



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA
TRANSIZIONE ECOLOGICA



Sviluppo e realizzazione di sistemi prototipali BIPV e sperimentazione in serra di larga scala

F. Cartenì, M. Zotti, F. Giannino, G. Bonanomi, R. Motti, S. Mazzoleni



MUSA
Reggia di Portici

SVILUPPO E REALIZZAZIONE DI SISTEMI PROTOTIPALI BIPV E SPERIMENTAZIONE IN SERRA DI LARGA SCALA

F. Cartenì, M. Zotti, F. Giannino, G. Bonanomi, R. Motti, S. Mazzoleni (Università degli studi di Napoli Federico II, Dipartimento di Agraria)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.1 Fotovoltaico ad alta efficienza

Work package 2: Fotovoltaico Piano

Linea di attività: LA2.19 BIPV: Sviluppo e realizzazione di sistemi prototipali BIPV con specifiche esigenze prestazionali

Responsabile del Progetto Paola Delli Veneri ENEA

Responsabile del Work package: Paola Delli Veneri ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sperimentazione di multistrati a film sottile e moduli BIPV in serra e relativi sistemi prototipali".

Responsabile scientifico ENEA: Lucia V. Mercaldo, A. Scognamiglio

Responsabile scientifico: Fabrizio Cartenì

Indice

SOMMARIO.....	3
1 INTRODUZIONE	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 REALIZZAZIONE SERRA GRANDE	5
2.2 SENSORISTICA IOT	15
2.3 SPERIMENTAZIONE PIANTE	15
2.3.1 <i>Sperimentazione in idroponica</i>	15
2.4 APPLICAZIONE DEL MODELLO FOTOSINTESI	23
3 CONCLUSIONI.....	23
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	24
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	24
6 ALLEGATI	25
ALLEGATO 1 - CURRICULUM DEL GRUPPO DI LAVORO.....	25
ALLEGATO 2 – REPORT SENSORISTICA IOT.....	27

Sommario

Il presente report descrive le attività svolte nel working package 2 LA2.19 denominato “BIPV: Sviluppo e realizzazione di sistemi prototipali BIPV con specifiche esigenze prestazionali”. L’attività è stata svolta dal centro museale “Musei delle scienze Agrarie -MUSA” dell’Università degli studi di Napoli Federico II. Gli obiettivi dell’attività. L’obiettivo principale delle attività in carico al MUSA è stato quello di realizzare una serra di larga scala per valutare lo scale-up del sistema per possibili applicazioni industriali.

La prima parte delle attività ha previsto la ristrutturazione di una serra storica precedentemente individuata nella LA2.18. L’opera di ristrutturazione ha avuto come obiettivo quello di integrare parte della struttura con pannelli BIPV realizzando una copertura con moduli vetrati semitrasparenti con celle in silicio bifacciale tale da avere una riduzione della luce trasmessa sufficiente a permettere una crescita vegetale ottimale. Una volta completata la struttura della serra, essa è stata equipaggiata con sensoristica IoT per fornire un monitoraggio continuo dei parametri ambientali. Parallelamente è stato implementato il modello di simulazione, precedentemente sviluppato e calibrato nel corso della LA2.18, integrandolo con i dati della sensoristica per fornire stime in tempo reale sulla efficienza fotosintetica delle piante poste in serra.

I risultati ottenuti dalle sperimentazioni effettuate in serra sotto copertura di moduli BIPV, suggeriscono buone potenzialità per l’applicabilità del sistema integrato per la crescita di specie vegetali di interesse produttivo con la tecnologia impiegata.

1 Introduzione

Il presente report descrive le attività svolte nel working package 2 LA2.19 denominato “BIPV: Sviluppo e realizzazione di sistemi prototipali BIPV con specifiche esigenze prestazionali”. L’attività è stata svolta dal centro museale “Musei delle scienze Agrarie -MUSA” dell’Università degli studi di Napoli Federico II, quale soggetto responsabile, con la collaborazione dell’ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile. L’obiettivo principale delle attività in carico al MUSA è stato quello di realizzare una serra di larga scala per valutare lo scale-up del sistema per possibili applicazioni industriali.

La prima parte delle attività ha visto la ristrutturazione di una serra storica precedentemente individuata nella LA2.18. La serra storica di Ex-Patologia consiste in una struttura risalente al progetto dell’orto patologico del 1921, e finalizzata nel 1927, destinata a colture di isolamento e quarantena e ricerca sperimentale, composta da totale copertura a vetro, con una superficie totale di circa 240 m². Sul computo totale della metratura la planimetria della struttura (non mostrata) era suddivisa in 5 aree. Un corridoio centrale della larghezza di 1,5 m circa, nella porzione centrale, che funge da area di passaggio tra i vari ambienti e che si sviluppa longitudinalmente per tutta la lunghezza della serra. Il corridoio centrale costituisce la porzione più alta della struttura che sviluppa di circa 80 cm oltre le falde ad est ed ovest con la funzione di camino di areazione per permettere il riciclo dell’aria calda sviluppata nella struttura e quindi regolazione della temperatura. Il resto della superficie era invece suddiviso in 4 aree sperimentali, due per colture in vaso e due per sperimentazioni in suolo. L’opera di ristrutturazione ha avuto come obiettivo quello di integrare parte della struttura con pannelli BIPV realizzando una copertura con moduli vetrati semitrasparenti con celle in silicio bifacciale tale da avere una riduzione della luce trasmessa sufficiente a permettere una crescita vegetale ottimale.

Per verificare la funzionalità della struttura realizzata si è optato per l’allestimento di una sperimentazione che, oltre a valutare gli effetti della crescita delle piante sotto BIPV, replicando i risultati delle precedenti sperimentazioni incluse nel report del LA2.18, permettesse di valutare l’idoneità della struttura per effettuare test di crescita basati su ipotesi sperimentali consolidate. Le specie utilizzate sono state *Lycopersicon esculentum* e *Lactuca sativa* in condizioni di crescita idroponica. La scelta dell’idroponica è stata mediata dal fatto che il sistema colturale fuori suolo permette di avere un considerevole livello di controllo sulle specie utilizzate [1] sia in termini di nutrienti [2] che di infestazione da patogeni [3,4], e quindi di ottenere una valutazione della crescita delle piante sotto BIPV il più attendibile possibile. In aggiunta si è optato per effettuare dei test utilizzando trattamenti con effetti noti sulle specie vegetali. Per questo si è comparata la crescita delle due specie vegetali cresciute in substrati acquosi in condizioni normali, con l’aggiunta di biochar (anche detto carbone attivo), oppure arricchiti con fertilizzante a base di Azoto-Fosforo e Potassio (NPK). Da letteratura è noto che la crescita delle piante agrarie è fortemente stimolata in ambienti eutrofizzati [5,6] per questo ci si aspetta che l’aggiunta di nutrienti permetta di osservare una differenza significativa nel test rispetto agli altri trattamenti. Per quel che riguarda il trattamento con biochar ci aspettiamo che la crescita sia migliore rispetto alle piante cresciute in substrati acquosi con regimi di nutrienti normali ma minore rispetto a quelle fertilizzate con NPK. Tale effetto è ricondotto all’effetto di sequestro di sostanze allelopatiche (sostanze che inibiscono la crescita radicale e spesso prodotte dalla pianta stessa [7]). Tali sostanze vengono sequestrate dal mezzo acquoso per effetto della struttura porosa dell’ammendante tale da legare tutte le componenti a carattere non proteico nell’ambiente e limitandone, quindi, un effetto biologico negativo per le piante [8,9]. D’altro canto, la struttura inerte del biochar e la composizione totalmente a base di Carbonio non permette una promozione di crescita tale da raggiungere i livelli delle piante in sistemi fertilizzati se non miscelato con opportuni ammendanti [10].

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Realizzazione serra grande

Prima della ristrutturazione, la serra presentava innumerevoli rotture della copertura vetrata nei vari pannelli, sia nella porzione superiore che in quella laterale, per un totale approssimativo del 60% della copertura. Gli infissi in ferro che fungevano da sostegno per le lastre in vetro erano posizionati a modo di griglia, ed erano costituiti da profili a T nel quale le lastre sagomate venivano fissate con l'ausilio di collanti a base di malte e materiali di ignota origine. All'interno della struttura, oltre alla presenza di residui frantumati della copertura, lo stato di abbandono ha permesso la formazione di una consistente comunità vegetale che però non sembra aver deteriorato le strutture portanti della serra (dettagli sullo stato della serra al momento del primo sopralluogo sono documentati in Figura 1). La struttura portante è composta da travi IPE in acciaio (o profilo ad H) connesse da bullonature su piattine in ferro dello spessore di 5 mm saldate sulle travi stesse. In generale, dato l'effetto delle intemperie si è osservato che buona parte delle strutture composte da profili a T (quelle maggiormente esposte ad eventi piovosi) andavano sostituite, mentre le strutture portanti sono risultate in buono stato e preservabili per i fini della ristrutturazione. Dopo la fase di valutazione dello stato della struttura si è proceduto ad analizzare l'area dove intervenire per l'applicazione di pannelli BIPV progettati anche in base alle esigenze estetiche e di valorizzazione del sito e che potessero andare ad integrare la copertura della serra. La struttura consiste in due falde a copertura, ciascuna con una superficie 19,11 x 5,71 m (circa 109 m²) con un'inclinazione di circa 30°. Le due falde risultano orientate in maniera simmetricamente opposta. La prima verso ovest, affiancata dalle strutture dell'attuale serra di patologia vegetale ad una distanza di 2 m circa e da una porzione di bosco composta da alberi monumentali di *Quercus ilex* con un'altezza stimata di 18 m. L'altra falda, esposta ad est, è contingente al piazzale di accesso delle strutture di patologia vegetale ed in prossimità di un'alberatura di agrumi dell'altezza di 3 m ad una distanza di 5 m circa. Tale area, data l'esposizione più favorevole e l'assenza di alberi ad alto fusto è stata preferita per l'applicazione dei moduli BIPV come riportato in Figura 2. Nella porzione frontale della serra (esposta a sud) si è riscontrata la presenza 2 alberi di Magnolia che limitavano il passaggio della radiazione solare ed alteravano il soprassuolo in prossimità dei basamenti della serra storica per effetto di espansione radicale nel suolo. Da una valutazione del contesto e dalla possibilità che le magnolie potessero costituire una fonte di danno per la struttura in ristrutturazione e per il personale impiegato, in seguito anche di una valutazione dello stato vegetativo e fitopatologico si è optato per la rimozione dell'alberatura.



Figura 1 Dettaglio della serra di “ex-Patologia” individuata per la ristrutturazione. In alto la vista laterale sul lato est della struttura. In basso a sinistra, l’angolo esposto a sud-est. In basso a destra la vista frontale della struttura.

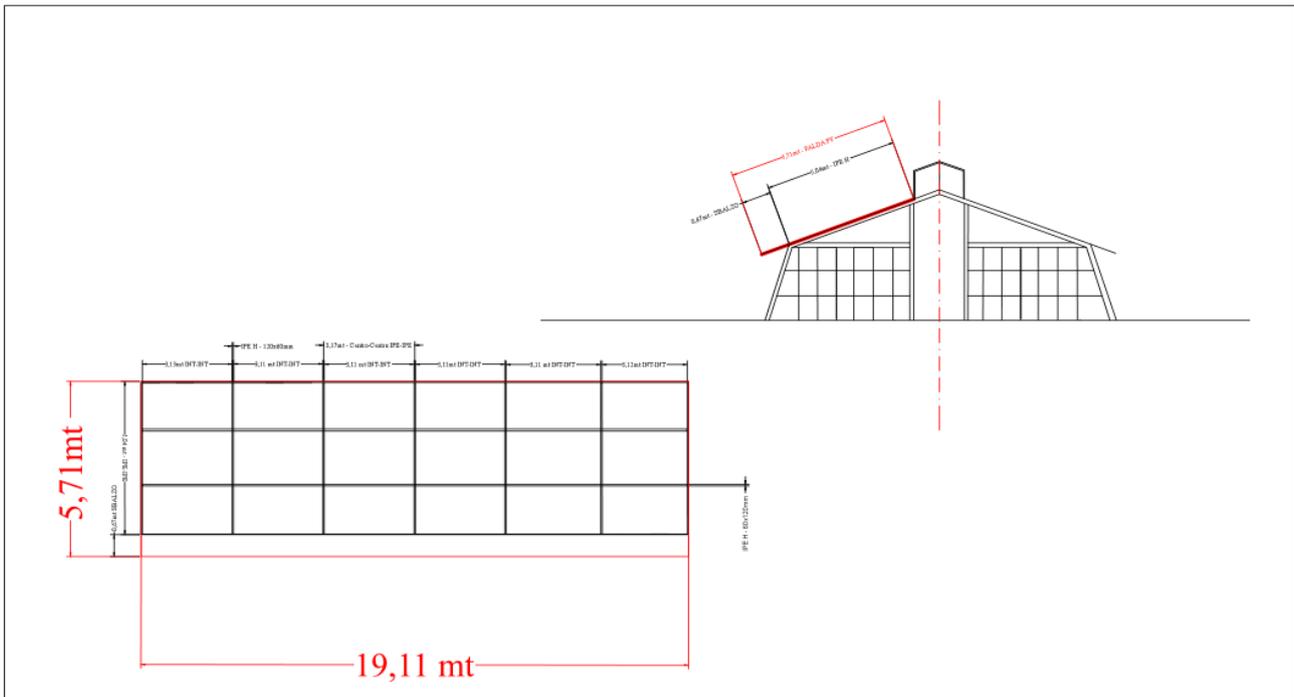


Figura 2 Rilievo architettonico della serra da ristrutturare. Dettaglio della falda sud oggetto dell’impianto fotovoltaico.

Nella prima fase, la struttura esistente è stata ripulita dai residui dell’incuria. In prima battuta sono state liberate le strutture dalle piante che vi sono cresciute all’interno (Figura 3) si è posta attenzione anche a rimuovere il suolo accumulato nelle strutture in prossimità della vegetazione. I residui sono stati subito smaltiti dopo la rimozione e selezionati per evitare la presenza di materiali non compostabili. I residui vegetali sono stati compostati nelle aree dedicate all’interno di parco Gussone.



Figura 3 Rimozione della vegetazione nella serra storica. Dato il disuso e l’impraticabilità non è stato possibile negli anni precedenti all’intervento di poter intervenire con opere di pulizia periodica

Dopo la rimozione della vegetazione sono stati rimossi i bancali interni composti da mattoni forati ed intelaiature di ferro (Figura 4). Al completamento della rimozione dei bancali si è potuto procedere alla

rimozione delle vetrate sia sui lati che sulle coperture superiori (Figura 5). Una volta eliminate le lastre di vetro sono state rimosse le componenti in ferro che avevano subito maggiormente gli effetti del tempo. Le parti eliminate consistevano nelle strutture esterne maggiormente esposte, quali le T a sostegno della copertura che comunque andavano rimosse per favorire la messa in posa dei BIPV, ed una parte delle griglie laterali composte da infissi che andavano incontro ad una fase di sfaldamento. La porzione rimanente, che consisteva nella struttura portante ed una parte degli infissi è stata sabbiata per eliminare residui di vernice e ruggine superficiale e per visualizzare se la corrosione avesse avuto effetti più profondi. In seguito alla sabbiatura, le strutture sono state trattate con antiruggine e tinteggiate con vernice da esterni di colore grigio chiaro (Figura 6).



Figura 4 Operazioni di pulizia dell’allestimento interno alla serra storica. Si notano i bancali con scheletro in ferro ed i ripiani in mattoni forati che venivano utilizzati per eseguire le prove sperimentali di patologia.



Figura 5 Rimozione delle coperture vetrate sulla serra storica. Vetrate che verranno sostituite con pannelli BIPV e pannelli in polycarbonato trasparente.



Figura 6 Serra storica durante l'opera di sostituzione delle strutture in ferro erose dal tempo e la fase di sabbiatura della struttura rimanente

Dopo la fase di pulitura si è proceduto a preparare il piano sottostante per la messa in posa del massetto. È stato previsto di rendere la serra completamente adibita a sperimentazione in vaso; quindi, la porzione al lato nord dove era esistente una area di sperimentazione in piena terra, è stata predisposta per la messa in posa di un massetto in cemento armato dell'altezza di 20 cm. La fase di predisposizione consisteva nella spianatura e la posa di reti elettro-saldate con maglia 10*10 cm. Invece, nell'area dove già era esistente un'area in cemento, il massetto è stato alzato di 10 cm senza applicazione di reti elettrosaldate in quanto ritenute non necessarie. Sono state posate quattro pozzette per la raccolta delle acque di irrigazioni con cubi di dimensione 20*20*20 cm, e in corrispondenza delle pozzette si è proceduto a dare pendenze al piano finale per poter accumulare le acque residue dell'irrigazione ed evitare ristagni. I dettagli della messa in posa del massetto non riportati in Figura 7 e Figura 8.

Dopo che la struttura in calcestruzzo si è solidificata, si è proceduto a ricostituire le coperture con pannelli in policarbonato trasparente, dallo spessore di 5 mm, fissate con silicone che funge anche da sigillante (Figura 9).

In collaborazione con i partner dell'ENEA è stata progettata la copertura di BIPV al fine di ottimizzare il passaggio di luce diffusa per garantire una soddisfacente crescita vegetale combinata con la produzione di energia elettrica. Inoltre, al fine di conciliare e armonizzare la struttura finale con il contesto paesaggistico, è stato ideato un pattern che riproducesse una copertura boschiva (LA2.17). Per la produzione dei moduli di copertura dell'area destinata all'installazione dei BIPV con le caratteristiche sopra descritte è stata identificata dalla società SunAge SA. La copertura BIPV è stata progettata per riprodurre la precedente disposizione delle vetrate originali. Su un totale di circa 110 m² è stato quindi prevista l'applicazione di 90 pannelli disposti in 3 file di 30 unità ciascuna (Figura 10 e Figura 11). Ciascun pannello ha dimensioni di circa 190x62cm. Il pattern

generale, col duplice scopo di armonizzare la struttura rispetto al contesto del parco Gussone e creare un ambiente di luce diffusa al di sotto della copertura, è riportato in Figura 12. Tale disegno è stato suddiviso tra i pannelli, stampato sul vetro superiore di copertura di ciascun pannello, e ricostruito in fase di installazione. Il risultato del completamento della installazione dei BIPV è riportato nelle Figura 13, Figura 14 e Figura 15. A questa fase è seguita l'installazione della sensoristica IoT e l'allestimento dei bancali per la sperimentazione riportati nelle sezioni successive.



Figura 7 Serra storica durante la messa in posa del massetto



Figura 8 Vista della serra storica dopo la messa a terra del massetto



Figura 9 Serra storica dopo la messa in opera delle coperture in policarbonato trasparente e prima dell'applicazione dei pannelli BIPV

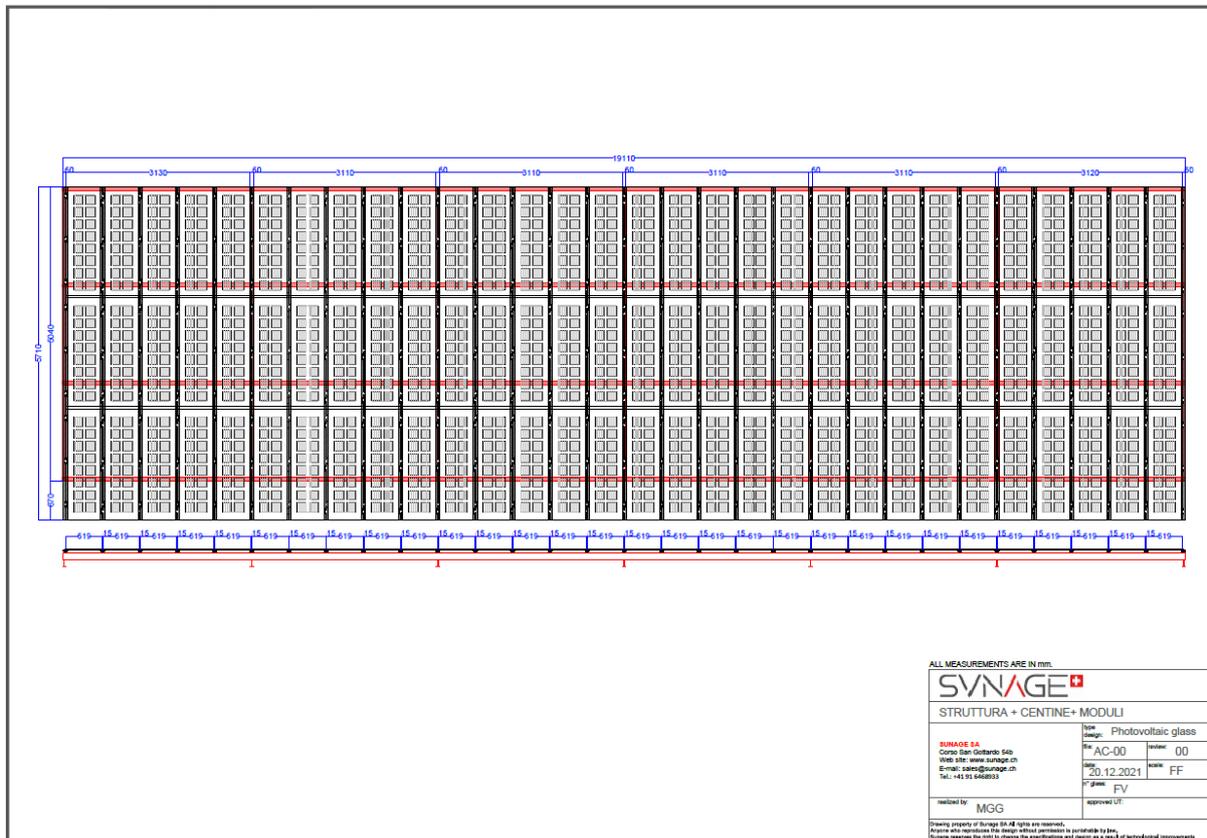


Figura 10 Dettaglio tecnico dell'intera copertura della falda sud con BIPV

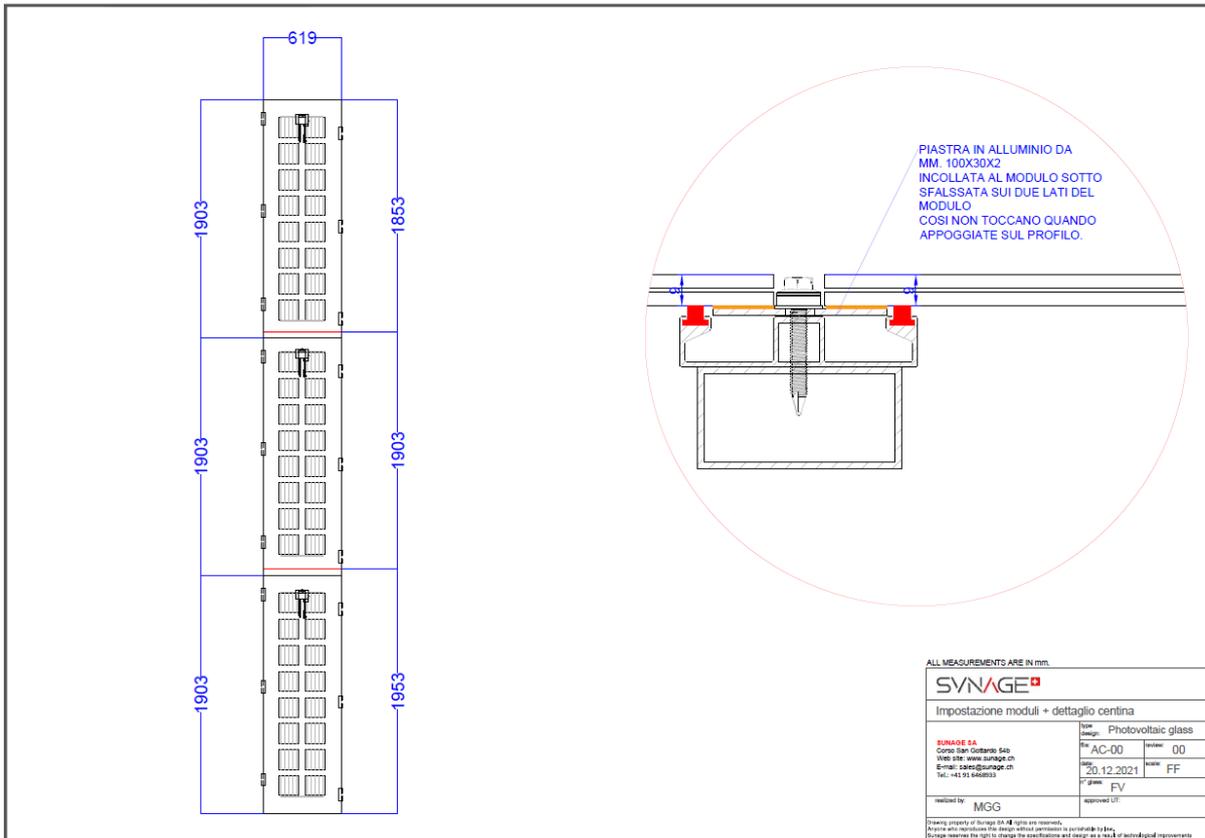


Figura 11 Dettaglio tecnico di una singola fila di pannelli BIPV e sistema di ancoraggio alla struttura

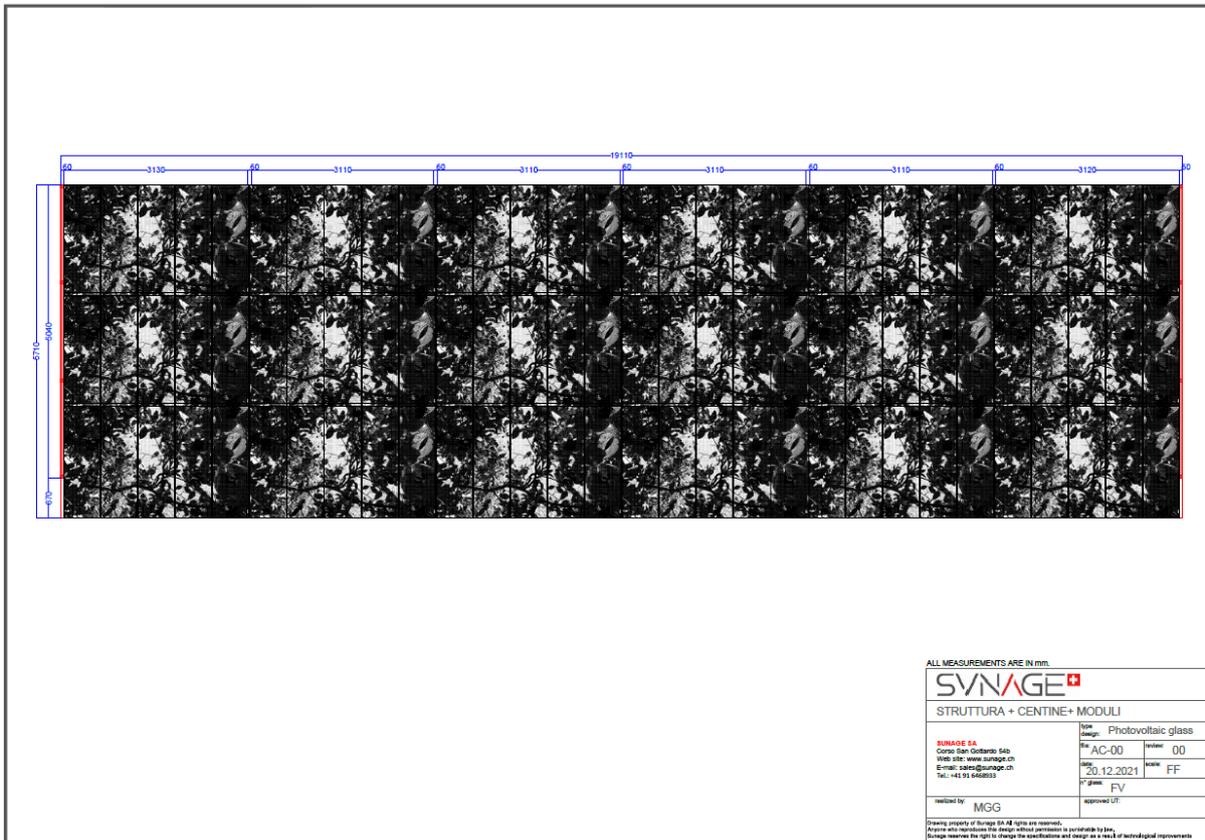


Figura 12 Dettaglio tecnico del pattern stampato sui vetri superiori dei BIPV



Figura 13 Veduta della falda sud dopo installazione dei pannelli BIPV da diverse angolazioni



Figura 14 Veduta dal basso dei pannelli BIPV



Figura 15 Veduta aerea dell'intera serra storica al completamento della ristrutturazione

2.2 Sensoristica IoT

Al fine di monitorare in tempo reale le condizioni ambientali all'interno della serra realizzata nell'ambito della presente attività, è stata installata una rete di sensori IoT. I sensori installati sono equipaggiati con i trasduttori specifici richiesti, ovvero:

- Temperatura [°C]
- Umidità relativa [%]
- Concentrazione di CO₂ [ppm]
- PAR, photosynthetically active radiation [PPFD, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
- Spettrometro a 8 bande [Intensità per banda (nm)]
- Sensore di umidità del terreno [% VWC]

L'obiettivo è quello di monitorare le due distinte sezioni della serra con due gruppi di sensori identici, in modo da confrontarne i dati misurati e caratterizzare gli effetti che la presenza dei pannelli fotovoltaici hanno sul microclima della serra. Per maggiore dettaglio sulle specifiche dei sensori e il loro funzionamento, si allega la relazione tecnica relativa al servizio di installazione, manutenzione e raccolta dati svolto dalla società TopView Srl (Allegato 2).

2.3 Sperimentazione piante

2.3.1 Sperimentazione in idroponica

Le specie utilizzate sono state *Lycopersicon esculentum* e *Lactuca sativa* in condizioni di crescita idroponica. La riproduzione del sistema idroponico consisteva sommariamente nella crescita vegetale in vaschette ossigenate contenenti soluzione nutritiva e l'ausilio di substrati inerti utili al mantenimento strutturale degli apparati radicali. Nel dettaglio, vaschette di alluminio con forma di tronco di cono rovesciato sono state riadattate, la scelta dell'alluminio è stata suggerita dalle qualità fisiche del materiale, facilmente modellabile, isolante rispetto a eccessive variazioni di temperatura che alterano la funzionalità radicale ed il mantenimento chimico della soluzione nutritiva e per l'opacità che non permette il passaggio di radiazioni luminose. Le dimensioni delle vaschette sono di 30 cm di diametro sul lato superiore per 20 cm di diametro sul lato inferiore ed una profondità di 15 cm. Per alloggiare le piantine sono stati sagomati dei fogli in polistirolo dello spessore di 3 mm, nel quale sono stati creati 8 fori sagomati per alveoli delle piante per ogni singola vaschetta. Come alveolo contenente le plantule di pomodoro e lattuga sono stati riadattati dei bicchierini da caffè in materiale plastico opaco del diametro di 3 cm e profondità di 4 cm, al quale sono stati effettuati tre fori basali per permettere la comunicazione degli apparati radicali in espansione con la soluzione nutritiva nella vaschetta, all'interno degli alveoli, una plantula di pomodoro/lattuga è stata alloggiata con l'ausilio di granuli di argilla espansa con diametro variabile e classificato come grana media (8-20 mm). L'argilla espansa è stata scelta in quanto materiale totalmente inerte e caratterizzato da elevata porosità che permette la risalita della soluzione nutritiva per capillarità ed omogenea distribuzione dell'ultima su tutto l'asse radicale. Le plantule utilizzate sono state ottenute da seme previamente germinato in seminiere di polistirolo e terriccio sterilizzato. Le plantule 15 gg dopo la germinazione sono state considerate mature per poter essere impiegate nella sperimentazione. Per evitare effetti di contingenza legate a germinazioni ritardate e crescite disomogenee, delle plantule germinate solo quelle nell'intervallo di altezza tra 5-6 cm per pomodoro e 4-5 cm per lattuga sono state utilizzate. Subito dopo le plantule sono state alloggiare negli alveoli preposti alla germinazione e ricoperte di argilla espansa. Nelle vaschette soluzione nutritiva Hoagland è stata versata fino a capienza e preparata con acqua distillata contenente 2.0 mM di nitrato, 0.25 mM zolfo, 0.20 mM fosforo, 0.62 mM potassio, 0.75 mM calcio, 0.17 mM magnesio, 0.25 mM ammoniaca, 20 μM ferro, 9 μM manganese, 0.3 μM rame, 1.6 μM zinco, 20 μM boro, and 0.3 μM molibdeno, con una conduttività elettrica (EC) of 0.35 dS m^{-1} e pH di 6.0. Per garantire l'aerazione del mezzo acquoso ed evitare fenomeni di ipossia che potessero alterare la fisiologia degli apparati radicali e la composizione chimica della soluzione nutritiva, un sistema di aerazione tramite pompe da acquariologia è stato allestito per ogni singola vaschetta. A distanza di una settimana la soluzione impiegata è stata sostituita per evitare

deficit nutritivi alle plantule testate. Per testare l'utilità della struttura ai fini sperimentali e valutare l'omogeneità della luce che entra all'interno della struttura è stato allestito un esperimento multifattoriale composto da blocchi e trattamenti. I blocchi consistevano in 4 gruppi di plantule per ogni specie che sono stati disposti in diverse posizioni all'interno della serra. Più precisamente ai 4 angoli mantenendo una distanza di 3 metri circa dai lati est ed ovest della struttura. Le vaschette in idroponica sono state poste unicamente al di sotto della porzione con copertura BIPV. Per valutare invece se la copertura sotto BIPV alterasse i risultati sperimentali le plantule per ogni blocco sono state trattate con un'aggiunta di biochar, e fertilizzante trivalente NPK con rapporto 20-20-20 solubile disciolto in acqua ed un controllo nel quale era presente solo la soluzione nutritiva. I trattamenti sono stati scelti perché già noti gli effetti e da sperimentazioni svolte in precedenza in suolo. ci si aspetta che il trattamento controllo sia quello che porta una crescita minore mentre quello a base di NPK deve essere quello che maggiormente è capace di supportare la crescita vegetale. Infine, il trattamento a base biochar si immagina debba essere quello con le crescite più limitate.



Figura 16 A) Sistema sperimentale idroponico composto da vaschetta in alluminio, supporto in polistirolo ed alveoli per alloggio plantule tramite sostegno di argilla espansa. B) Plantule di pomodoro e lattuga allo stadio iniziale della sperimentazione dal quale si possono osservare apparati radicali che fuoriescono dai fori basali dei contenitori. C) Dettaglio dell'alloggio degli alveoli nelle vaschette e sistema di ossigenazione del substrato.

Alla fine di un periodo di 21 gg di crescita le plantule di pomodoro e lattuga sono state estratte dalle vaschette e impiegate per misurazione distruttiva (Figura 16).

Le variabili misurate sono state: biomassa aerea, biomassa radicale, biomassa totale, e rapporto radice parte aerea. Per ognuna delle variabili sia il peso fresco che secco è stato misurato tramite essiccazione dei

campioni in stufa ventilata alla temperatura di 60°C fino a raggiungimento di peso costante. I dati sono stati mostrati in diagrammi a scatole e baffi che mostrano nella linea le mediane, nelle scatole la distribuzione del dato dal 25° al 75° percentile e l'intervallo dei dati validi (non out-layer range). I dati sono stati accompagnati da test di significatività dei dati (ANOVA, analisi della varianza) con significatività fissata per valori di p-value inferiori a 0.05.



Figura 17 Plantule di lattuga da idroponica alla fine della sperimentazione, cresciute sotto moduli BIPV. A sinistra plantule cresciute con aggiunta di biochar in acqua, al centro le piante di controllo ed a destra quelle cresciute in presenza di NPK.

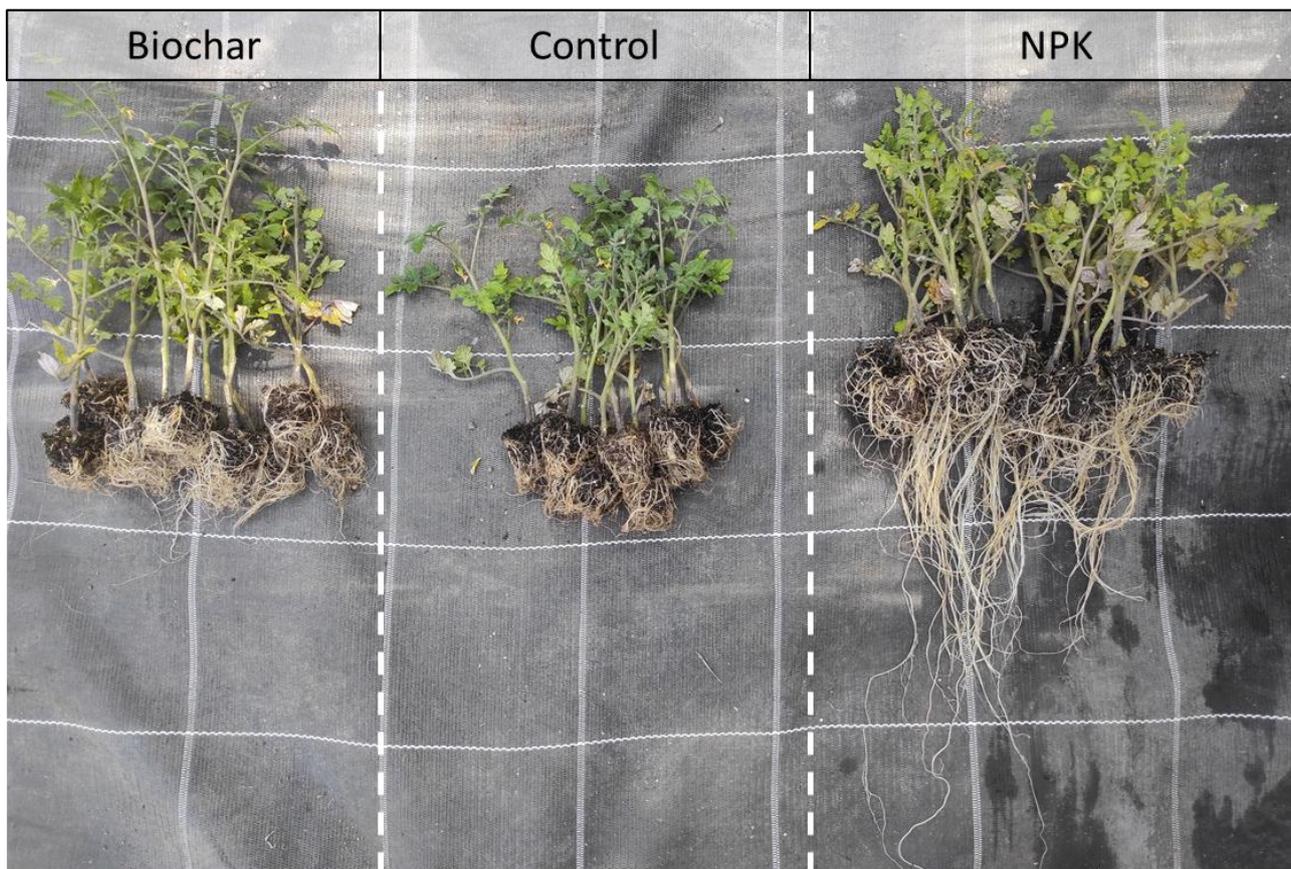


Figura 18 Plantule di pomodoro da idroponica alla fine della sperimentazione, cresciute sotto moduli BIPV. A sinistra plantule cresciute con aggiunta di biochar in acqua, al centro le piante di controllo ed a destra quelle cresciute in presenza di NPK.

Le plantule delle due differenti specie suddivise per trattamento sono mostrate in Figura 17 e Figura 18. Plantule di pomodoro da idroponica alla fine della sperimentazione, cresciute sotto moduli BIPV. A sinistra plantule cresciute con aggiunta di biochar in acqua, al centro le piante di controllo ed a destra quelle cresciute in presenza di NPK. Come previsto si evince che le plantule sia di pomodoro che di lattuga sviluppano apparati radicali più grandi e sviluppati nel trattamento a base di NPK con una leggera crescita nel trattamento a base di biochar superiore alle plantule che sono cresciute nella sola soluzione nutritiva. Crescita maggiore anche evidenziata dai dati di biomassa sia aerea che totale che mostrano in tutti i casi crescite migliori in condizioni di ipertrofia del substrato, condizioni intermedie con la sola aggiunta di biochar e crescite minime nel controllo. Tutti i test della varianza sulle variabili misurate hanno dato valori di cambiamenti significativi nella media delle plantule misurate. Unitamente, anche i rapporti biometrici tra porzioni aeree e porzioni radicali delle piante non hanno subito variazioni consistenti seppure si nota che il rapporto radice fusto è più sbilanciato nella produzione di porzioni radicali quando in presenza di NPK, e sequenzialmente più equilibrato verso la parte aerea in biochar e poi controllo indicando che l'effetto di schermatura di una porzione del fascio luminoso non altera le strategie fisiologiche di allocazione della biomassa tra le varie parti della pianta che invece risponde a processi di sviluppo già conosciuti. Le tendenze dell'effetto descritto sono state identiche sia per le plantule di lattuga che per quelle di pomodoro. (Figura 19 e Figura 20).

Lattuga per trattamento

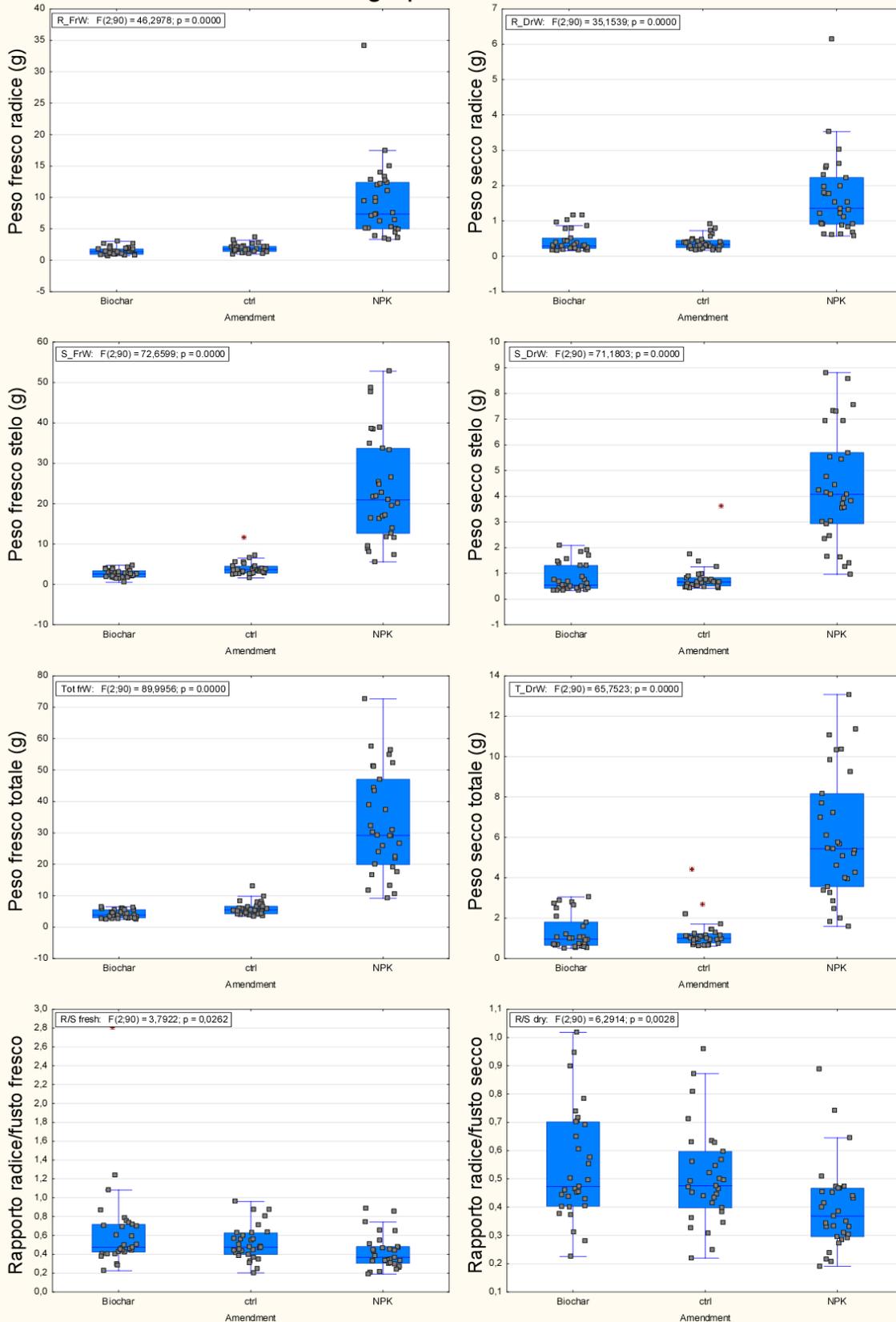


Figura 19 Diagrammi a scatola e baffi sui valori di crescita di plantule di lattuga in idroponica per i tre trattamenti previsti (Biochar, Controllo e NPK) a sinistra si possono osservare i valori per i pesi freschi di apparati radicali, parte aerea, biomassa totale e rapporti tra apparati radicali e parte aerea. A destra i corrispettivi per peso secco.

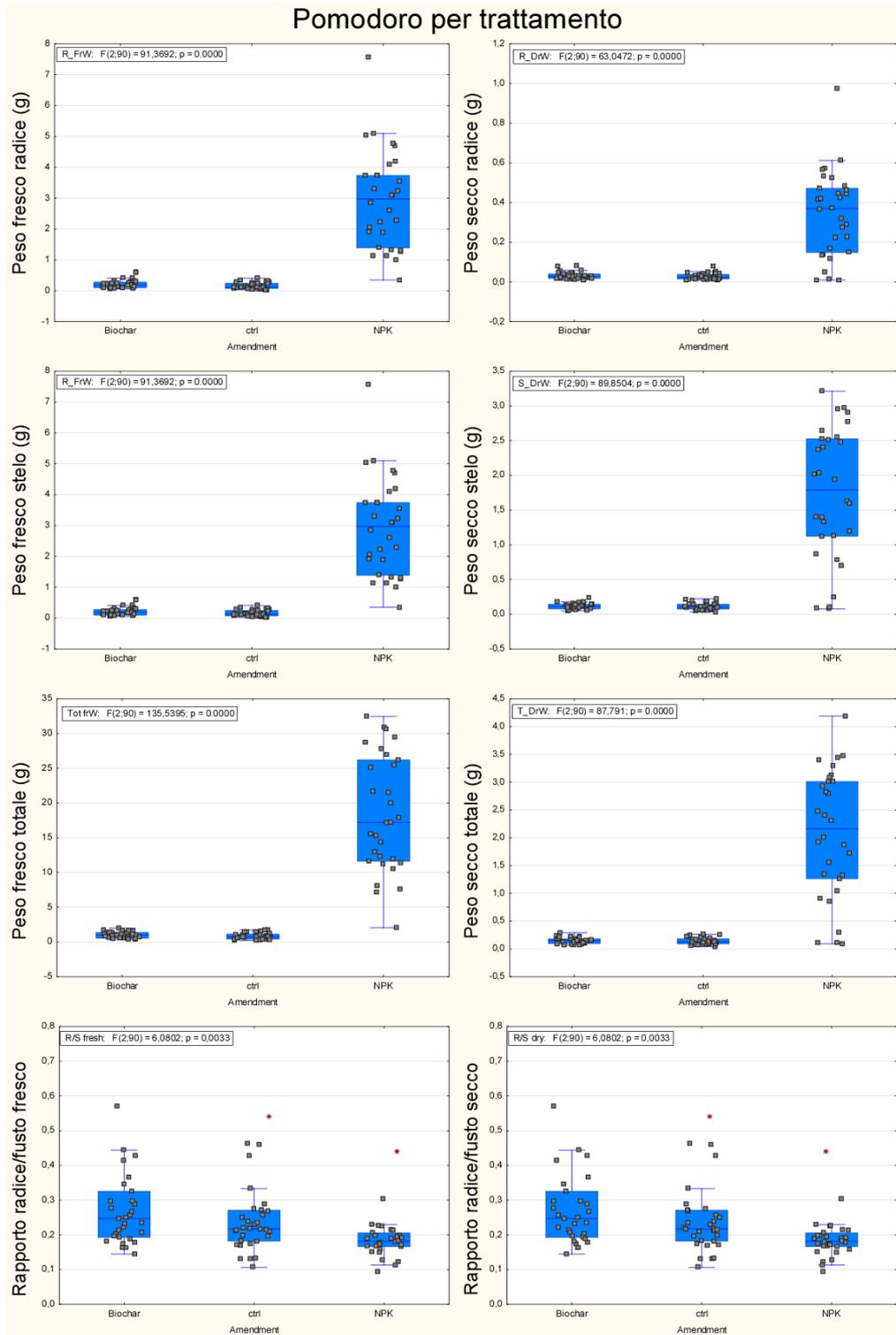


Figura 20 diagrammi a scatola e baffi sui valori di crescita di plantule di pomodoro in idroponica per i tre trattamenti previsti (Biochar, Controllo e NPK) a sinistra si possono osservare i valori per i pesi freschi di apparati radicali, parte aerea, biomassa totale e rapporti tra apparati radicali e parte aerea. A destra i corrispettivi per peso secco

Per quanto riguarda la valutazione degli effetti della differente posizione dei sistemi di idroponica in serra si osserva per tutte le variabili che non c'è un cambiamento significativo della crescita sia per lattuga che per pomodoro indicando che la struttura sperimentale non influisce sulla crescita vegetale e che non sono presenti aree con differente illuminazione (Figura 21 e Figura 22).

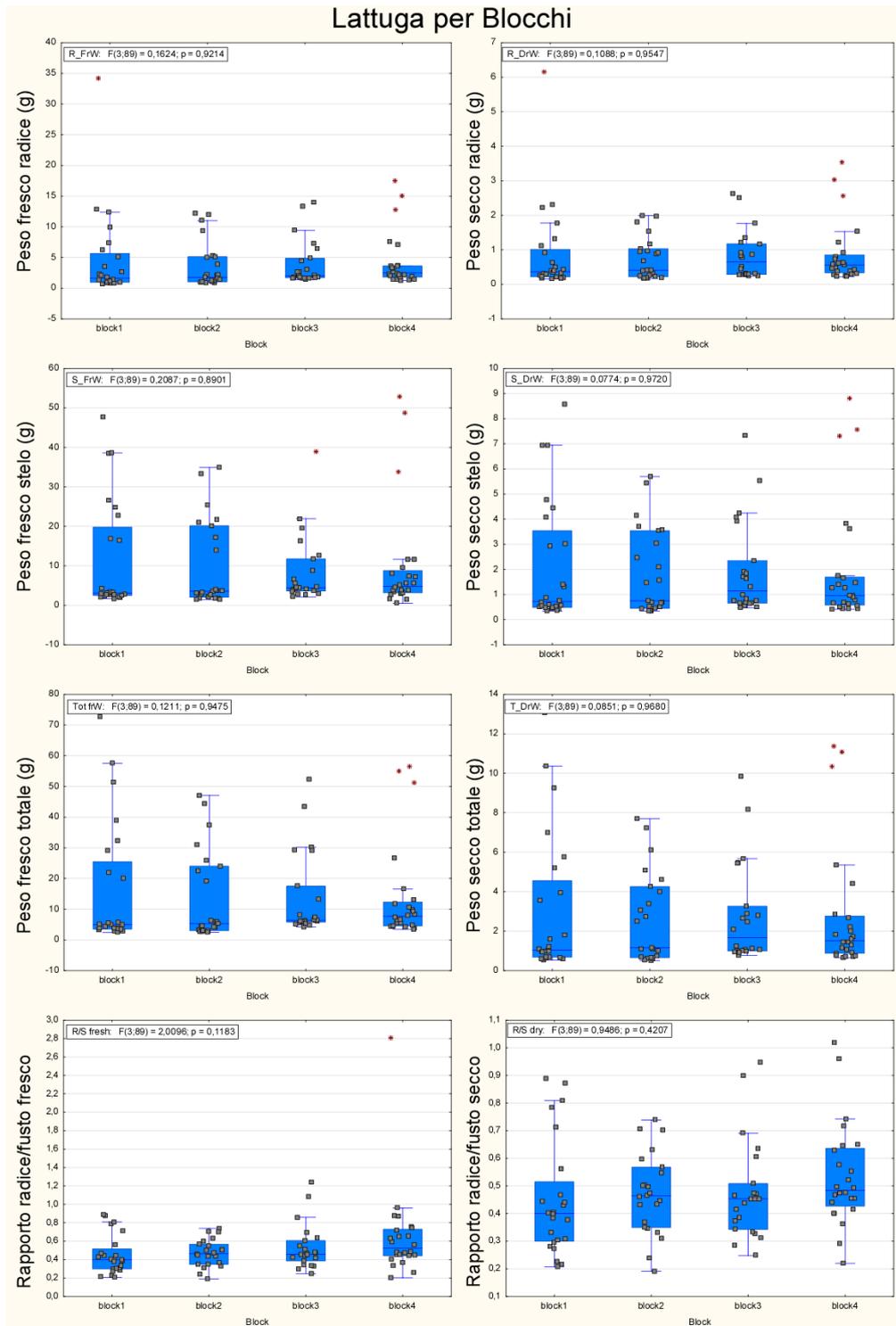


Figura 21 Diagrammi a scatola e baffi sui valori di crescita di plantule di Lattuga in idroponica per i quattro blocchi (posizioni) previste. A sinistra si possono osservare i valori per i pesi freschi di apparati radicali, parte aerea, biomassa totale e rapporti tra apparati radicali e parte aerea. A destra i corrispettivi per peso secco

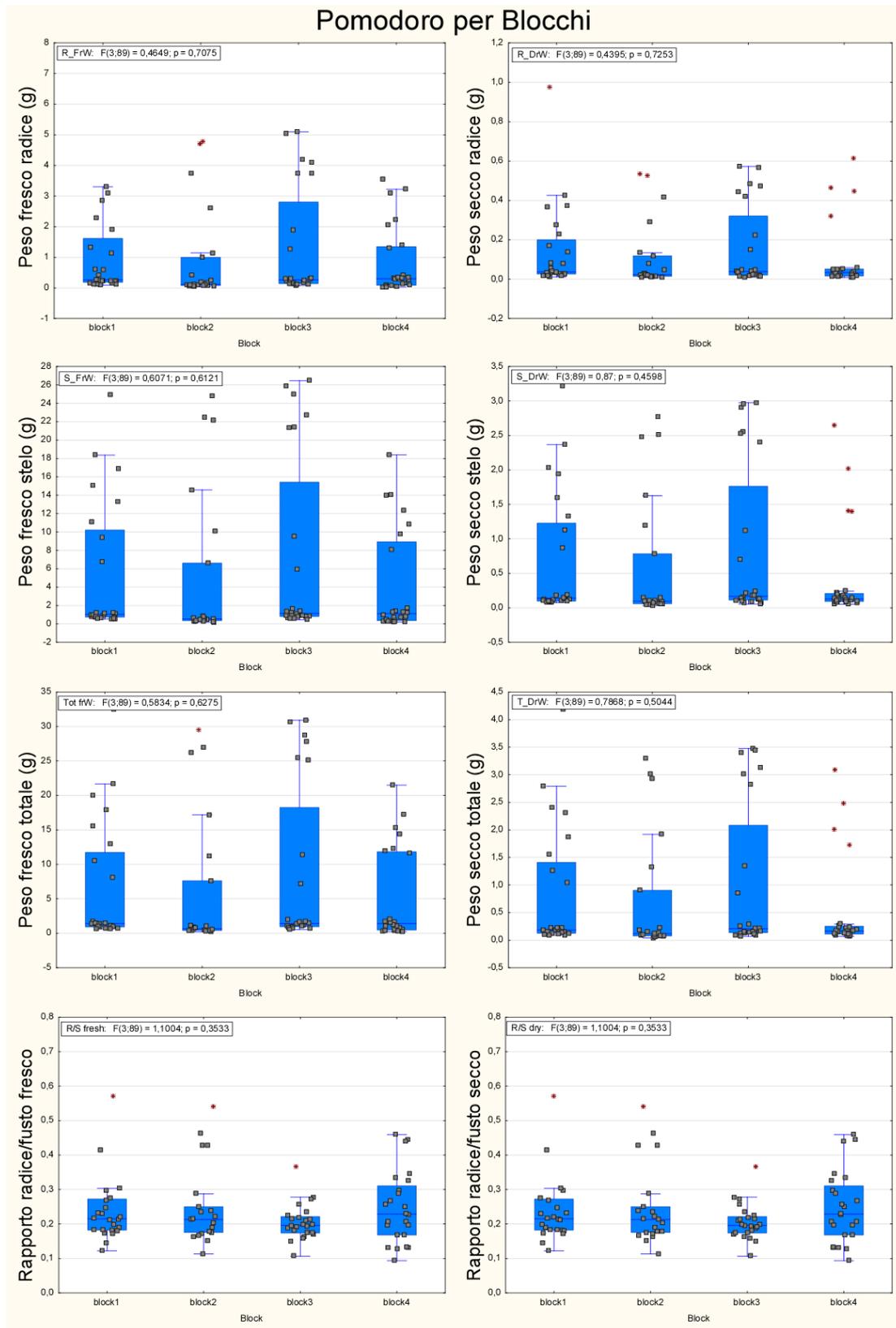


Figura 22 Diagrammi a scatola e baffi sui valori di crescita di piantine di pomodoro in idroponica per i quattro blocchi (posizioni) previste. A sinistra si possono osservare i valori per i pesi freschi di apparati radicali, parte aerea, biomassa totale e rapporti tra apparati radicali e parte aerea. A destra i corrispettivi per peso secco

2.4 Applicazione del modello fotosintesi

A valle del processo di calibrazione che ha prodotto i risultati riportati nel report relativo alle attività della linea LA2.18, il modello è stato definitivamente integrato con i dati raccolti dalla sensoristica IoT. Utilizzando i dati raccolti, il modello sviluppato simula e restituisce in tempo reale una stima della capacità fotosintetica delle piante. Un esempio di simulazione per un periodo di otto giorni è riportato in Figura 23. Tale applicazione permette di effettuare un controllo in tempo reale delle condizioni colturali all'interno della serra in modo da poter intervenire tempestivamente per correggere le condizioni ambientali.

Rispetto a sistemi tradizionali, come per esempio il controllo della temperatura per la regolazione dei sistemi di climatizzazione, una applicazione di questo tipo fornisce una visione integrata del sistema pianta permettendo di ridurre al minimo gli interventi solo quando l'insieme dei parametri ambientali diventano realmente limitanti per l'attività fotosintetica. Potrebbe capitare, per esempio, di avere temperature molto alte in momenti in cui la quantità di luce incidente sarebbe comunque limitante. In un caso del genere, operare un abbassamento della temperatura non porterebbe vantaggi produttivi con un conseguente spreco energetico.

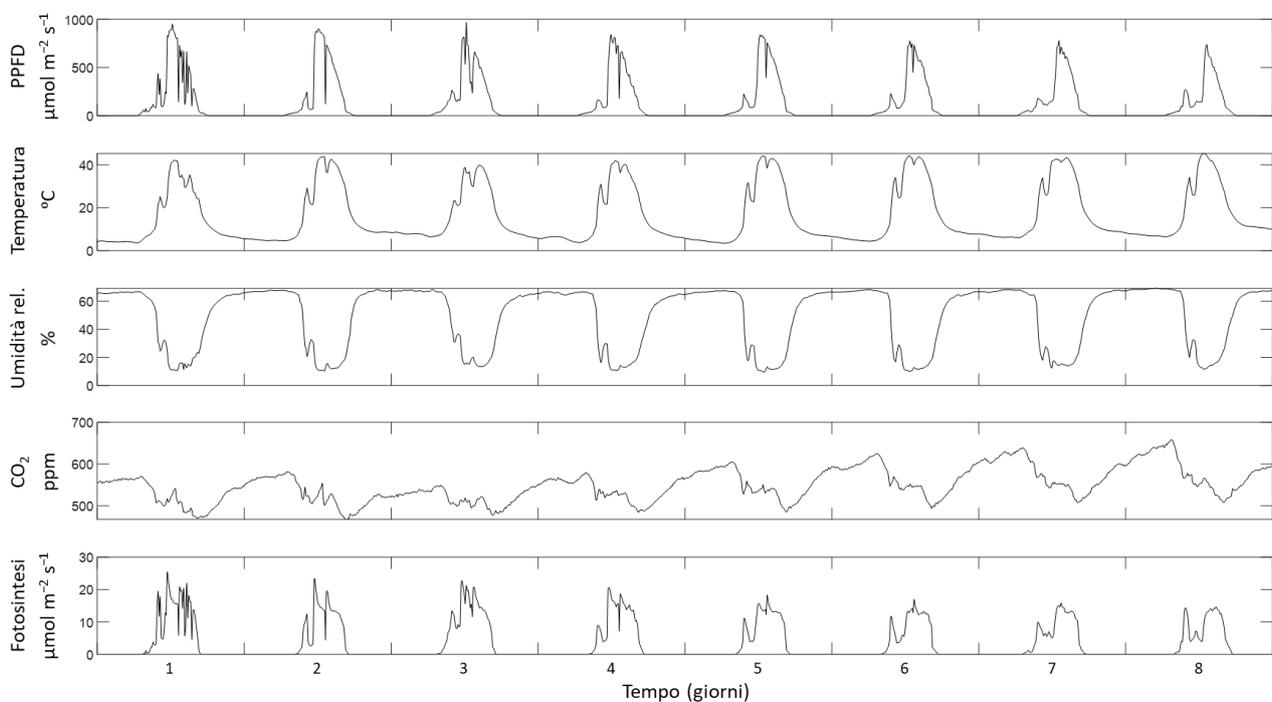


Figura 23 Parametri ambientali registrati e stima del flusso fotosintetico di piante di *Lactuca sativa* nella serra prototipale di larga scala. I grafici riportano, dall'alto verso il basso, le variabili ambientali misurate dai sensori: intensità luminosa in termini di densità del flusso di fotoni fotosinteticamente attivi (PPFD), temperatura dell'aria, umidità relativa, concentrazione di CO₂ nell'aria; e il flusso fotosintetico simulato dal modello.

3 Conclusioni

Questa linea di attività ha prodotto la realizzazione di una serra prototipale di larga scala (circa 240m² di cui metà con copertura fotovoltaica con pannelli semitrasparenti). La struttura realizzata consiste in un ambiente ad alta tecnologia con parziale copertura fotovoltaica composta di moduli semitrasparenti innovativi che ottimizzano il sistema produttivo combinato energia-pianta permettendo, allo stesso tempo, di introdurre elementi grafici di valore estetico/artistico sulle superfici trasparenti. La presenza di immagini con particolare pattern a diverso grado di trasparenza, da una parte ottiene l'effetto di trasmettere luce diffusa eliminando

la tassellatura tra zone d'ombra e di luce diretta nell'ambiente sottostante. Allo stesso tempo, la visualizzazione nelle zone trasparenti del pattern grafico (in questo caso rappresentante rami di alberi con foglie rade) sviluppa un effetto gradevole di rappresentazione di un'immagine naturale. La tecnica grafica sperimentata in questa struttura potrà essere riproposta con temi estetici e figurativi differenti adattati a diversi scenari applicativi.

Relativamente alla parte sperimentale prevista dal progetto in questa serra, va detto che le conseguenze della pandemia di COVID-19, inevitabilmente, hanno rallentato la realizzazione della stessa serra, impedendo di portare a conclusione tutti gli esperimenti prefissati nel piano di lavoro originario. In ogni caso, le prove condotte hanno fornito buone indicazioni sulla applicabilità del sistema integrato per la crescita di specie vegetali di interesse produttivo confermando la possibilità di utilizzo dell'ambiente tecnologico realizzato a fini di sperimentazione agraria.

Infine, l'implementazione della strumentazione di raccolta e gestione di dati ambientali in tempo reale con tecnologia IoT e la sua integrazione con i modelli di simulazione di fotosintesi, ha dimostrato la possibilità di sviluppo di sistemi di ottimizzazione e controllo di potenziale grande interesse applicativo, in particolare nel settore delle colture in ambiente controllato, sistemi idroponici e fotobioreattori per crescite algali.

4 Riferimenti bibliografici

- 1 J. B. Jones Jr. "Hydroponics: its history and use in plant nutrition studies". *Journal of plant Nutrition* 5 (1982), 1003-1030.
- 2 M. H. Jensen. "Hydroponics". *HortScience* 32 (1997), 1018-1021.
- 3 K. Shimizu, Y. Matsuda, T. Nonomura, H. Ikeda, N. Tamura, S. Kusakari, J. Kimbara, H. Toyoda. "Dual protection of hydroponic tomatoes from rhizosphere pathogens *Ralstonia solanacearum* and *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis* - *lycopersici* and airborne conidia of *Oidium neolycopersici* with an ozone - generative electrostatic spore precipitator". *Plant Pathology* 56 (2007), 987-997.
- 4 G. Bonanomi, F. Ippolito, F. Scala. "A "black" future for plant pathology? Biochar as a new soil amendment for controlling plant diseases". *Journal of plant pathology* 97 (2015).
- 5 M. Siddiqi, H. Kronzucker, D. Britto, A. Glass. "Growth of a tomato crop at reduced nutrient concentrations as a strategy to limit eutrophication". *Journal of plant Nutrition* 21 (1998), 1879-1895.
- 6 X. G. Chen, C. Gastaldi, M. Siddiqi, A. Glass. "Growth of a lettuce crop at low ambient nutrient concentrations: a strategy designed to limit the potential for eutrophication". *Journal of plant Nutrition* 20 (1997), 1403-1417.
- 7 E. L. Rice. "Allelopathy". (2012).
- 8 T. S. Alshahrani, N. I. Suansa. "Application of biochar to alleviate effects of Allelopathic chemicals on seed germination and seedling growth". *BioResources* 15 (2020), 382-400.
- 9 Y. M. Awad, S.-E. Lee, M. B. M. Ahmed, N. T. Vu, M. Farooq, I. S. Kim, H. S. Kim, M. Vithanage, A. R. A. Usman, M. Al-Wabel. "Biochar, a potential hydroponic growth substrate, enhances the nutritional status and growth of leafy vegetables". *Journal of Cleaner Production* 156 (2017), 581-588.
- 10 G. Bonanomi, F. Ippolito, G. Cesarano, B. Nanni, N. Lombardi, A. Rita, A. Saracino, F. Scala. "Biochar as plant growth promoter: better off alone or mixed with organic amendments?". *Frontiers in Plant Science* 8 (2017), 1570.

5 Abbreviazioni ed acronimi

BIPV: building integrate photo-voltaic

NPK : fertilizzante trivalente solubile a base di composti azotati, fosforo e potassio in rapporto 20-20-20

6 Allegati

Allegato 1 - Curriculum del gruppo di lavoro

Il gruppo di lavoro autore del report fa parte del dipartimento di Agraria di Portici dell'Università degli studi di Napoli "Federico II". Il gruppo scientifico vanta lunghe esperienze nel contesto dell'ecologia del fuoco, scienze delle piante sia agrarie che forestali, interazione pianta-suolo, ecologia delle comunità microbiche del suolo, biologia della conservazione e modellizzazione ecologica ed agronomica. Il gruppo di ricerca è caratterizzato da alti livelli di interdisciplinarietà come anche evidenziato dalle numerose pubblicazioni nel contesto della modellizzazione delle dinamiche di sistema con applicazione in diversi campi come:

- Modellizzazione delle dinamiche del fuoco.
- Modellizzazione dei processi di formazione dei pattern vegetali.
- Software tools e aspetti teorici.
- Sistemi di support decisionali.

A seguire il biosketch degli autori del report:

Fabrizio Carteni

Ricercatore a tempo determinato di tipo A, dottorato di ricerca in scienze agrarie ed agro alimentari presso il Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli Federico II. I maggiori interessi scientifici sono nel campo dell'eco-fisiologia e processi di sviluppo vegetale partecipando come autore e co-autore di più di 30 lavori scientifici in riviste "peer-reviewed" internazionali e diversi progetti a carattere nazionale e internazionale. Buona parte della sua produzione scientifica ed applicata si sviluppa sulla base di approcci con diversi sistemi di simulazione come System Dynamics, Individual-Based Models e sistemi Reaction-Diffusion. Il suo vasto interesse per la ricerca include anche lo studio dei meccanismi ecologici e biologici che regolano i processi di interazione tra pianta e suolo, i processi di sviluppo fenologici nei pattern spaziali di vegetazione, l'inibizione da self-DNA, la xilogenesi in ambienti mediterranei e boreali, dinamiche di crescita di popolazioni cellulari ed il ciclo cellulare e metabolismo dei lieviti.

Maurizio Zotti

Assegnista di ricerca presso il centro MUSA del Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli Federico II. Dottorato di ricerca nello stesso dipartimento, Micologo riconosciuto dal ministero della salute italiana. I suoi maggiori interessi sono nel campo dell'ecologia microbica, micologia ed interazione tra pianta e funghi saprotrofi, simbionti e patogeni ed ecologia generale. Ha un forte interesse multidisciplinare verso lo studio delle scienze biologiche e l'ecologia che lo hanno portato a essere autore e coautore di oltre 30 articoli scientifici pubblicati in riviste scientifiche peer-reviewed internazionali. Nel corso della sua formazione scientifica ha sviluppato forte interesse per le metodiche di analisi dati sulle comunità microbiologiche e di metabolomica ambientale tramite tecniche di analisi multivariata che vanno dagli agroecosistemi, agli ecosistemi naturali a base suolo e a base acqua sia in contesto marino che di acqua dolce.

Francesco Giannino

Professore Associato di Analisi Numerica presso il Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli Federico II. Dottorato di ricerca nello stesso dipartimento. I suoi interessi di ricerca vertono verso il disegno, sviluppo e analisi di modelli applicati alle scienze ambientali, alla biologia e all'agricoltura. Gli aspetti metodologici e computazionali delle sue attività di ricerca si concentrano su:

- Applicazione di sistemi matematici a scale teoriche e pratiche usando differenti tipologie di linguaggi di programmazione e software.
- Disegno di modelli, implementazione ed analisi in sistemi complessi usando diversi approcci per simulare processi biologici ed ecologici.

Collabora attivamente a svariati progetti di ricerca del quale è anche responsabile sia in contesto internazionale che nazionale e vanta diverse collaborazioni con gruppi di ricerca internazionali.

Giuliano Bonanomi

Professore Associato di Patologia Vegetale presso il Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli Federico II. Dottorato presso l'Università di Ancona, i suoi maggiori interessi di ricerca risiedono nello studio delle interazioni tra pianta e microbi, interazioni pianta-suolo, interazioni pianta-pianta in ambienti alpini e mediterranei. Altri interessi di ricerca importanti sono nella decomposizione della lettiera vegetale e gli effetti sulle dinamiche delle popolazioni vegetali, cicli di materia organica ed azoto. Nello studio degli agroecosistemi ha un forte interesse nel contesto della qualità del suolo, stanchezza dei suoli in coltivazioni intensive, soppressione delle fitopatologie con metodiche environmental-friendly e tramite l'uso di microbi benefici ed ammendanti organici come compost e biochar. Autore e co autore di più di 150 articoli scientifici su riviste "peer-reviewed" internazionali.

Riccardo Motti

Professore Associato di Botanica Sistemica presso il Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli Federico II. È stato direttore dell'orto botanico del dipartimento e i suoi interessi di ricerca si sviluppano sullo studio della commestibilità ed usi medici delle piante in contesto di etnobotanica, ha inoltre un interesse nello studio delle piante bio-deteriogene nelle comunità vegetali dei siti archeologici e di interesse storico. Autore di differenti studi sulle dinamiche di popolazioni di piante aliene nel contesto geografico della regione Campania, ha un curriculum scientifico che include più di 40 lavori in riviste scientifiche internazionali "Peer-reviewed" ed ha un'intensa attività di divulgatore scientifico nel contesto della botanica.

Stefano Mazzoleni

Professore Ordinario di Botanica Applicata presso il Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli Federico II. Dottorato di ricerca presso l'Università di Aberdeen. Studioso di modelli dinamici dei sistemi con applicazioni in svariati campi di interesse ambientale, ma anche industriale. Autore e coautore di più di 160 articoli scientifici in riviste "peer reviewed" internazionali, ha sviluppato esperienza nel contesto dello studio della tossicità della materia organica. Direttore del centro "Musa" musei delle scienze agrarie della stessa università. Coordinatore di diversi progetti scientifici sia nazionali che internazionali che avevano come maggiore interesse lo studio e l'applicazione di modellistica dei sistemi biologici e dinamiche ecologiche. Dal 2017 è membro della Commissione nazionale per la previsione e la prevenzione dei grandi rischi della Presidenza del Consiglio dei Ministri della Repubblica Italiana.

Allegato 2 – Report Sensoristica IoT

Allegato 2_MONITORAGGIO SERRE ESC-FLYSENSE-V1.00.pdf