es. rispetto a tassi di ricircolo dell'aria o stratificazioni verticali e orizzontali) che potrebbero rivelarsi inadeguate quando applicate ad aree di coltivazione più ridotte o a sistemi verticali (Orsini et al., 2020).

Tutte le unità di ricerca mireranno alla definizione del controllo climatico ottimale sperimentando la risposta a differenti strategie di controllo ambientale in termini di resa potenziale, di fabbisogno energetico ed efficienza energetica (EUE), nutrizionale (NUE) e idrica (WUE).



Gli effetti della gestione del clima su crescita e bilancio di nutrienti in acquaponica verranno studiati ad UNIPD. In UNIBO, possibili scenari volti a minimizzare l'uso d'acqua nella produzione combineranno quantificazione degli apporti ottenibili dall'impianto di deumidificazione della camera di coltivazione e raccolta di acqua piovana. Bilanci idrici completi verranno implementati relazionando volumi/produzioni della vertical farm con le superfici di raccolta necessarie sulla base di dati di pluviometrici locali.

Presso UNINA, sono state realizzate due camere climatiche walk-in per produzioni in vertical farm. Entrambi le camere sono state progettate con specifiche che consentono il controllo avanzato di tutte le variabili ambientali (temperatura, umidità relativa, concentrazione di CO₂, velocità dell'aria, ricambio dell'aria, intensità e spettro della radiazione luminosa). La prima camera di crescita (16 m²), completata nelle fasi iniziali del progetto, è stata utilizzata nelle prove che hanno riguardato la coltivazione di canapa leggera (*Cannabis sativa* L.) (crescita di talee e produzione di fiori per l'estrazione di fitocannabinoidi). La seconda camera di crescita (9,5 m²) è stata completata a luglio 2024 e sarà disponibile a partire da settembre.

1.3 Scenari di riduzione dell'uso dell'acqua nelle vertical farm (UNIBO):

Recupero dell'acqua dall'ambiente interno come strategie per aumentare l'efficienza d'uso dell'acqua in una vertical farm

Come menzionato nel deliverable D3.1, le performances in termini di efficienza d'uso dell'acqua (WUE, g peso fresco L⁻¹ H₂O) delle vertical farm possono essere incrementate sia attraverso il recupero dell'acqua traspirata dalle piante che tramite la raccolta dell'acqua dal sistema di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC) (Katsoulas et al., 2015; Soussi et al., 2022; Jurga et al., 2023). Sebbene diversi modelli teorici abbiano ipotizzato il



contributo dell'acqua recuperata dal sistema HVAC in serra (Lovichit et al., 2007; Yildiz e Stombaugh, 2006) così come nelle vertical farm (Pacak et al., 2020), è ancora ridotto il numero di studi che quantificano empiricamente l'effettiva quota di acqua recuperata dal sistema HVAC.

A questo scopo, seguendo i dati utilizzati nel deliverable D3.1, è stata analizzata la possibilità di riutilizzare l'acqua recuperata dal sistema HVAC e traspirata dalle piante (corrispondente al 67% dell'acqua utilizzata come input per l'irrigazione e per il controllo climatico; Carotti et al., 2023) per l'irrigazione dei sistemi fuori suolo in AlmaVFarm, al fine di aumentare la WUE.

Per il calcolo di questo scenario è stato utilizzato il rapporto tra peso fresco fogliare di lattuga (espresso come grammi di peso fresco, FW) e la differenza fra l'acqua totale utilizzata e la risorsa idrica recuperata ($L^{-1} H_2O$).

Tenendo in considerazione la quantità totale di acqua utilizzata (1870 L) e la quantità di acqua recuperata, i valori di WUE registrati aumentano notevolmente rispetto a quelli presentati precedentemente nella D3.1: 86.0 g FW $L^{-1} H_2O$ e 161.9 g FW $L^{-1} H_2O$ rispettivamente per il sistema ebb-and-flow ed aeroponico, registrando un incremento percentuale del 206 % in termini di WUE per entrambi i sistemi di coltivazione (Figura 1).

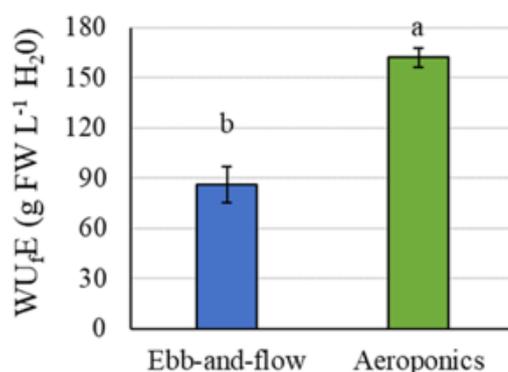


Figura 1. Efficienza d'uso dell'acqua (WUE, g FW $L^{-1} H_2O$) ottenuta nei sistemi ebb-and-flow (blu) e aeroponico (verde) nello scenario dove all'acqua utilizzata per l'irrigazione, per



il sistema HVAC e le operazioni di routine della farm viene sottratta l'acqua recuperata tramite deumidificatore. Sono riportati i dati \pm errore standard ($n = 15$). Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test ANOVA e il test post-hoc di Tukey per la separazione media con $p < 0.05$ (Carotti et al., 2023).

Raccolta acqua piovana come strategie per aumentare l'efficienza d'uso dell'acqua in una vertical farm

Ulteriore strategia di riduzione dell'utilizzo dell'acqua all'interno delle VFs è il recupero e l'accumulo di acque meteoriche attraverso specifici bacini di raccolta posti vicino la struttura produttiva.

Per poter calcolare lo scenario di recupero di acqua piovana è stato innanzitutto ricercato il valore annuale di precipitazioni nella zona dove si colloca la vertical farm in analisi (AlmaVFarm) ovvero la città di Bologna. Per il valore di somma delle precipitazioni annuali, espresse in mm, si è utilizzato il dato più recente possibile ottenuto tramite la banca dati [Open Data del Comune di Bologna](#).

In particolare, è stato scelto l'anno 2022 (con una precipitazione totale pari a 612.3 mm) per due motivi principali:

1. L'anno scelto rappresenta anche il periodo di svolgimento della prova in vertical farm (Carotti et al., 2023) coi relativi dati d'uso dell'acqua;
2. L'anno 2023 è stato caratterizzato da eventi alluvionali nella regione Emilia-Romagna con abbondanti piogge decisamente maggiori rispetto alle medie annuali degli ultimi anni.

Oltre ai dati annuali di precipitazioni locali, per poter calcolare la superficie necessaria per il bacino di raccolta dell'acqua piovana sono stati raccolti i dati di consumo dell'acqua specifici della struttura AlmaVFarm. Anche in questo caso, i dati ottenuti da Carotti et al., (2023) sono stati utilizzati per calcolare l'utilizzo annuale di acqua per la produzione di cicli di lattuga di 29 giorni.

Attraverso il calcolo del rapporto tra il valore annuale di precipitazione e il consumo idrico in un anno in AlmaVFarm per la produzione di lattuga è stata



ottenuta la superficie necessaria per la raccolta di acqua piovana nel 2022 a Bologna per il fabbisogno della vertical farm, pari a 38.4 m² (Tabella 1).

Tabella 1. Utilizzo dell'acqua totale per la produzione di lattuga per un ciclo e all'anno (L cycle⁻¹ e L year⁻¹) considerando il consumo del sistema ebb-and-flow ed aeroponico in aggiunta al consumo idrico del sistema HVAC e delle operazioni di gestione della farm. Sono anche indicate la somma delle precipitazioni annuali nell'anno 2022 a Bologna e i metri quadri (m²) necessari per la raccolta di acqua piovana sempre a Bologna nello stesso anno.

	L ciclo ⁻¹	L anno ⁻¹	L m ⁻²	m ²
Consumo totale H₂O (VF)	1870	23536		
Somma delle precipitazioni annuali 2022 a Bologna			612.3	
Metri quadri necessari per la raccolta di acqua piovana nel 2022 a Bologna				38.4

Tuttavia, questo dato della superficie non tiene conto della natura del materiale di cui lo stesso bacino è fatto, che in base al materiale determina una diversa permeabilità della struttura di raccolta dell'acqua. Di conseguenza, il coefficiente di afflusso ([Linee Guida ARPA Er LG28/Dt](#)) di ciascun materiale o matrice è un valore fondamentale da considerare nel calcolo della potenziale superficie necessaria per la raccolta dell'acqua piovana per l'utilizzo della risorsa idrica in AlmaVFarm.

Scenario 1: Tetto piano non ghiaioso come bacino di raccolta acqua piovana.

Il coefficiente del tetto piano non ghiaioso è equivalente a 0.8. Quindi, per poter calcolare con esattezza la superficie necessaria di un tetto piano non ghiaioso



come bacino di raccolta è stato moltiplicato il coefficiente corrispondente per il valore annuale di precipitazioni locali (1)

$$(1) 612.3 \times 0.8 = 490$$

e, infine, il consumo idrico annuale totale di AlmaVFarm è stato diviso per il valore ottenuto ottenendo la superficie necessaria (espressa in m²) per il bacino di raccolta dell'acqua piovana della vertical farm per un tetto piano non ghiaioso (2):

$$(2) 23536 / 490 = 48 \text{ m}^2$$

Scenario 2: Superficie lastricata come bacino di raccolta acqua piovana.

Il coefficiente della superficie lastricata è equivalente a 0.5, perciò inferiore al precedente scenario che di conseguenza porterà ad una maggiore richiesta in termini di grandezza del bacino. Nuovamente, per poter calcolare con esattezza la superficie necessaria per un'area lastricata come bacino di raccolta è stato moltiplicato il coefficiente corrispondente per il valore annuale di precipitazioni locali (3)

$$(3) 612.3 \times 0.5 = 306.2$$

e, infine, il consumo idrico annuale totale di AlmaVFarm è stato diviso per il valore ottenuto ottenendo la superficie necessaria (espressa in m²) per il bacino di raccolta dell'acqua piovana della vertical farm per una superficie lastricata (4)

$$(4) 23536 / 306.2 = 77 \text{ m}^2$$



2 Vertical Farm (UNINA)

2.1 Descrizione delle camere di crescita

La camera di crescita 1 presenta una struttura in muratura di 4 x 4 m (16 m²) con pareti interne rivestite con resina bianca impermeabile ai liquidi e ai gas. La camera di crescita 2 presenta invece di una struttura in pannelli in alluminio coibentati (4,5 x 2,1 m, superficie di 9,5 m²), rivestiti con la medesima resina bianca della camera di crescita 1. Per entrambi le camere, il sistema di coltivazione consiste di due bancali in alluminio con vassoio danese (120 x 300 cm) dotato di sistema *ebb and flow* per produzioni idroponiche a ciclo chiuso. La preparazione, il controllo e il monitoraggio della soluzione nutritiva è gestito da fertirrigatori indipendenti (sistema NIDO ONE V2) controllati da un software con accesso da remoto (PC e app mobile). Ciascun sistema di fertirrigazione è dotato di sensori di conducibilità elettrica e pH, e di 4 pompe peristaltiche per il dosaggio automatizzato dell'acido, della base e delle soluzioni nutritive concentrate.



Figura 2. Vista interna della camera di crescita 1.

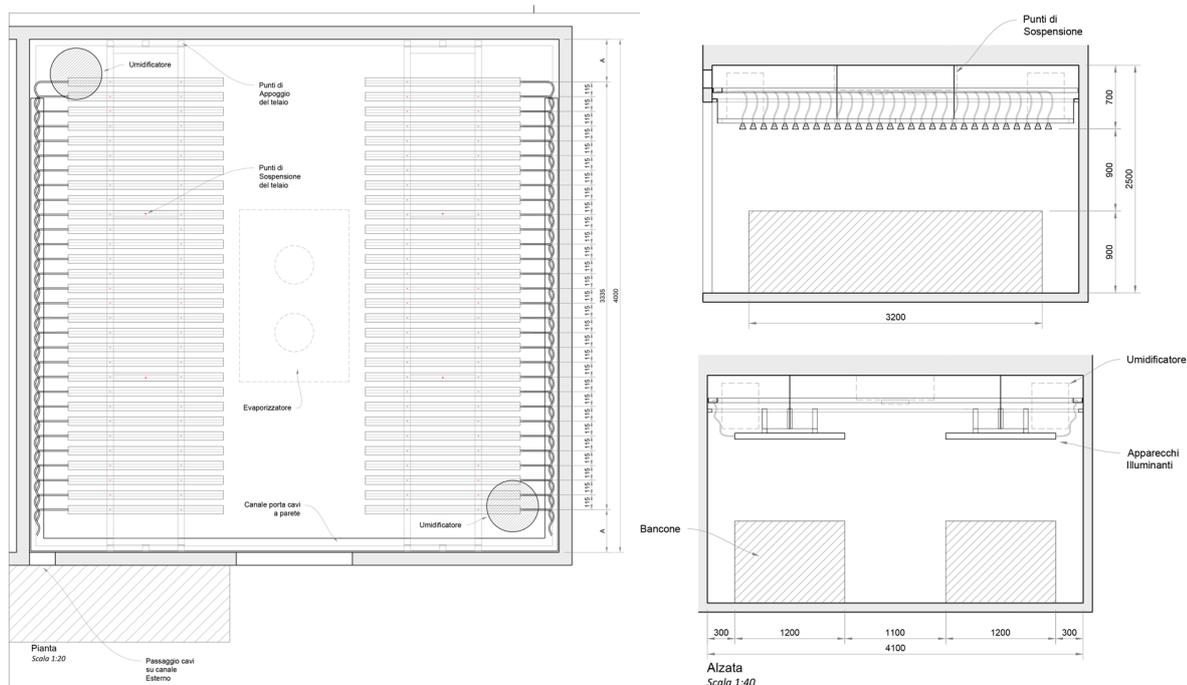


Figura 3. Pianta e sezioni della camera di crescita 1.

Il progetto Vertical Farming Sostenibile (VFarm) è stato finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR) nell'ambito dei Programmi di Ricerca di Interesse Nazionale (PRIN) (Codice progetto: 2020ELWM82; CUP: J33C20002350001).



Sistema di condizionamento dell'aria

Entrambi le camere di crescita sono state progettate per il controllo avanzato del condizionamento dell'aria (temperatura, umidità relativa, concentrazione di CO₂, velocità e ricambio dell'aria) installando un sistema HVAC caratterizzato dai seguenti componenti:

- Gruppo di raffreddamento a pompa di calore (1200 W camera 1, 1000 W camera 2)
- Gruppo riscaldatore a resistenza (2000 W camera 1, 1500 W camera 2)
- Ventilatori assiali per il ricircolo dell'aria (450 W camera 1, 350 W camera 2)
- Umidificatori ad ultrasuoni da 1 L/h (due per camera 1 e uno per camera 2)
- Due ventole di estrazione (in e out) per ricambio aria (50 W ciascuna)

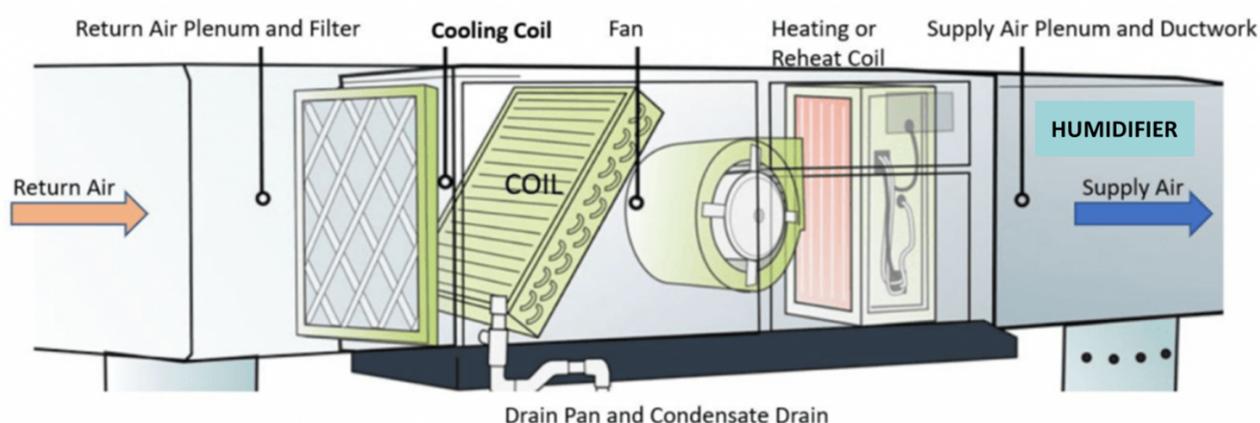


Figura 4. Schema di funzionamento del sistema di condizionamento dell'aria (HVAC) delle due camere di crescita.

Il sistema HVAC è gestito da una centralina di controllo (Hydro-X Pro, TrolMaster), controllabile da remoto, che attua un controllo combinato ed



automatizzato di tutti i componenti garantendo condizioni climatiche stabili e precise. Il sistema di controllo è dotato di datalogger interno che si interfaccia ad una ricca rete di sensori (temperatura dell'aria, umidità dell'aria, concentrazione di CO₂, intensità luminosa PAR, umidità, temperatura e conducibilità elettrica del substrato) per la registrazione continua di tutti i parametri climatici.

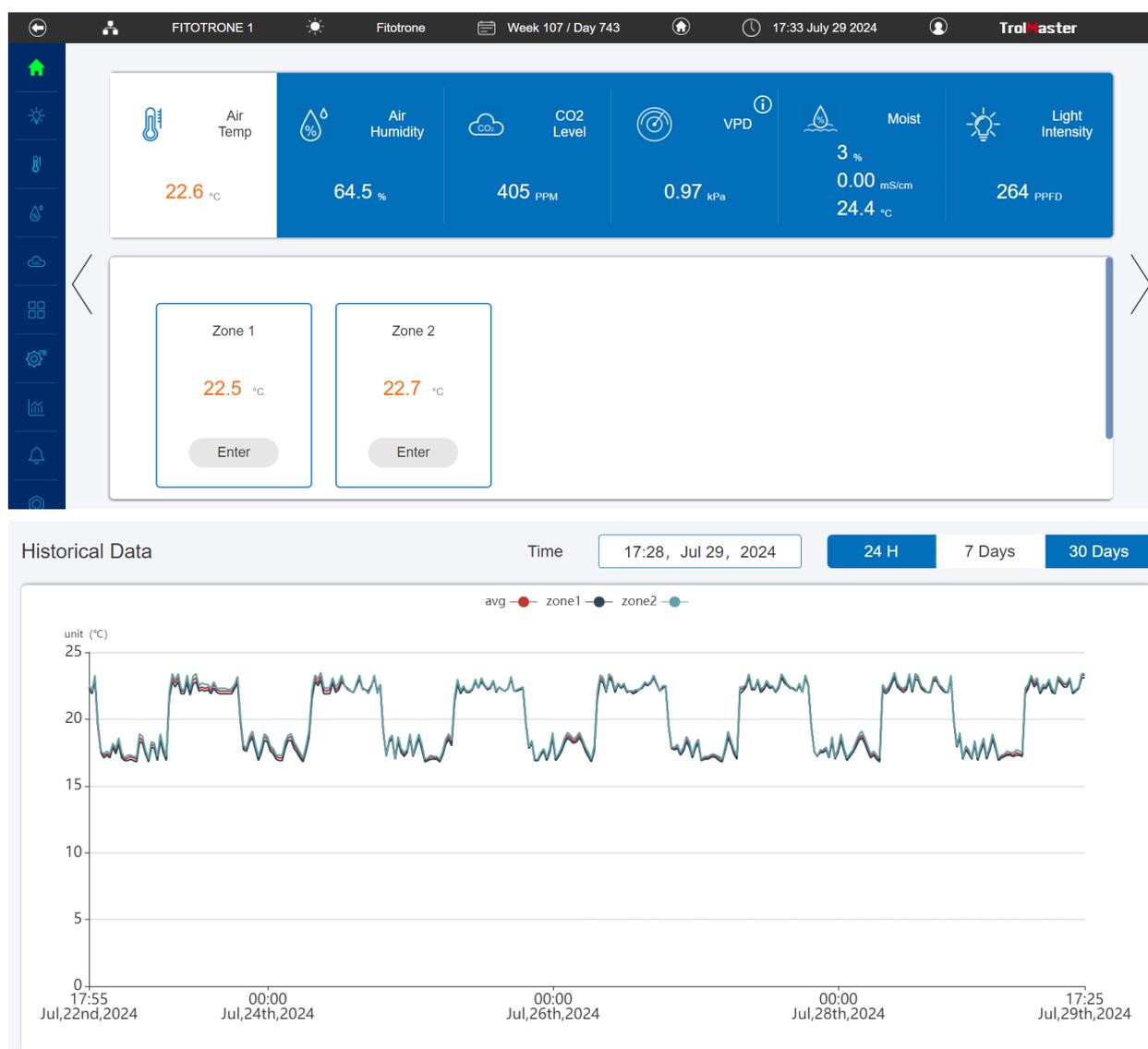


Figura 5. Schermate dell'interfaccia web del sistema di controllo Hydro-X Pro TrolMaster.

Il progetto Vertical Farming Sostenibile (VFarm) è stato finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR) nell'ambito dei Programmi di Ricerca di Interesse Nazionale (PRIN) (Codice progetto: 2020ELWM82; CUP: J33C20002350001).



Impianto di illuminazione LED

Le due camere di crescita sono dotate di un impianto di illuminazione LED *custom-made* composto 30 barre illuminanti per bancale (quindi 60 barre nella camera 1 e 30 barre nella camera 2). L'impianto di illuminazione presenta 5 canali indipendenti, pertanto ciascuna barra illuminante è popolata da 5 diversi LED monocromatici delle seguenti lunghezze d'onda:

- UVA 385 nm
- Blue 450 nm
- Green 530 nm
- Red 660 nm
- Far Red 730 nm

Lo spettro e l'intensità di ciascun gruppo di lampade è singolarmente personalizzabile attraverso un sistema di controllo gestito da un software con accesso da remoto. L'intensità massima (PPFD) del sistema di illuminazione è di $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. L'omogeneità di distribuzione della luce, a 90 cm di distanza dal piano di coltivazione, non è inferiore all'80%.

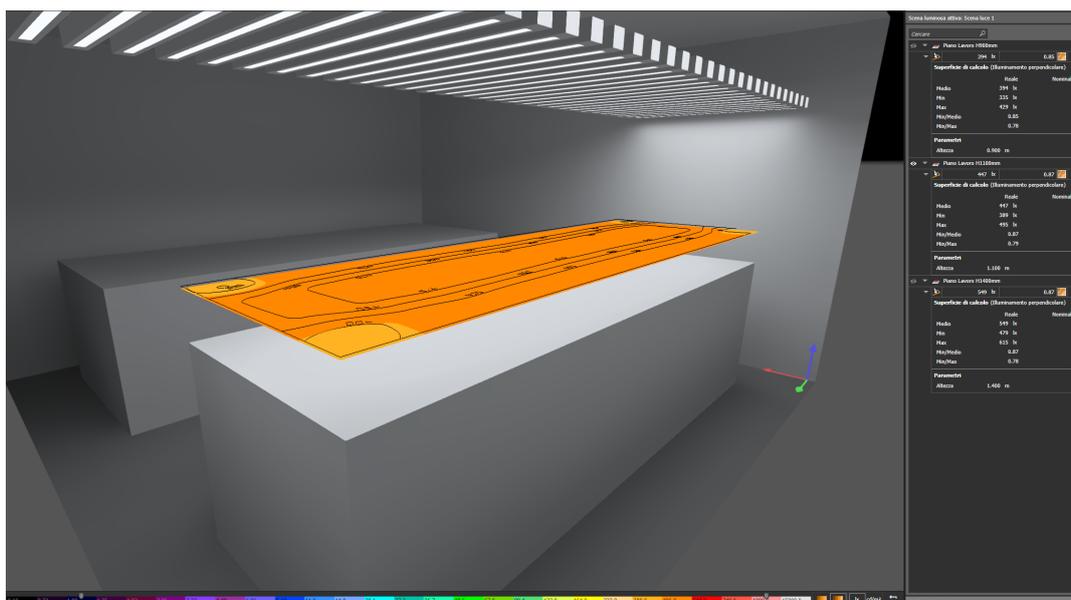


Figura 6. Simulazioni dell'omogeneità di distribuzione della luce sul piano di coltivazione



3 Vertical Farm (UNITO)

4 Vertical Farm (UNIPD)

Il Gruppo di lavoro dell'Università di Padova si è occupato di valutare la coltivazione con sistemi verticali di funghi coltivati e di specie orticole nel contesto dell'acquaponica. Di seguito verranno sinteticamente riportate le principali caratteristiche delle strutture utilizzate.

3.1. Descrizione della fungaia

Il modulo di coltivazione impiegato ha una lunghezza di 25 metri ed una larghezza di 8 metri (200 m²), con altezza al colmo pari a 3,5 metri riproponendo le caratteristiche strutturali e tecnologiche di un impianto industriale. La struttura portante è costituita da tubolari zincati ad arco con diametro di 70 mm e la copertura è realizzata con doppio film plastico opaco alla luce, coibentato con uno strato di 12 cm di lana di roccia al fine di limitare gli scambi termici con l'esterno. Le due testate sono tamponate con policarbonato alveolare da 6 mm (Fig. 1).

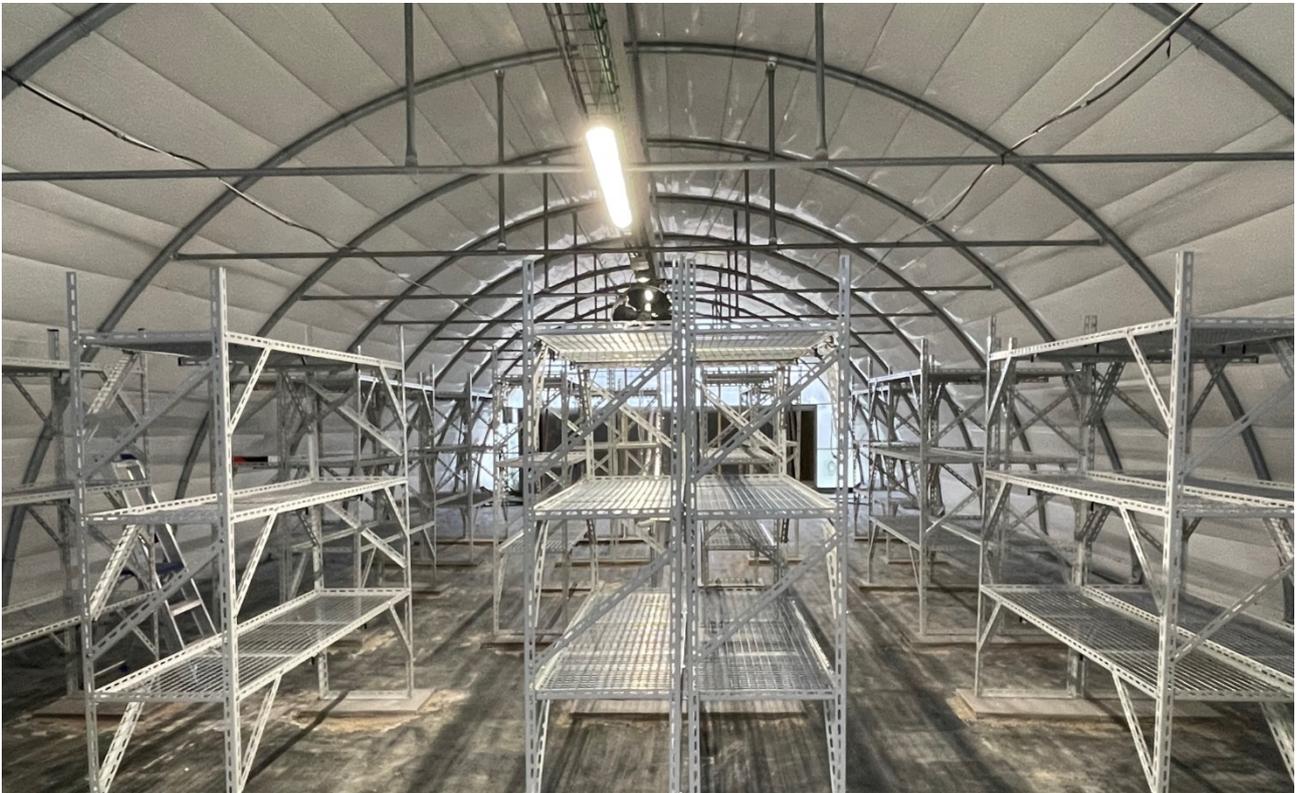


Figura 1. Immagine della fungaia impiegata per le prove.

Il sistema di climatizzazione e riscaldamento della struttura è costituito da un bruciatore a gasolio per la produzione di aria calda che viene immessa e distribuita tramite fun jet. L'umidità relativa della struttura è regolata mediante sistema di nebulizzazione ad alta pressione (fog system) dotato di 30 ugelli collocati a circa 3 metri dal suolo che coprono l'intera superficie. Il sistema è attivato da uno psicrometro collocato in posizione centrale nella struttura.

La struttura presenta anche sistema di raffreddamento attivo tramite cooling system costituito azionato da due elettroventilatori localizzati sul lato opposto a quello in cui è montato il pannello cooling. I ventilatori, azionati con inverter, hanno la possibilità di modulare la velocità e, conseguentemente, il flusso d'aria in uscita, riuscendo così a controllare il ricambio d'aria all'interno della fungaia e la concentrazione di CO₂. Durante la sperimentazione i livelli di CO₂, umidità relativa e temperatura sono stati monitorati grazie ad un sistema di



rilevamento centralizzato. La presenza di una centralina elettronica collegata ai vari sistemi descritti permette di mantenere in modo stabile ed automatico i parametri climatici richiesti per la coltivazione dei funghi. La fungaia è inoltre dotata di tre sonde a calata per la misurazione della temperatura dei substrati di coltivazione.

Allestimento dei supporti di coltivazione

I supporti di coltivazione, rappresentati da scaffalature con tre ripiani, sono stati realizzati per aumentare la numerosità di sacchi di coltivazione per unità di superficie triplicando quella normalmente adottata dai coltivatori. Tale aspetto ha avuto l'obiettivo anche di migliorare l'utilizzo della cubatura unitaria della struttura che rimane non occupata nella coltivazione tradizionale. Ogni scaffale è in grado di ospitare 12 sacchi m^{-2} rispetto ai 4 utilizzati di solito (Fig. 2).

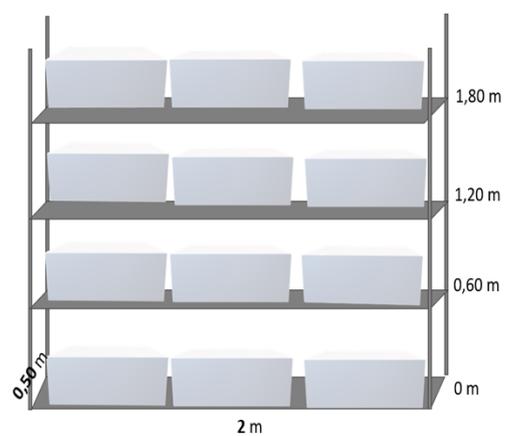


Foto: Fungaia sperimentale presso Azienda sperimentale L.Toniolo Università di Padova

Sistema adatto per *Pleurotus* e Pioppino

1 scaffale \approx 12 sacchi/ m^2

Figura 2. Disposizione dei supporti di coltivazione nella fungaia.

La temperatura e l'umidità relativa dell'aria vengono monitorate alle diverse altezze dei ripiani tramite sensori che rilevano in continuo i dati e li inviano al cloud per la consultazione ed il download (Fig. 3).

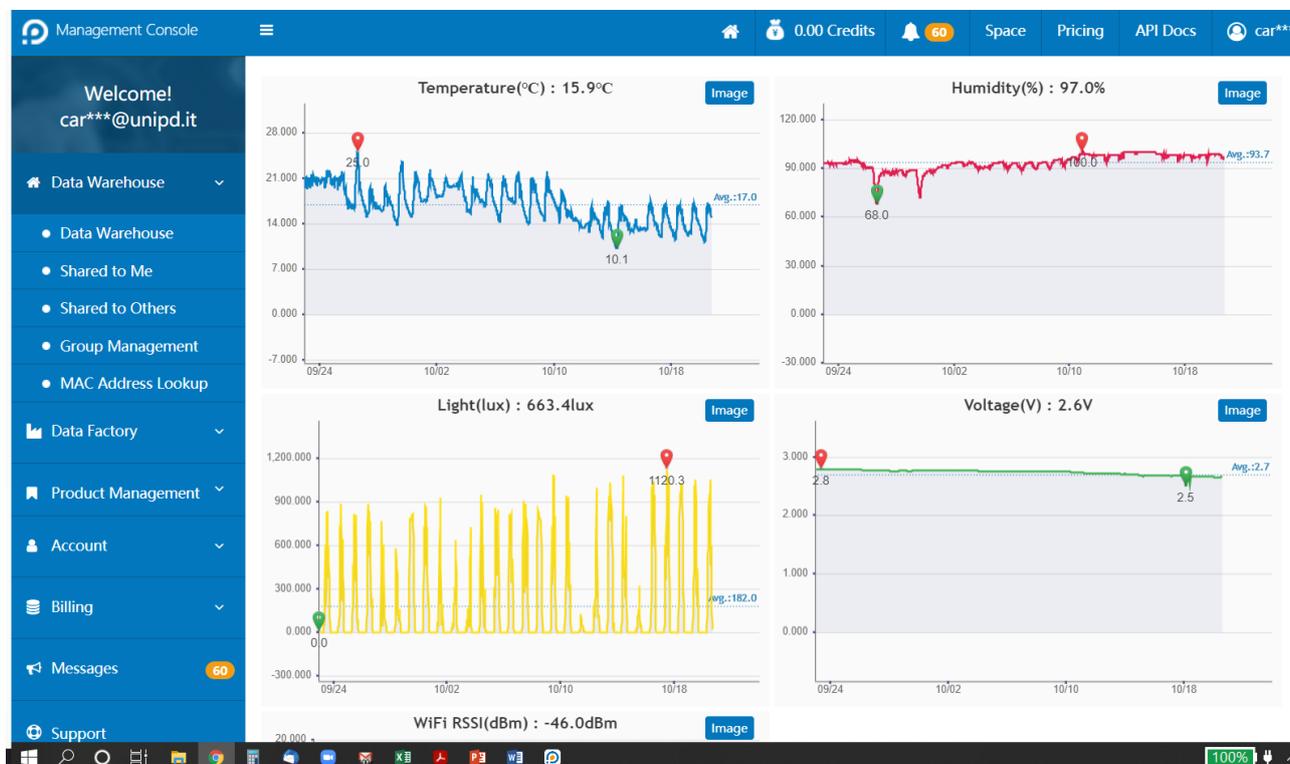


Figura 3 - Schermate dell'interfaccia web del sistema di controllo climatico della fungaia.

La fungaia è dotata anche di strutture completamente opache alla luce all'interno delle quali è installato un sistema di illuminazione artificiale tramite lampade LED con diversa lunghezza d'onda:

- Blue 450 nm
- Red 660 nm
- Far Red 730 nm

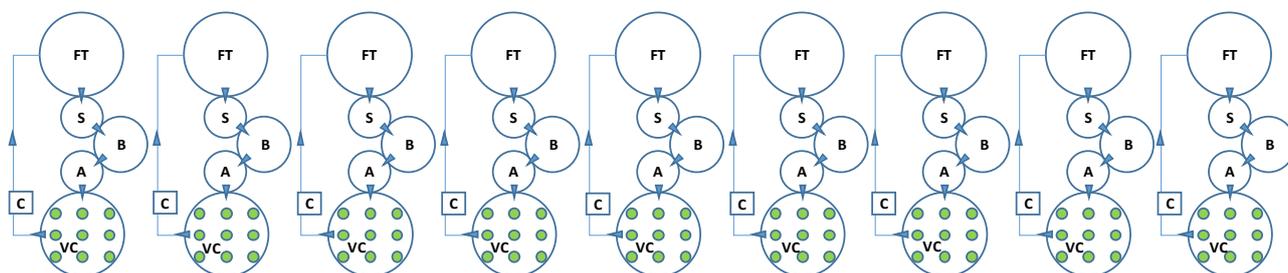
Ciascuna lampada (36 W) è dimmerabile e dotata dei 3 canali.

3.2 Descrizione del sistema di acquaponica

La coltivazione in acquaponica (AP) ha previsto la realizzazione di 9 impianti pilota all'interno di una serra tunnel con dimensioni 50 m di lunghezza, 12 di larghezza e 6 m di altezza al colmo. La struttura serricola è dotata di sistemi di



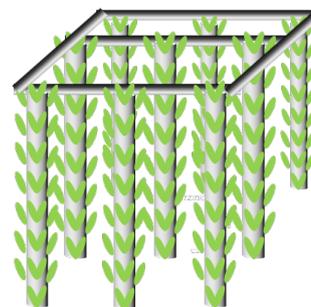
controllo climatico automatici per il mantenimento della temperatura tramite aperture laterali e al colmo unitamente ad un impianto di riscaldamento tramite aerotermini. Ciascun sistema di AP è costituito da una vasca di allevamento del pesce da 500 litri collegata ad un decantatore e successivo biofiltro; Quest'ultimo comunica con un tank di accumulo all'interno del quale è posizionata una pompa di rilancio che invia l'acqua alle colonne di coltivazione (9) che scaricano l'eccesso dell'acqua in una vasca sottostante la cui pompa invia nuovamente l'acqua al tank del pesce (Fig. 4). Si tratta quindi di un sistema di AP chiuso o accoppiato caratterizzato da un volume complessivo di 700 litri. L'acqua presente nel sistema è condizionata termicamente tramite l'impiego di un raffrescatore (chiller) che consente di ottimizzare il range termico per la componente ittica.



FT: fish tank; S: settler; B: biofilter; A: accumulation water tank; VC: vertical cultivation; C: chiller

Figura 4 – *Panoramica dei 9 sistemi di acquaponica impiegati nelle sperimentazioni.*

Ciascuna colonna di coltivazione è caratterizzata da substrato inerte in materiale plastico in grado di consentire l'ancoraggio delle piante ed un tessuto centrale mantenuto continuamente umido dall'acqua proveniente dalla vasca di allevamento del pesce.





Bibliografia

- Carotti, L., Pistillo, A., Zauli, I., Meneghello, D., Martin, M., Pennisi, G., Gianquinto, G., Orsini, F., 2023. Improving water use efficiency in vertical farming: Effects of growing systems, far-red radiation and planting density on lettuce cultivation. *Agric. Water Manag.* 285, 108365. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108365>.
- Graamans, L., Tenpierik, M., van den Dobbelsteen, A., & Stanghellini, C. (2020). Plant factories: Reducing energy demand at high internal heat loads through façade design. *Applied Energy*, 262, 114544.
- Jurga, A., Pacak, A., Pandelidis, D., Kazmierczak, B., 2023. Condensate as a water source in terrestrial and extra-terrestrial conditions. *Water Resour. Ind.* 29, 100196 <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100196>.
- Katsoulas, N., Sapounas, A., De Zwart, F., Dieleman, J.A., Stanghellini, C., 2015. Reducing ventilation requirements in semi-closed greenhouses increases water use efficiency. *Agric. Water Manag.* 156, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.003>.
- Linee Guida ARPA ER LG28/DT retrieved from <https://www.acquereflue.it/wp-content/uploads/2021/02/Linee-guida-per-la-gestione-delle-acque-di-prima-pioggia.pdf>
- Lovichit, W., Kubota, C., Choi, C.Y., Schoonderbeek, J., 2007. Greenhouse water recovery system for crop production in semi-arid climate. ASABE Paper No. 074012. Presented at the 2007 ASAE Annual Meeting. ASABE, St. Joseph, Michigan. <https://doi.org/10.13031/2013.23053>.
- Open Data Comune di Bologna retrived from
- Orsini, F., Pennisi, G., Michelon, N., Minelli, A., Bazzocchi, G., Sanyé-Mengual, E., & Gianquinto, G. (2020). Features and functions of multifunctional urban agriculture in the global north: a review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 562513.
- Pacak, A., Jurga, A., Drag, P., Pandelidis, D., Kazmierczak, B., 2020. A long-term analysis of the possibility of water recovery for hydroponic lettuce irrigation in indoor vertical farm. Part 1: Water recovery from exhaust air. *Appl. Sci.* 10, 8907. <https://doi.org/10.3390/app1024890.7>.
- Soussi, M., Chaibi, M.T., Buchholz, M., Saghrouni, Z., 2022. Comprehensive review on climate control and cooling systems in greenhouses under hot and arid conditions. *Agronomy* 12, 626. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030626>.



Yildiz, I., Stombaugh, D.P., 2006. Heat pump cooling and greenhouse microclimates in open and confined greenhouse systems. *Acta Hort.* 255–262.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.28>.