



Ricerca di Sistema elettrico

Monitoraggio sperimentale di una prima configurazione del sistema di poligenerazione con integrazione di una caldaia a biomassa

Evelia Schettini, Fabiana Convertino, Giuliano Vox

MONITORAGGIO SPERIMENTALE DI UNA PRIMA CONFIGURAZIONE DEL SISTEMA DI POLIGENERAZIONE CON INTEGRAZIONE DI UNA CALDAIA A BIOMASSA

Evelia Schettini, Fabiana Convertino, Giuliano Vox

Università degli Studi di Bari Aldo Moro
Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT)
Via Amendola 165/A
70126 Bari

Con il contributo del prof. Scarascia Mugnozza Giacomo (Università degli Studi di Bari Aldo Moro)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: 1.5 "Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti"

Work package: 3 "Componenti e impianti innovativi per incrementare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici"

Linea di attività: LA3.35: Monitoraggio sperimentale di una prima configurazione del sistema di poligenerazione con integrazione di una caldaia a biomassa

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Ing. Biagio Di Pietra, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Condizionamento climatico nella filiera agro-alimentare con sistemi innovativi di poligenerazione energetica"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Lorena Giordano

Responsabile scientifico Università degli Studi di Bari Aldo Moro: Prof.ssa Ing. Evelia Schettini



Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	6
2.1 MONITORAGGIO DI UNA CONFIGURAZIONE DEL SISTEMA DI POLIGENERAZIONE IN CONDIZIONI DI “BASE”	6
2.2 SPERIMENTAZIONE SUI SISTEMI DI DISTRIBUZIONE IN SERRA	14
2.2.1 <i>La sperimentazione nel 2020</i>	14
2.2.1.1 Specifiche del sistema di distribuzione nell’area di coltivazione.....	16
2.2.2 <i>Prova sperimentale nel periodo estivo: solar cooling integrato con caldaia a biomassa per il raffrescamento della serra</i>	26
2.2.2.1 Parametri climatici esterni, microclima, monitoraggio	32
2.2.3 <i>Prova sperimentale nel periodo invernale: collettori solari e pompa di calore aria-acqua per il riscaldamento della serra</i>	39
2.2.3.1 Parametri climatici esterni, microclima, monitoraggio	47
2.2.4 <i>Parametri caratteristici dell’impianto</i>	50
2.3 DEFINIZIONE DI SISTEMI PASSIVI DI RISPARMIO ENERGETICO	52
2.4 PUBBLICAZIONI DEL GRUPPO DI RICERCA	54
3 CONCLUSIONI	54
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	55
5 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	56
APPENDICE	58

Sommario

Le attività del gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro riguardano la sperimentazione di un sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili per il condizionamento climatico localizzato all'interno di una serra. Nel 2020, il sistema costituito da un impianto di solar cooling è stato integrato con una caldaia a biomassa e una pompa di calore aria-acqua.

Con l'obiettivo di ottenere un microclima ottimale per la crescita e lo sviluppo delle piante sono stati progettati e testati tre diversi sistemi di distribuzione del freddo/caldo in prossimità delle piante. Il primo sistema è caratterizzato da tubi interrati nel substrato di coltivazione, il secondo sistema da tubi poggiati sul substrato di coltivazione, e il terzo sistema, detto piastra e tubo, è costituito da piastre metalliche raffreddate/riscaldare da tubi in acciaio e poste nella zona aerea delle piante. I sistemi a tubi interrati e a tubi poggiati raffreddano/riscaldano il substrato di coltivazione; il sistema piastra e tubo raffredda/riscalda l'aria in prossimità delle piante.

Sono state testate due configurazioni di base: nel periodo estivo la serra è stata raffrescata mediante l'impianto di solar cooling integrato con caldaia a biomassa; nel periodo invernale la serra è stata riscaldata utilizzando i collettori solari integrati con la pompa di calore aria-acqua. La crescita delle piante è stata monitorata in funzione del sistema di condizionamento climatico localizzato. Lo sviluppo delle piante raffrescate/riscaldare è stato confrontato con quello di piante coltivate in condizioni di assenza di raffrescamento/riscaldamento localizzato (controllo).

Le conseguenze dell'utilizzo di tali sistemi, sulla temperatura del substrato e dell'aria della zona di coltivazione, sono risultate evidenti. La prova sperimentale estiva effettuata ha messo in evidenza che il sistema di distribuzione del freddo localizzato con tubo poggiato sul terreno ha contribuito al massimo raccolto cumulato rispetto agli altri sistemi. La prova sperimentale invernale effettuata ha messo in evidenza che il sistema di distribuzione del caldo localizzato con tubi interrati ha contribuito al massimo raccolto cumulato rispetto agli altri sistemi.

1 Introduzione

Il sistema di poligenerazione è applicato ad un edificio serra. Tale tipologia costruttiva ha raggiunto oggi un elevato livello di sofisticazione impiantistica legata alla crescente domanda di prodotti salubri e di qualità. In quest'ottica, il controllo climatico in serra riveste una importanza fondamentale (Vox et al., 2010).

Recentemente, inoltre, si sta diffondendo la pratica di realizzare ambienti protetti per la coltivazione in ambito urbano (Muñoz-Liesa et al., 2021; Benis et al., 2018; Nadal et al., 2017). L'ambiente di coltivazione/serra diviene parte integrante dell'edificio e deve essere progettato e gestito secondo criteri di efficientamento energetico e di utilizzo di fonti rinnovabili (Toboso Chavero et al., 2018). Esempi di agricoltura protetta in ambito urbano sono diffusi in USA ed in UK. Molti progetti sono stati realizzati nell'ottica del recupero di edifici dismessi, in precedenza adibiti anche ad attività industriali.

Il volume protetto della serra presenta elevati fabbisogni energetici in termini di riscaldamento e raffreddamento (Ahamed et al., 2019). La copertura trasparente, caratterizzata da uno spessore variabile da 0.2 mm a 6 mm in funzione del materiale utilizzato, film plastico o vetro, ha una limitata resistenza termica. Questo causa nei periodi freddi un'elevata richiesta di energia per il riscaldamento, che è soddisfatta nella maggior parte dei casi mediante l'uso di fonti non rinnovabili, quali gasolio, GPL o gas metano. Il fabbisogno termico per il riscaldamento può raggiungere 150 Wm^{-2} , riferito alla superficie unitaria di base, in presenza di coltivazioni pregiate ad alto valore aggiunto.

Nei periodi caldi il controllo del microclima è di norma realizzato mediante sistemi evaporativi, che utilizzano il calore latente per raffreddare l'aria interna, mediante nebulizzatori, filtri evaporativi e ventilatori. Tali applicazioni richiedono l'uso di energia elettrica e di acqua, risorsa da tutelare nei periodi caldi. La necessità di consentire l'ingresso della radiazione solare per garantire lo sviluppo delle piante comporta un elevato fabbisogno energetico per il raffrescamento. Si può stimare una richiesta di energia per il raffrescamento, nelle ore estive più calde, pari a 370 Wm^{-2} , riferita alla superficie di base coperta, accompagnata da un consumo di acqua del sistema evaporativo di $0.64 \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

Queste considerazioni spiegano la ragione per cui un settore energivoro come quello delle produzioni in serra sia un candidato ideale all'applicazione di sistemi di poligenerazione da fonti rinnovabili (Russo et al., 2014; Vox et al., 2008; Cuce et al., 2016). Tale idea è supportata anche dalla disponibilità di fonti rinnovabili in ambito rurale, in considerazione della presenza di spazi per l'uso di energia solare e geotermica nonché per la disponibilità di biomassa. L'energia solare captata con collettori solari, integrata con caldaia a biomassa, può essere utilizzata per il riscaldamento invernale come per alimentare i chiller ad assorbimento per il raffrescamento estivo. I moduli fotovoltaici possono alimentare tutti i sistemi elettrici e, in particolare, le pompe di calore, anche geotermiche, sia per il raffrescamento che per il riscaldamento.

Le fonti rinnovabili si candidano, quindi, a sostituire le fonti energetiche non rinnovabili attualmente utilizzate, quali il gasolio, il GPL e l'elettricità distribuita dalla rete elettrica, ancora in larga parte prodotta da fonti non rinnovabili.

Un aspetto rilevante nella ricerca riguarda l'utilizzo di sistemi di distribuzione dell'energia termica, calda e fredda, in modalità localizzata (Teitel et al., 1999). Test sperimentali hanno dimostrato che il volume da condizionare può essere ridotto a meno del 20% di quello iniziale con l'utilizzo dei sistemi localizzati, ma tali tecniche vanno perfezionate e adattate alle diverse tipologie di coltivazione.

L'utilizzo di sistemi di condizionamento localizzato può richiedere l'introduzione di modalità di trasmissione dell'energia termica mai sperimentate in ambito agricolo, per esempio nel caso dei sistemi a superfici radiative. In questo caso l'aria può subire un condizionamento relativamente limitato, mentre la pianta può essere molto sensibile allo scambio termico quando esposta alle superfici radianti a bassa/alta temperatura. In tal caso un sensore realistico di misura della prestazione del sistema di condizionamento climatico è rappresentato dalla pianta stessa, che funge da biosensore. L'output del sensore è rappresentato dallo sviluppo e dalla produttività della pianta, che vanno analizzati secondo le tecniche statistiche applicate alle bio-produzioni.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Le attività svolte dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro nell'ambito della linea di attività LA 3.35 "Monitoraggio sperimentale di una prima configurazione del sistema di poligenerazione con integrazione di una caldaia a biomassa" riguardano:

- il monitoraggio di una configurazione del sistema di poligenerazione in condizioni di "base", in quanto l'impianto di solar cooling è stato integrato con una caldaia a biomassa e una pompa di calore aria-acqua (paragrafo 2.1);
- la sperimentazione sui tre diversi sistemi di distribuzione del freddo nella serra raffrescata dall'impianto di solar cooling e dalla caldaia a biomassa, eseguendo una prova sperimentale nel periodo estivo (paragrafo 2.2.2);
- la sperimentazione sui sistemi di distribuzione del caldo nella serra riscaldata dall'impianto di solar heating e dalla pompa di calore aria-acqua, eseguendo una prova sperimentale nel periodo invernale (paragrafo 2.2.3);
- la definizione di sistemi passivi di risparmio energetico (paragrafo 2.3).

Le attività svolte hanno consentito di elaborare una pubblicazione (paragrafo 2.4).

2.1 Monitoraggio di una configurazione del sistema di poligenerazione in condizioni di "base"

Presso il Centro sperimentale "P. Martucci" dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro sono svolte tutte le attività sperimentali del gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali dell'Università di Bari. Il centro si trova in località Valenzano (BA), latitudine 41° 01' N, longitudine 16° 54' E.

La serra utilizzata per la sperimentazione ha una struttura portante in acciaio e una copertura in film plastico in Etilene-Vinil-Acetato (EVA). Geometricamente la serra è caratterizzata da lunghezza pari a 30.00 m, larghezza pari a 10.00 m, altezza di colmo pari a 4.45 m e altezza di gronda pari a 2.45 m. L'asse longitudinale della serra è orientato in direzione nord-sud.

Lungo le pareti laterali e in corrispondenza del colmo vi sono delle aperture per consentire la ventilazione naturale.

Il film di copertura in EVA (Patilite E, P.A.T.I., San Zenone degli Ezzelini, Treviso, Italia) ha uno spessore di 0.20 mm. Le caratteristiche radiometriche del film di copertura sono: trasmittività totale solare pari al 74.9%, trasmittività diretta solare pari al 40.7%, trasmittività nell'infrarosso (IR) lungo (LWIR-Long Wave Infrared) pari al 10.6%, quindi con effetto serra pari a 89.4%.

La serra è utilizzata per coltivazioni fuori suolo. I vasi rettangolari (1.00 m x 0.40 m x 0.40 m) sono disposti trasversalmente all'asse longitudinale della serra. Sono presenti 8 file di vasi, ogni fila è caratterizzata da 6 vasi. L'irrigazione è fornita alle piante mediante un sistema di irrigazione puntuale a goccia.

Durante il 2020 il sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili presente nel campo sperimentale (Figura 1) è stato integrato con una caldaia a biomassa e una pompa di calore aria-acqua.

La caldaia a biomassa (Figura 2) integra i collettori solari sia per alimentare l'assorbitore per il raffrescamento della serra nel periodo estivo sia per il riscaldamento della serra nel periodo invernale.

La pompa di calore aria-acqua (Figura 3) integra gli altri sistemi inviando acqua calda o fredda in un serbatoio posizionato all'interno della serra (Figura 4) e dedicato al riscaldamento o al raffrescamento della serra in base alla stagione. La pompa di calore aria-acqua può essere utilizzata anche per simulare il carico termico di una qualsiasi attività differente da quella della serra.

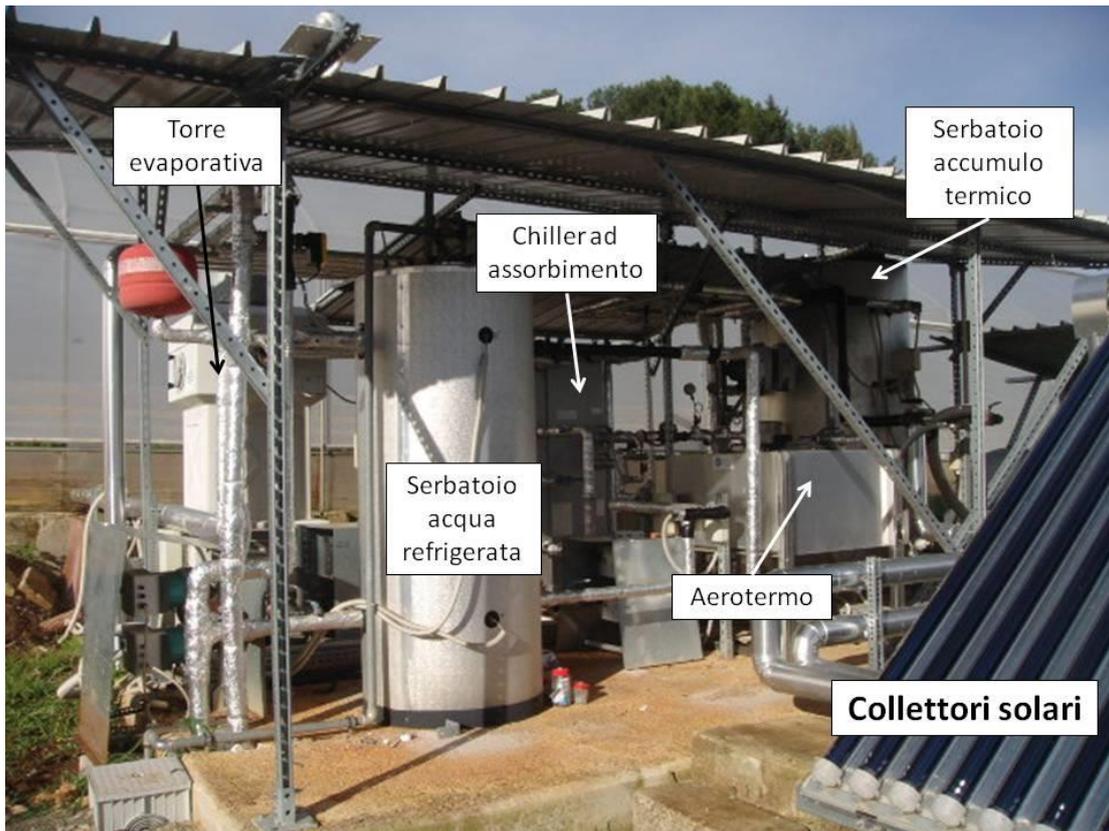


Figura 1. Impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.



Figura 2. Caldaia a biomassa presso l'Università di Bari.



Figura 3. Pompa di calore aria-acqua presso l'Università di Bari.



Figura 4. Serbatoio ausiliario da 1000 l all'interno della serra alimentato dall'impianto solare e dalla pompa di calore aria-acqua presso l'Università di Bari.

Il sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili è, dunque, attualmente composto da un sottosistema solare, da un sottosistema refrigerante, dalla caldaia a biomassa e dalla pompa di calore. Questi elementi da soli o integrati tra loro producono acqua fredda o calda in funzione delle necessità termiche delle coltivazioni in atto nella serra e della stagione di coltivazione.

Il sottosistema solare serve per la produzione di acqua calda. Le componenti principali di questo sottosistema sono: il campo solare, il serbatoio di accumulo termico (serbatoio caldo) e il dry cooler (aeroterma) per lo smaltimento del calore in eccesso. L'acqua calda, prodotta dal campo solare, è inviata al serbatoio di accumulo termico: nel periodo estivo l'acqua calda è utilizzata per mettere in funzione il chiller ad assorbimento mentre nel periodo invernale è utilizzata tal quale.

Il sottosistema frigorifero è composto dal chiller ad assorbimento, dalla torre evaporativa e dal serbatoio per l'accumulo di acqua fredda (serbatoio freddo). La capacità refrigerante del chiller ad assorbimento è impiegata per raffreddare il fluido refrigerante utilizzato per il condizionamento estivo della serra.

Il sottosistema solare e il sottosistema frigorifero sono stati ampiamente descritti nel Report RdS/PTR2019/054 dal titolo "Condizionamento climatico nella filiera agro-alimentare con sistemi innovativi di poligenerazione energetica".

Il generatore di calore per biomasse legnose della Serie CS 30 kW, Classe 5 - EN303-5:2012, è stato installato nel campo sperimentale di Valenzano nell'estate 2020 (Figura 5). La caldaia a biomassa installata, prodotta dalla Ditta D'Alessandro Termomeccanica (Miglianico, CH, Italia), ha le seguenti caratteristiche tecniche:

- potenza nominale pari a 30.7 kW
- potenza ridotta pari a 9.21 kW
- potenza al focolare pari a 33.7 kW
- rendimento pari al 91.2%
- pressione massima di esercizio pari a 3 bar
- temperatura massima di esercizio pari a 90 °C
- temperatura di regolazione compresa tra un valore minimo pari a 65°C e un valore massimo pari a 85°C
- temperatura minima di ritorno dell'acqua in caldaia pari a 50°C
- temperatura minima di attivazione contatto pompa pari a 40°C.

La tramoggia ha un volume di 140 dm³. Il volume della camera di combustione è pari a 70 dm³. Sono presenti 110 l di acqua nella caldaia. Il combustibile consigliato da utilizzare è del tipo pellet di legna in classe A1 secondo EN17225-2 - Diametro Ø6mm - L_{max} ≤ 40mm.

Il funzionamento della caldaia a biomassa è descritto in Figura 6. Il pellet scende per gravità dalla tramoggia nella coclea superiore e da questa viene spinto nella valvola stellare per arrivare nella coclea di alimentazione del bruciatore. La valvola stellare ha la funzione di impedire il ritorno dei fumi e di eventuali fiamme interrompendo la continuità del combustibile tra le due coclee. La velocità di rotazione della coclea determina la corretta alimentazione del pozzetto focolare. Il pellet viene bruciato con l'immissione di aria primaria e secondaria. Il calore sviluppato nella camera di combustione viene ceduto alle intercapedini piene d'acqua attraverso le pareti in acciaio del generatore. I fumi caldi, risalendo dalla camera di combustione, passano per il tubo centrale e, tramite la cavità dello sportello superiore, attraversano il fascio tubiero fino all'espulsione nel raccordo fumi posteriore. La canna fumaria ha un diametro di 180 mm (Figura 7). La corretta progettazione del sistema di evacuazione dei fumi è garanzia di un corretto ed efficiente funzionamento della caldaia a biomassa.

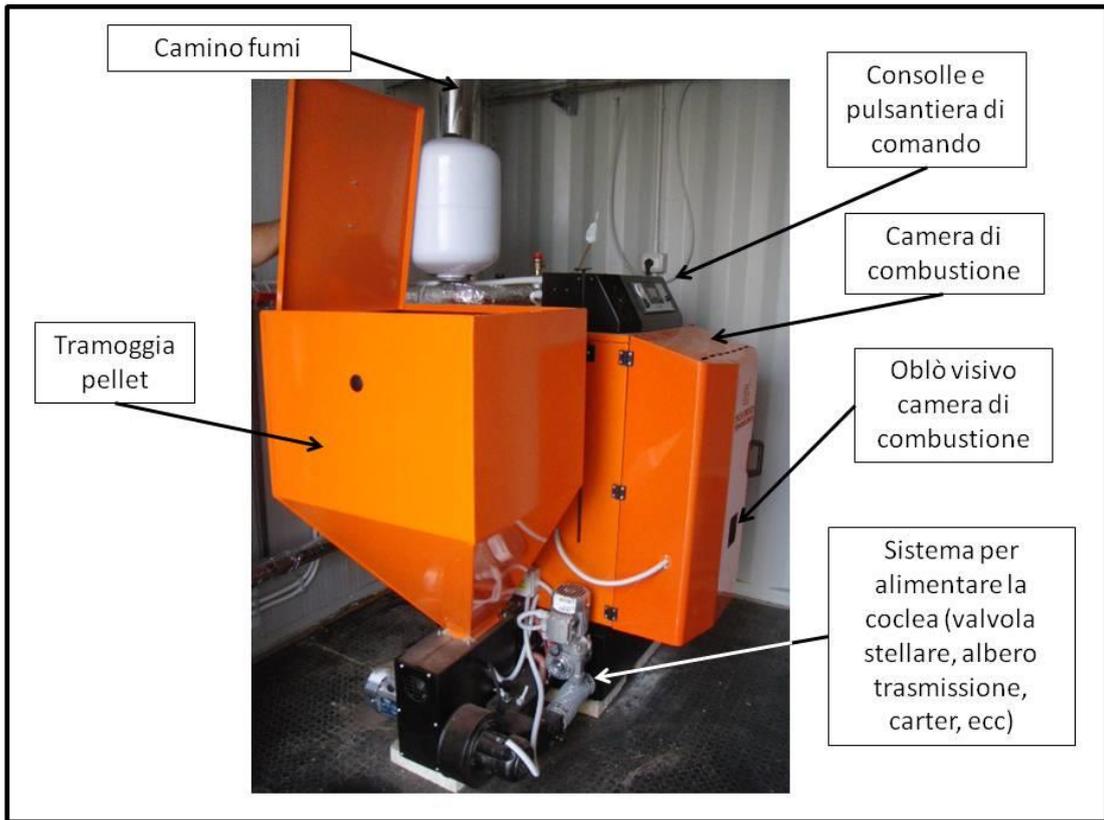


Figura 5. Componenti principali della caldaia a biomassa CS30 presso l'Università di Bari.

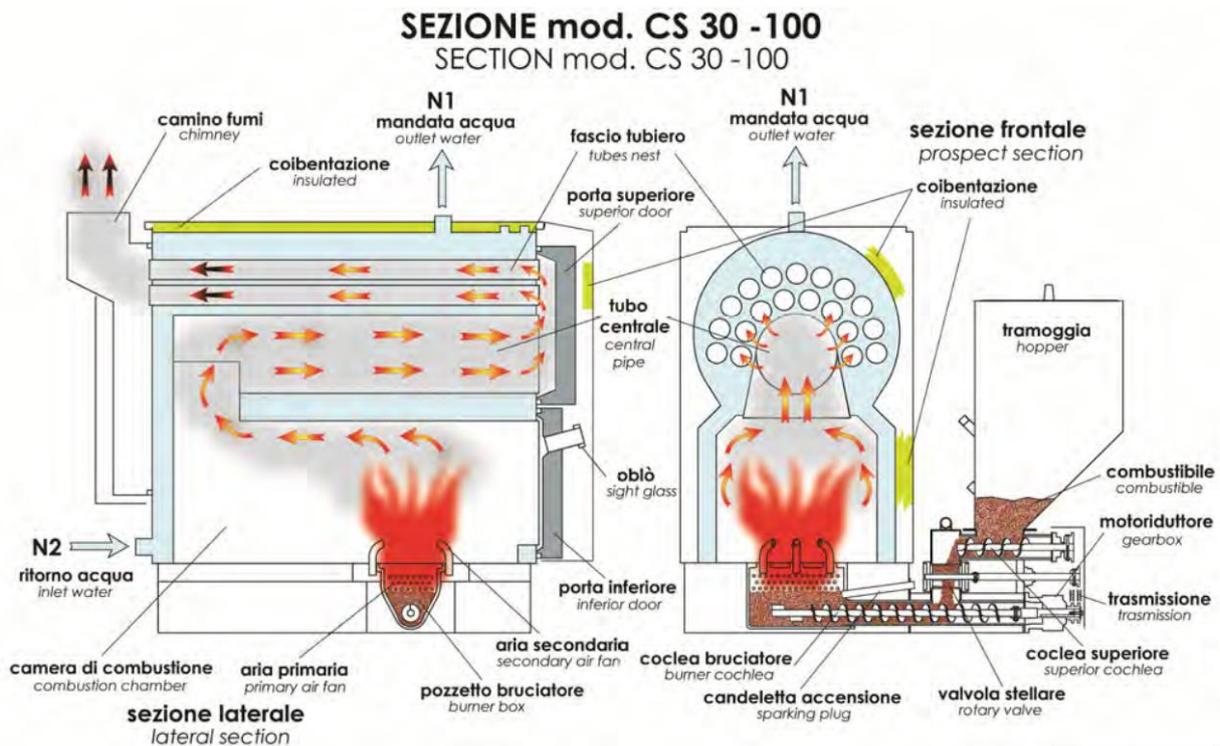


Figura 6. Schema di funzionamento della caldaia a biomassa CS30 prodotta dalla Ditta D'Alessandro Termomeccanica (Miglianico, CH, Italia).



Figura 7. Canna fumaria della caldaia a biomassa CS30 presso l'Università di Bari.

La caldaia a biomassa è dotata di una centralina (Figura 8) con il compito di gestire sia la caldaia, nelle varie fasi di funzionamento, sia tutti i dispositivi di sicurezza installati nel rispetto delle normative sulla sicurezza. L'interfaccia di controllo e gestione del sistema di comando consiste in un pannello composto di un display LCD multifunzione e di n. 6 pulsanti, mediante i quali è possibile controllare e modificare le impostazioni dei parametri di regolazione. È possibile scegliere il programma di gestione temporizzata della caldaia selezionandone i tempi di funzionamento (giornaliero, settimanale, fine settimana) e le fasce orarie di programmazione.

L'acqua calda prodotta dalla caldaia a biomassa viene raccolta nel serbatoio di accumulo termico utilizzato per immagazzinare l'acqua calda proveniente dai collettori solari. Il serbatoio (model PVR-15/742, Pacetti, Ferrara, Italia) ha una capienza di 2000 l (Figura 1).

Nel periodo invernale, per evitare che acqua troppo calda, prodotta dalla caldaia a biomassa, arrivi in prossimità delle piante è stata inserita una valvola di regolazione a tre vie Caleffi 636 con servomotore (Figura 9). La valvola di regolazione a tre vie è stata inserita per il controllo della temperatura attraverso la miscelazione del fluido del circuito primario con quello di ritorno dall'impianto.



FUNZIONE	DESCRIZIONE	TASTO
ESC	Funzione ESC (uscita) da un menu o da un sottomenu	P1
ON/OFF	Funzione Accensione/Spengimento premendo il tasto per 3 secondi, fino al segnale acustico	P2
SBLOCCO	Funzione di Reset Allarmi del sistema premendo il tasto per 3 secondi, fino al segnale acustico	P2
MENU	Funzione di ingresso nel menu e nei sottomenu	P3
MODIFICA	Ingresso in modifica nei menu	
SET	Salvataggio dati in menu	P4
MODIFICA VALORI GRANDEZZE MENU	Quando in Menu in modalità modifica i tasti cambiano i valori delle grandezze dei menu e dei sottomenu	
SCORRIMENTO MENU E SOTTOMENU	In modalità menu e visualizzazione grandezze, scorrimento i menu ed i sottomenu.	P6
BLOCCA TASTI	Blocca/Sblocca i tasti premuto per 3 secondi fino al segnale acustico, (con tastiera bloccata appare il simbolo di una chiave in alto a destra)	P5
ATTIVA PROGRAMMA CRONO	In menu Crono -> Programma attiva la programmazione selezionata	
Ventola aria primaria	Spia Accesa: Ventola Aria primaria attiva	L1
Ventola aria secondaria	Spia Accesa: Ventola Aria secondaria attiva	L2
Ventola aspirazione	Spia Accesa: Ventola Aspirazione attiva	L3
Coclea On	Spia Accesa: Coclea attiva	L4
Accenditore	Spia Accesa: Accenditore attivo	L5
Estrattore ceneri	Spia Accesa: Estrattore ceneri attivo	L6
Consenso orologio	Spia Accesa: Contatto consenso orologio chiuso	L7
Termostato ambiente	Spia Accesa: Contatto termostato ambiente chiuso	L8
Manuale	Spia Accesa: Funzionamento manuale selezionato	L9

Figura 8. Consolle e pulsantiera di comando della caldaia a biomassa CS30 presso l'Università di Bari.

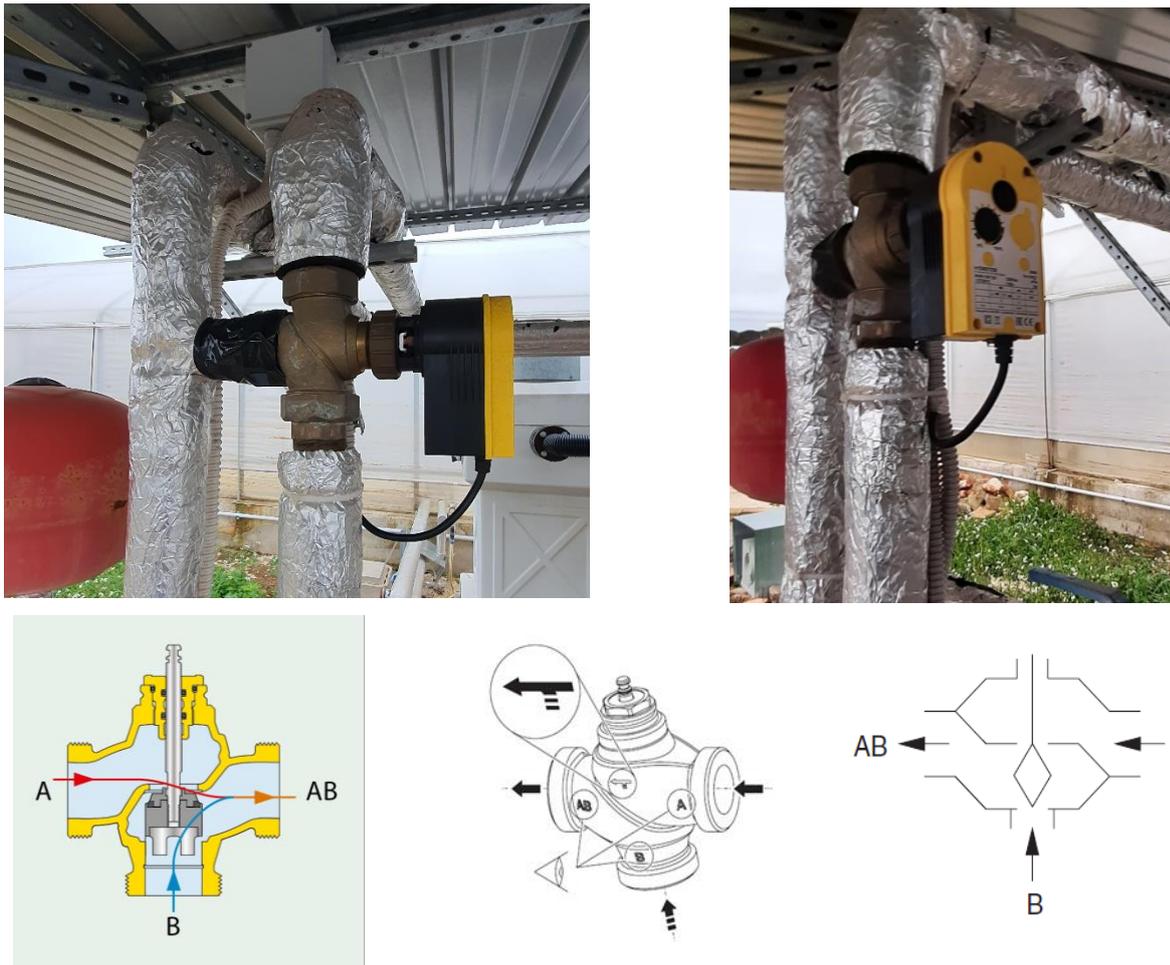


Figura 9. Valvola di regolazione a tre vie Caleffi 636 con servomotore.

Nel periodo estivo l'acqua calda stoccata nel serbatoio di accumulo termico viene usata per alimentare il chiller ad assorbimento a singolo effetto (model WFC SC5, Yazaki, Shizuoka-ken, Japan; con capacità frigorifera pari a 17.6 kW) che utilizza una soluzione H₂O/LiBr. L'acqua raffreddata viene stoccata nel serbatoio dell'acqua refrigerata per poi essere inviata in serra. Il serbatoio dell'acqua refrigerata (model VT-V6GCA, Pacetti, Ferrara, Italia) ha una capienza di 500 l (Figura 1).

La pompa di calore aria-acqua inverter reversibile da esterno della serie ANLI 101 HX è stata installata nel campo sperimentale di Valenzano nell'autunno 2020 (Figura 3). È stata prodotta dalla ditta AERMEC S.p.A. (Bevilacqua, VR, Italia). La pompa di calore aria-acqua è caratterizzata da una potenza frigorifera pari a 28.9 kW e una potenza termica pari a 31.5 kW. Produce acqua calda/fredda necessaria per il riscaldamento/raffrescamento della serra. Durante la stagione estiva può lavorare a pieno carico fino a una temperatura dell'aria esterna pari a 42°C.

La pompa di calore aria-acqua ha le caratteristiche tecniche descritte in Figura 10.

ANLI - HX

Taglia	101	
Prestazioni in raffreddamento 12 °C / 7 °C (1)		
Potenza frigorifera	29,3	kW
Potenza assorbita	11,9	kW
Corrente assorbita totale a freddo	18	A
EER	2,47	
Portata d'acqua	4985	l/h
Prevenza utile	175	kPa
Prestazioni in riscaldamento 40 °C / 45 °C (2)		
Potenza termica	31,2	kW
Potenza assorbita	11,5	kW
Corrente assorbita totale a caldo	17	A
COP	2,70	
Portata d'acqua	5457	l/h
Prevenza utile	158	kPa
Prestazioni in raffreddamento 23 °C / 18 °C (3)		
Potenza frigorifera	42,6	kW
Potenza assorbita	13,8	kW
EER	3,08	
Portata d'acqua	7301	l/h
Prevenza utile	81	kPa
Prestazioni in riscaldamento 30 °C / 35 °C (4)		
Potenza termica	33,0	kW
Potenza assorbita	9,9	kW
Corrente assorbita totale a caldo	15	A
COP	3,33	
Portata d'acqua	5762	l/h
Prevenza utile	147	kPa

Figura 10. Caratteristiche tecniche della pompa di calore aria-acqua ANLI 101 HX installata presso l'Università di Bari (AERMEC S.p.A., Bevilacqua, VR, Italia).

La pompa di calore aria-acqua ha un pannello comandi che consente una rapida impostazione dei parametri di funzionamento della macchina e la loro visualizzazione (Figura 11). Il display è costituito da quattro cifre e diversi led per la segnalazione del tipo di funzionamento, la visualizzazione dei parametri impostati e degli eventuali allarmi intervenuti.

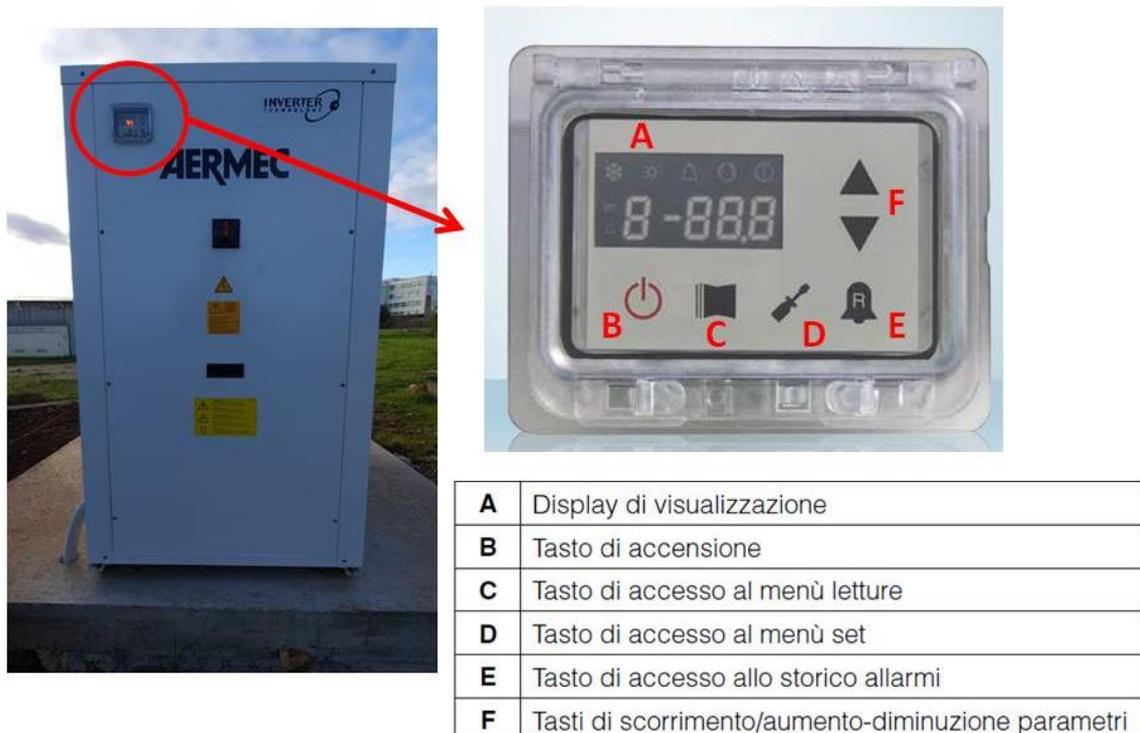


Figura 11. Pannello comandi della pompa di calore aria-acqua presso l'Università di Bari.

L'acqua calda/fredda prodotta dalla pompa di calore aria-acqua è immagazzinata nel serbatoio ausiliario presente all'interno della serra che ha una capacità di 1000 l (Figura 4).

2.2 Sperimentazione sui sistemi di distribuzione in serra

2.2.1 La sperimentazione nel 2020

La sperimentazione svolta dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari durante il 2020 riguarda il monitoraggio e la verifica di un sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili per la produzione di freddo (nel periodo estivo) e di caldo (nel periodo invernale) e la sua distribuzione localizzata all'interno di una serra. L'energia di raffreddamento o riscaldamento prodotta dal sistema di poligenerazione da fonti rinnovabili viene distribuita attraverso la circolazione di acqua fredda o calda in tubazioni consentendo il raffreddamento o il riscaldamento localizzato.

L'utilizzo di sistemi di distribuzione dell'acqua, fredda o calda, in modalità localizzata consente un notevole risparmio rispetto al raffreddamento o al riscaldamento dell'intero volume della serra. Studi sperimentali hanno dimostrato che è possibile ridurre il volume da condizionare, ma è importante perfezionare il sistema di distribuzione localizzato anche in base alla coltivazione in atto nel periodo caldo o freddo.

Nel periodo estivo 2020 è stato utilizzato l'impianto di solar cooling integrato con la caldaia a biomassa per il raffreddamento della serra (Figura 12). La logica di funzionamento di questa configurazione è mostrata nella Figura 13. L'accensione della caldaia a biomassa è stata programmata ogni giorno dalle 6.00 alle 8.00 (ora solare) nel caso in cui la temperatura dell'aria interna della serra sia superiore a 20°C. Se in serra la temperatura dell'aria supera i 24°C alle 6 del mattino (ora solare), sicuramente la temperatura dell'aria all'interno della serra nelle ore successive sarà tale da necessitare raffreddamento. In futuro, l'accensione della caldaia a biomassa potrebbe essere connessa alle previsioni meteo.

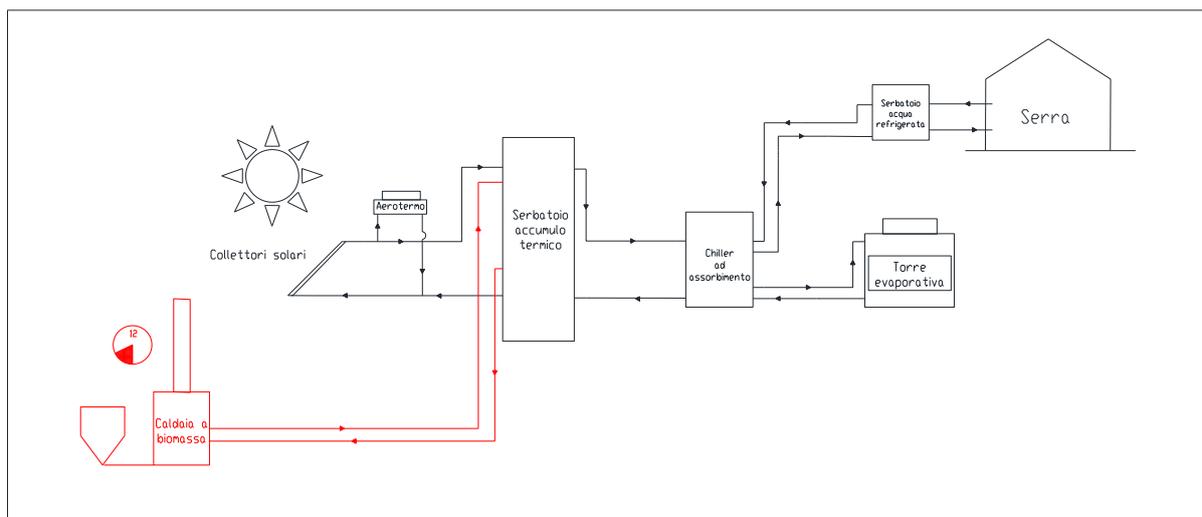


Figura 12. Schema dell'impianto di solar cooling integrato con la caldaia a biomassa per il raffreddamento della serra presso l'Università di Bari.

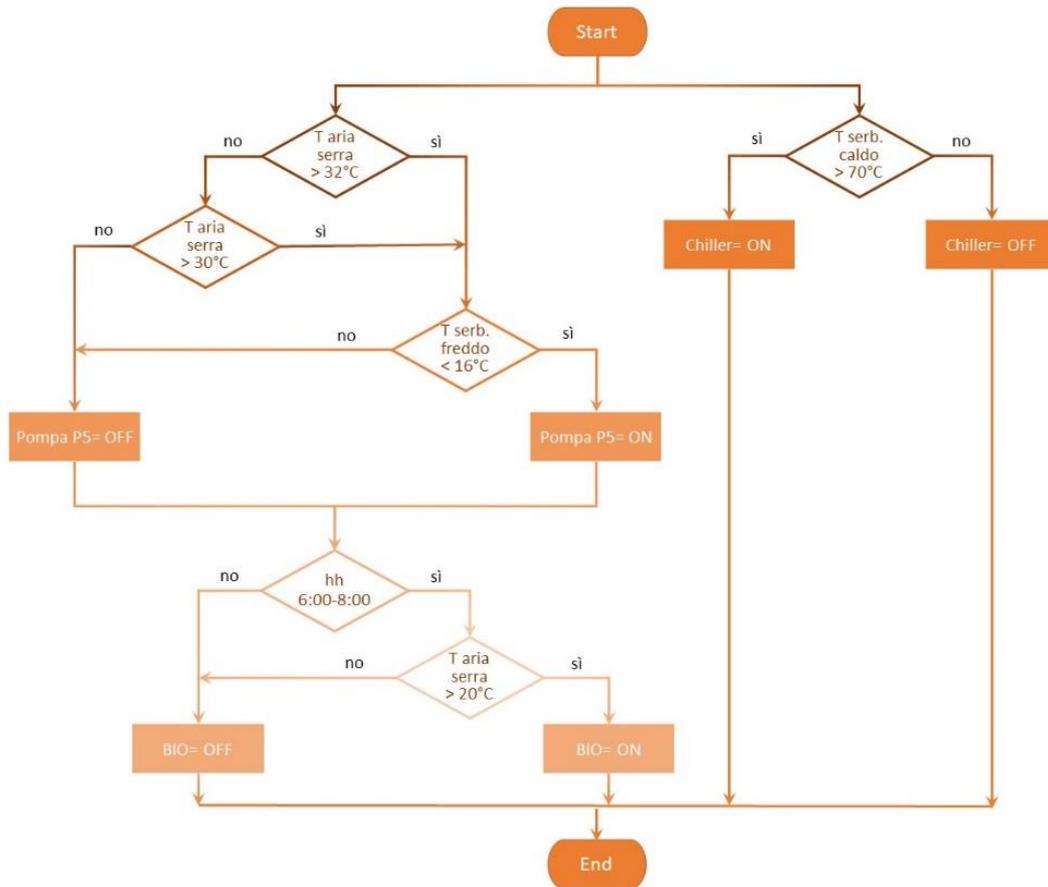


Figura 13. Configurazione di base con utilizzo dell'impianto di solar cooling e della caldaia a biomassa (BIO) per il raffrescamento estivo 2020.

La caldaia a biomassa riscalda l'acqua e questa è inviata al serbatoio di accumulo termico (Figura 12); la temperatura dell'acqua all'ingresso del serbatoio è 75 °C. Il sottosistema frigorifero dell'impianto di solar cooling viene attivato quando la temperatura dell'acqua del serbatoio di accumulo termico è superiore a 70°C. Dopo le ore 8.00 (ora solare), la caldaia a biomassa si spegne e saranno i collettori solari a fornire l'acqua calda al serbatoio di accumulo termico.

L'acqua fredda inizia a circolare nelle tubazioni per il raffrescamento localizzato (nella Figura 13 è indicato Pompa 5= ON) quando la temperatura dell'aria della serra supera il valore fissato di 30-32 °C. L'erogazione dell'energia di raffrescamento dal serbatoio freddo avviene quando l'acqua contenuta nel serbatoio è sufficientemente fredda, cioè minore di 16°C.

Nel periodo invernale 2020 il riscaldamento della serra è stato effettuato utilizzando i collettori solari e la pompa di calore aria-acqua (Figura 14). La logica di funzionamento di questa configurazione è mostrata nella Figura 15. I collettori solari, quando la radiazione solare è superiore a 300 Wm⁻², forniscono acqua calda al serbatoio di accumulo termico da 2000 l. L'acqua calda prodotta dai collettori solari fluisce dal serbatoio di accumulo termico esterno verso il serbatoio ausiliario da 1000 l all'interno della serra.

La pompa di calore aria-acqua funziona in automatico e in continuo integrando il serbatoio ausiliario d'acqua calda presente all'interno della serra al fine di mantenere l'acqua del serbatoio alla temperatura di 40°C.

L'acqua calda inizia a circolare nelle tubazioni per il riscaldamento localizzato (nella Figura 15 è indicato Pompa 5= ON) quando la temperatura dell'aria della serra è inferiore a 15-16°C.

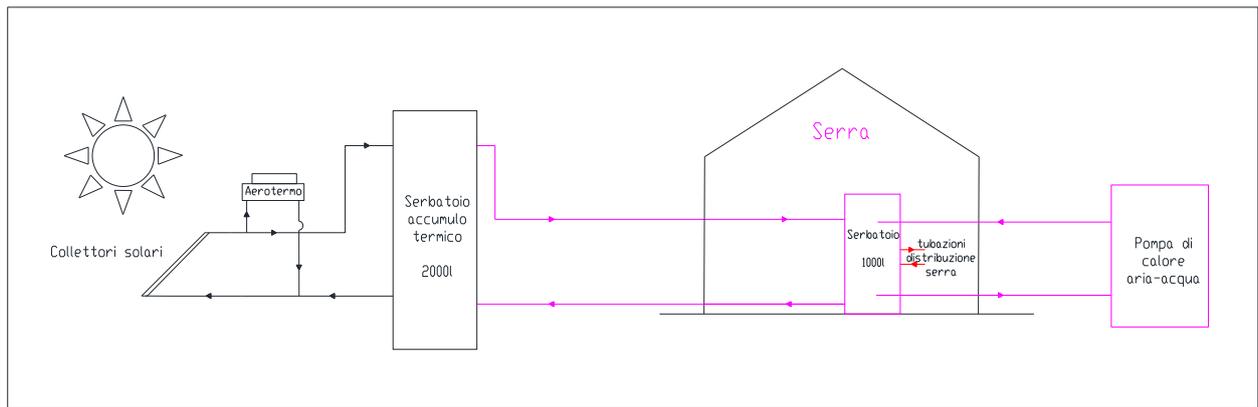


Figura 14. Schema dell'impianto che utilizza la pompa di calore aria-acqua e i collettori solari per il riscaldamento della serra presso l'Università di Bari.

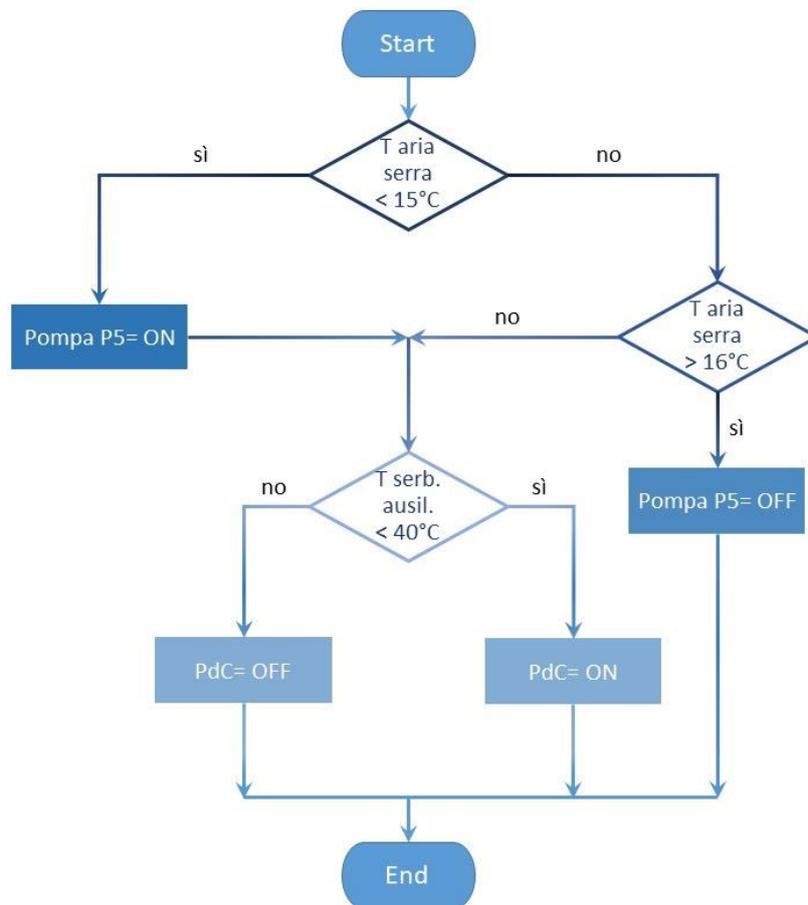


Figura 15. Configurazione di base con utilizzo dei collettori solari e della pompa di calore aria-acqua (PdC) per il riscaldamento invernale 2020.

2.2.1.1 Specifiche del sistema di distribuzione nell'area di coltivazione

All'interno della serra è posizionato un sistema di tubazioni principali di mandata e di ritorno connesse in estate al serbatoio di acqua refrigerata (Figura 16) e in inverno al serbatoio presente all'interno della serra (Figura 17).

Per il raffrescamento, nel periodo estivo, le tubazioni principali di mandata collegano il serbatoio dell'acqua refrigerata al sistema di distribuzione del freddo localizzato e le tubazioni principali di ritorno trasportano l'acqua, ormai non più fredda, dall'interno all'esterno della serra (Figura 16).

Per il riscaldamento, nel periodo invernale, le tubazioni principali di mandata portano l'acqua calda dal serbatoio di accumulo termico al serbatoio ausiliario interno alla serra (Figura 18). Quando la temperatura dell'acqua presente nel serbatoio ausiliario scende sotto i 40°C, la pompa di calore aria-acqua si attiva facendo confluire nello stesso serbatoio acqua calda. Dal serbatoio interno alla serra si dirama il sistema di distribuzione del caldo localizzato. Le tubazioni principali di ritorno trasportano l'acqua non più calda al serbatoio interno alla serra e da questo all'esterno della serra, sia verso il serbatoio di accumulo termico sia verso la pompa di calore aria-acqua (Figura 17).

I tubi principali di distribuzione dell'acqua fredda/calda, in acciaio zincato a sezione circolare con diametro pari a 32 mm, trasportano all'interno della serra l'acqua fredda/calda (Figura 19). Queste tubazioni, opportunamente coibentate e rivestite, sono lunghe circa 42 m. All'interno della serra sono posizionati, inoltre, dei tubi in acciaio zincato coibentati a sezione circolare con diametro pari a 12.7 mm; questi congiungono i tubi principali al sistema di distribuzione del freddo/caldo in prossimità delle piante (Figura 20).

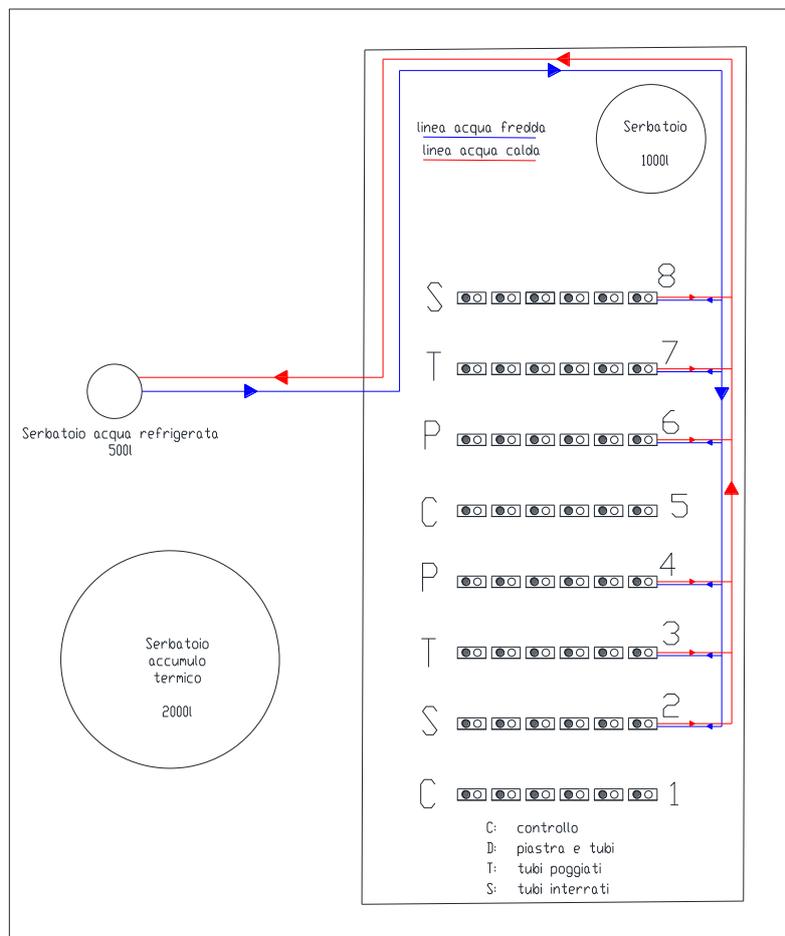


Figura 16. Schema della distribuzione delle tubazioni di mandata e ritorno nel periodo estivo 2020 presso l'Università di Bari.

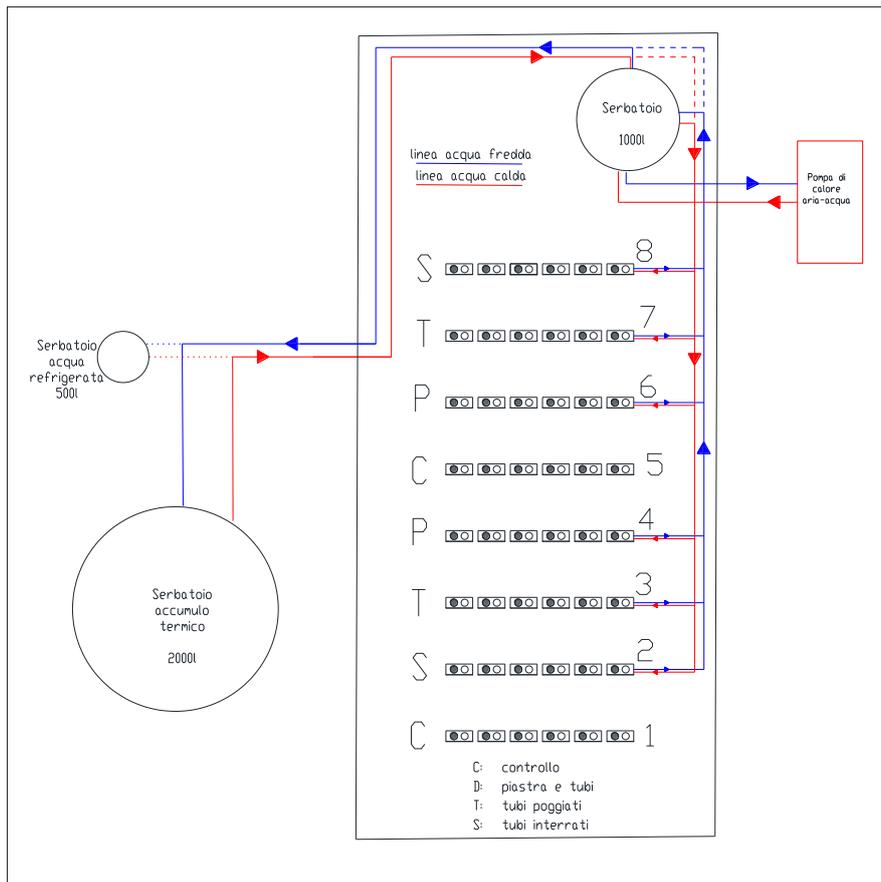


Figura 17. Schema della distribuzione delle tubazioni di mandata e ritorno nel periodo invernale 2020 presso l'Università di Bari.



Figura 18: Serbatoio ausiliario all'interno della serra e tubazioni di mandata e ritorno dell'acqua fredda/calda.



Figura 19. Tubazioni principali che trasportano all'interno della serra l'acqua fredda/calda.



Figura 20. Tubazioni di mandata e ritorno all'interno della serra.

L'utilizzo di sistemi di condizionamento localizzato può richiedere l'introduzione di modalità di trasmissione di energia termica poco sperimentate in ambito agricolo. Con l'obiettivo di ottenere un microclima ottimale per la crescita delle piante sono stati testati tre diversi sistemi di distribuzione del freddo/caldo in prossimità delle piante durante il 2020 (Figura 21). La pianta rappresenta un bio-sensore utile per evidenziare le prestazioni del sistema di condizionamento climatico. L'output di questo bio-sensore è lo sviluppo e la produttività della pianta stessa.

Il primo sistema di condizionamento localizzato, denominato "tubo interrato", è caratterizzato da tubi in Polietilene (PE), con diametro pari a 16 mm, attraversati da acqua fredda/calda posizionati all'interno del substrato di coltivazione (Figura 22). La lunghezza per ogni linea di coltivazione è di 12 m considerando mandata e ritorno.

Il secondo sistema, denominato "tubo poggiato", è caratterizzato da tubi in PE, con diametro pari a 16 mm, attraversati da acqua fredda/calda appoggiati sul substrato di coltivazione (Figura 23). La lunghezza per ogni linea di coltivazione è di 12 m considerando mandata e ritorno.

Il terzo sistema, denominato "piastra e tubo", è costituito da piastre metalliche raffreddate/riscaldare da tubi in acciaio e poste nella zona aerea delle piante (Figura 24). I tubi in acciaio hanno un diametro pari a 12.7 mm. I tubi attraversati da acqua fredda/calda sono posizionati sopra i vasi di coltivazione in prossimità di uno dei bordi longitudinali e sono a contatto con piastre di alluminio, caratterizzate da uno spessore di 0.5 mm. Sono presenti anche dei pannelli di polistirolo per la coibentazione posteriore delle piastre (Figura 25). I pannelli di polistirolo sono caratterizzati da uno spessore pari a 3 cm.

I sistemi a tubi interrati e a tubi poggiati raffreddano/riscaldano il substrato di coltivazione. Se si utilizza il sistema piastra e tubo, l'aria in prossimità delle piante può subire un condizionamento relativamente limitato mentre sarà la presenza delle superfici radiative ad influenzare la crescita delle piante: la pianta è sicuramente molto sensibile allo scambio termico essendo esposta alle superfici radianti a bassa/alta temperatura.

Presso l'Università di Bari, nel laboratorio di misure radiometriche del Dipartimento DISAAT sono state eseguite prove radiometriche sulle piastre in alluminio utilizzate per il condizionamento dell'area di coltivazione. Il laboratorio è fornito di uno spettrofotometro FT-IR (1760 X, Perkin Elmer Instruments, Norwalk, CT, USA) con passo di 4 cm^{-1} . Sono state eseguite misure radiometriche nell'intervallo di lunghezze d'onda dell'IR lungo compreso tra 2500 e 25000 nm (LWIR). È stato calcolato il coefficiente di emissività nel range LWIR come valore medio dell'emissività spettrale nel range di lunghezza d'onda da 7500 a 12500 nm (Papadakis et al., 2000; Vox and Schettini, 2007). Questo intervallo corrisponde alle lunghezze d'onda in cui l'emissione dei corpi a temperatura ambiente è massima, essendo un indice della capacità del materiale di emettere e ricevere radiazioni e quindi disperdere calore. Il valore del coefficiente di emissività delle piastre di alluminio, valutato come media fra 7500 e 12500 nm, è pari al 0.234.

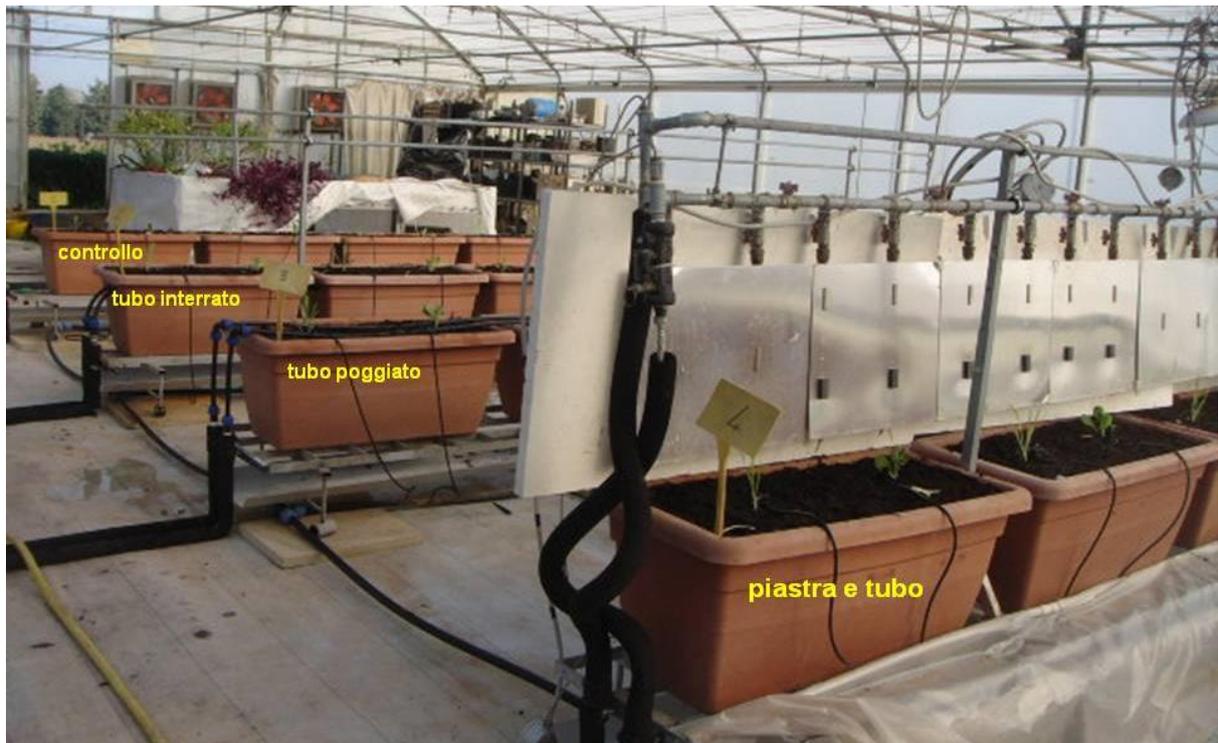


Figura 21. Tre sistemi di distribuzione del freddo/caldo in prossimità delle piante testati durante il 2020 all'interno della serra presso l'Università di Bari.



Figura 22. Sistema di distribuzione del freddo/caldo denominato "tubo interrato", realizzato con tubi posizionati all'interno del substrato di coltivazione.



Figura 23. Sistema di distribuzione del freddo/caldo denominato “tubo poggiato”, realizzato con tubi poggiati sul substrato di coltivazione.



Figura 24. Sistema di distribuzione del freddo/caldo denominato “piastra e tubo” costituito da tubi posizionati sopra i vasi di coltivazione a contatto con piastre di alluminio.



Figura 25. Particolare del sistema di distribuzione del freddo/caldo denominato “piastra e tubo”.

Il campo sperimentale è dotato di una stazione meteorologica e di un sistema di sensori interfacciati con un data logger per l’acquisizione in continuo e la memorizzazione dei dati.

I parametri rilevati durante le prove sperimentali sono stati:

- la temperatura dell’aria esterna ed in serra;
- l’umidità relativa dell’aria esterna e in serra;
- la temperatura del substrato di coltivazione in serra;
- la radiazione solare esterna;
- la temperatura di mandata e ritorno per: il campo solare, il serbatoio di accumulo termico, l’assorbitore, il serbatoio dell’acqua refrigerata, il serbatoio interno, la pompa di calore aria-acqua, i sistemi di condizionamento localizzato;
- le portate volumetriche dell’acqua in ingresso nella serra.

I dati sono stati misurati con una frequenza di 60 s e la media è eseguita ogni 15 minuti; i dati sono stati memorizzati in un data logger (CR10X, Campbell, Logan, USA).

La temperatura e l’umidità relativa dell’aria esterna (Figura 26), dell’aria all’interno della serra (Figura 27) e dell’aria in prossimità delle piante (Figura 28) è misurata utilizzando dei termistori (Tecno.el s.r.l. Formello, Roma, Italia). Anche la temperatura del terreno è misurata mediante termistori (Tecno.el s.r.l. Formello, Roma, Italia) (Figura 28).

La radiazione solare è misurata utilizzando un piranometro (modello 8-48, Eppley Laboratory, Newport, RI, USA) nella gamma di lunghezze d’onda 0.3-3 mm (Figura 29).

La temperatura dell'acqua che scorre all'interno dei tubi è misurata per mezzo di sensori PT100 (Tecno.el s.r.l., Formello, Roma, Italia) (Figura 30). La portata volumetrica dell'acqua che scorre attraverso un tubo è misurata da un misuratore di volume (modello MTH3, GWF MessSysteme AG, Lucerna, Svizzera) (Figura 30). Valvole di bilanciamento (Caleffi S.p.A., Fontaneto d'Agogna (NO), Italia) consentono di regolare la portata di fluido che scorre nei tubi nella zona di coltivazione al fine di garantire il funzionamento dell'impianto nelle condizioni di progetto ottimali.



Figura 26. Stazione meteorologica presso l'Università di Bari.



Figura 27. Sensori: Termistore per la misura della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria all'interno della serra.



Figura 28. Sensori: Termistore per la misura della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria in prossimità delle piante e termistore per la misura della temperatura del substrato di coltivazione.



Figura 29. Sensore: piranometro per la misura della radiazione solare.

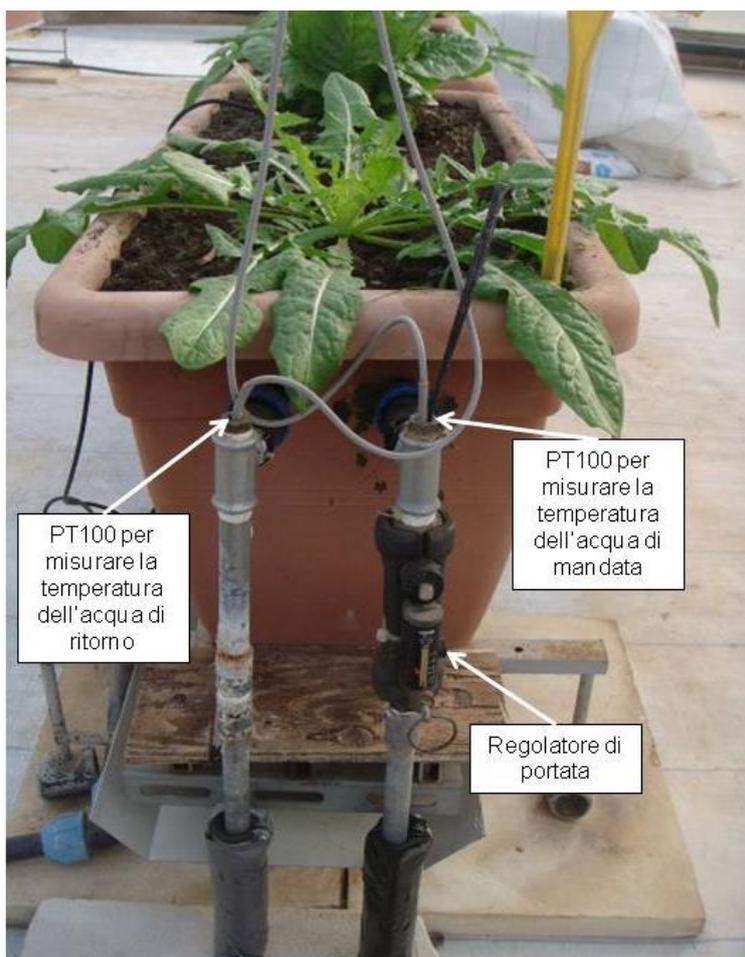


Figura 30. Termistore PT100 per misurare la temperatura dell'acqua che scorre all'interno dei tubi e regolatore di portata.

2.2.2 Prova sperimentale nel periodo estivo: solar cooling integrato con caldaia a biomassa per il raffrescamento della serra

Nell'estate 2020 è stata eseguita una prova agronomica al fine di comparare la crescita di piante coltivate utilizzando 3 diversi sistemi di distribuzione del freddo con la crescita di piante coltivate senza alcun raffrescamento localizzato (controllo) (Figura 21). La prova estiva 2020 è stata effettuata su una coltivazione di zuccina e di lattuga Romana.

Per le prove agronomiche è stato utilizzato uno schema sperimentale a blocchi, con dodici repliche. La coltivazione condotta è stata del tipo fuori suolo. La prova sperimentale è iniziata il 3 agosto 2020 ed è terminata il 21 settembre 2020. La coltivazione della lattuga Romana è durata 30 giorni mentre quella della zuccina 49 giorni.

La caldaia a biomassa è stata caricata con sacchi da 25 kg di nocciolino di ulivo; la capacità della tramoggia è di 137.5 kg. Durante la prova si è registrato un consumo di nocciolino di ulivo di circa 9 kg/ora.

Le piante sono state monitorate nel corso della prova attraverso rilievi fotografici (Figura 31 -Figura 33) e rilievi agronomici.

Le caratteristiche di crescita delle piante sono state misurate durante lo svolgimento della prova. L'altezza delle piante e il numero di foglie per pianta sono stati monitorati periodicamente, dal momento del trapianto fino all'inizio del raccolto.

Nessuna pianta ha mostrato particolari segni di patologia, non è stato necessario effettuare alcun trattamento fitosanitario. Le piante sono state coltivate con le stesse modalità agronomiche.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 31. Piante coltivate con i diversi sistemi di distribuzione del freddo: a) tubo interrato; b) tubo poggiato; c) piastra e tubo; d) controllo; giorno del trapianto nei vasi.

La Figura 34 evidenzia l'incremento di altezza delle piante di lattuga rispetto alla loro altezza iniziale. Si evince che le piante coltivate con il raffrescamento a piastra e tubo sono costantemente cresciute di più rispetto alle altre. Le piante cresciute meno sono quelle raffrescate con il sistema di distribuzione del freddo a tubo interrato. Tale comportamento può essere spiegato dal fatto che il raffrescamento del terreno nel caso di piante a radice tozza è influente. Il sistema di distribuzione del freddo a tubi poggiati raffredda sia il substrato di coltivazione sia la pianta stessa, mentre nel sistema localizzato a piastra e tubo sarà stata la presenza delle superfici radiative ad influenzare positivamente la crescita delle piante.

La Figura 35 riporta l'incremento delle foglie di lattuga rispetto al numero iniziale. Si evince che l'incremento delle foglie è inversamente proporzionale all'incremento di altezza della lattuga rispetto ai valori misurati il giorno del trapianto.

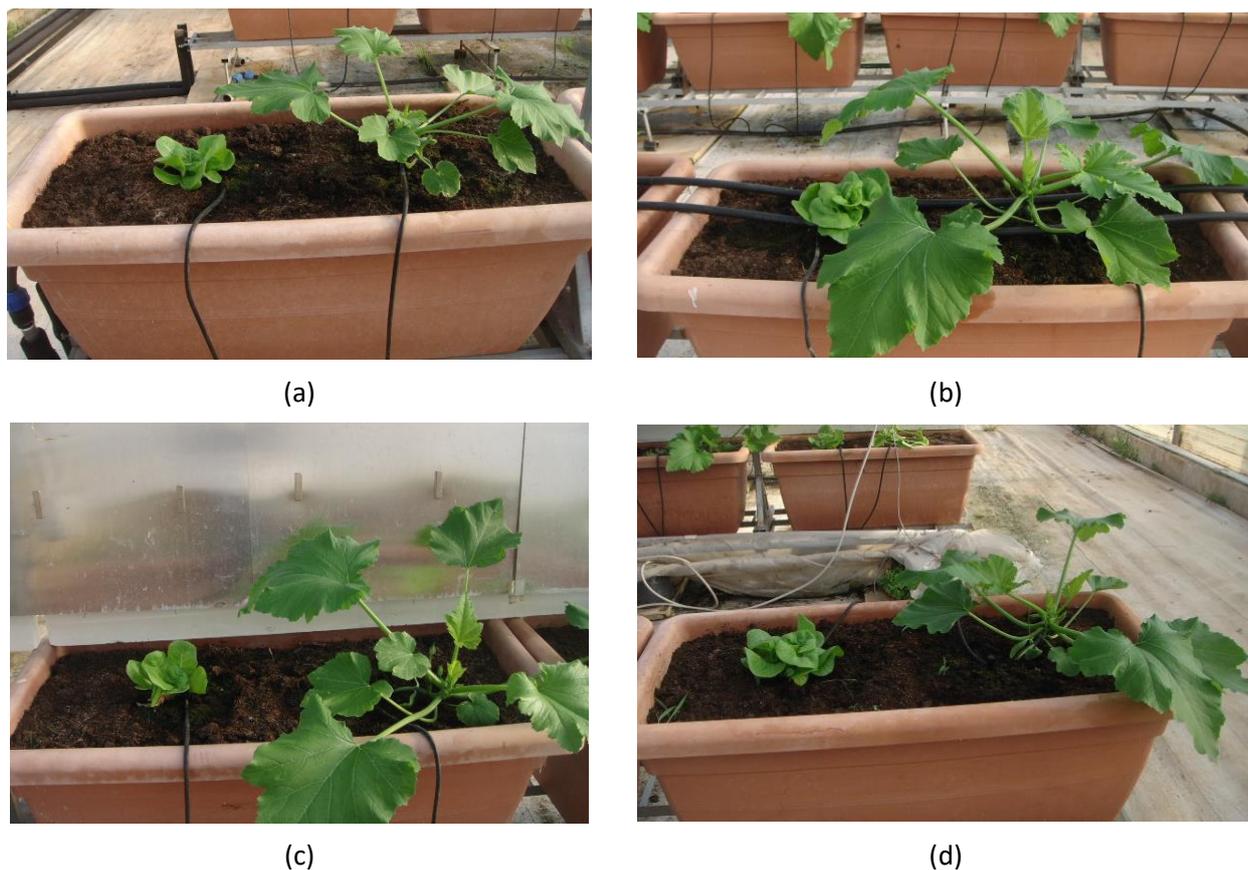


Figura 32. Piante coltivate con i diversi sistemi di distribuzione del freddo: a) tubo interrato; b) tubo poggiato; c) piastra e tubo; d) controllo; 14 giorni dopo il trapianto.

La lattuga Romana è pronta per essere raccolta quando il cespo è sodo e compatto, ha un cappuccio chiuso e le foglie sono sane, tenere e caratterizzate da un colore verde vivace. Dopo 30 giorni dal trapianto, le lattughe sono state raccolte e tutte le piante sono state misurate e pesate. Il peso medio della lattuga varia al variare del sistema di condizionamento localizzato: una lattuga raffrescata con tubo poggiato pesava in media 154.42 g, una lattuga raffrescata con tubo interrato pesava in media 153.17 g, una lattuga non raffrescata localmente pesava in media 149.92 g, una lattuga raffrescata con piastra e tubo pesava in media 126.75 g.

È stato valutato: un incremento di altezza rispetto all'altezza iniziale pari in media a 15.33 cm e un incremento medio di 21.42 foglie rispetto al giorno del trapianto per le lattughe raffrescate con la piastra e tubo; un incremento di altezza pari a 14.42 cm e un incremento medio di 22.17 foglie per piante con sistema di distribuzione del freddo con tubo poggiato; un incremento di altezza pari a 12.92 cm e un incremento medio di 23.08 foglie per piante con sistema di distribuzione del freddo a tubo interrato; un incremento di altezza di 14.00 cm e un incremento medio di 22.08 foglie per le piante non raffrescate localmente in alcun modo.



Figura 33. Piante coltivate con i diversi sistemi di distribuzione del freddo: a) tubo interrato; b) tubo poggiato; c) piastra e tubo; d) controllo; 30 giorni dopo il trapianto.

La prova sperimentale estiva effettuata ha messo in evidenza che il sistema di distribuzione del freddo localizzato con tubo poggiato sul terreno ha contribuito al massimo raccolto cumulato di lattuga Romana avendo la lattuga un peso medio di 154.42 g, valore più alto tra quelli registrati.

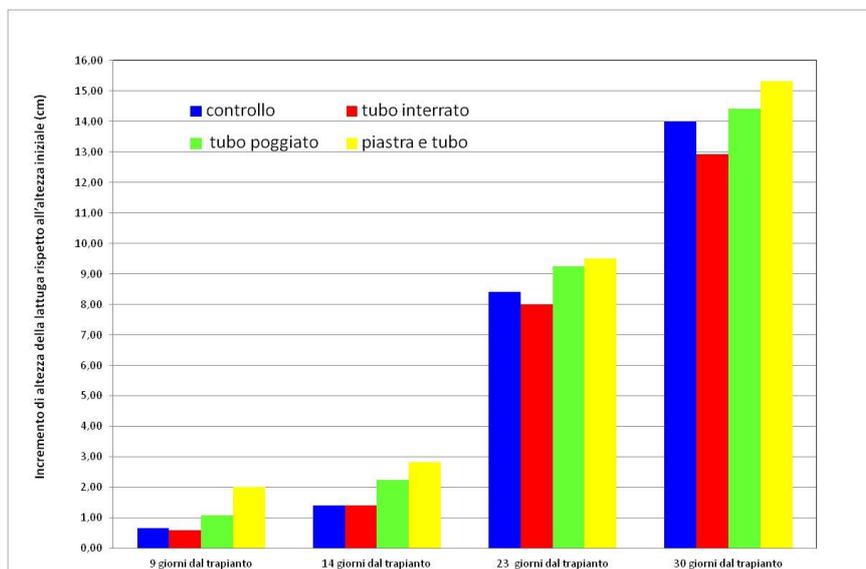


Figura 34. Incremento medio di altezza delle piante di lattuga rispetto all'altezza iniziale; prova estiva.

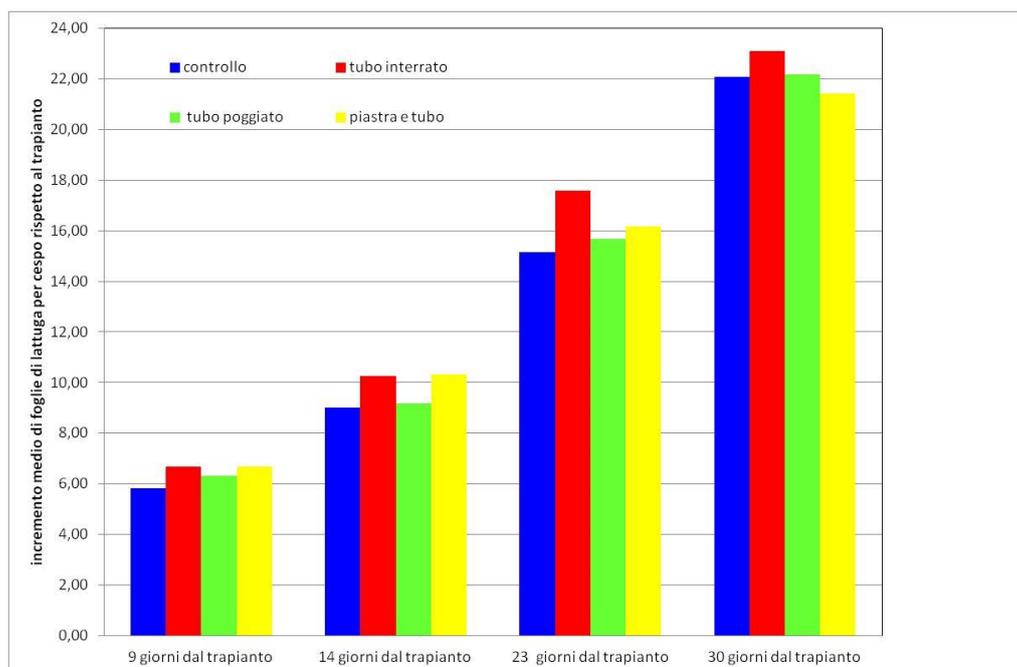


Figura 35. Incremento medio di foglie di lattuga rispetto al giorno del trapianto; prova estiva.

Dopo 9, 14 e 23 giorni dal trapianto è stato valutato l'incremento medio di altezza delle piante di zuccina rispetto all'altezza iniziale (Figura 36). Dopo circa 30 giorni dal trapianto lo sviluppo vegetativo delle piante di zuccina si è interrotto quasi completamente per la presenza di fiori e di zucchine sulle piante.

Dopo 23 giorni dal trapianto c'è stato un incremento di altezza rispetto al giorno del trapianto pari in media a: 50.42 cm per le piante di zuccina raffrescate con la piastra e tubo, 32.17 cm per piante con sistema di distribuzione del freddo con tubo poggiato, 31.42 cm per piante con sistema di distribuzione del freddo a tubo interrato e 31.08 cm per le piante non raffrescate localmente in alcun modo.

La raccolta dei fiori di zuccina è iniziata 23 giorni dopo il trapianto ed è stata eseguita manualmente. In tutto sono stati raccolti 162 fiori di zuccina sia dalle piante raffrescate con la piastra e tubo sia dalle piante non raffrescate localmente in alcun modo, e 155 fiori di zuccina sia dalle piante raffrescate con sistema di distribuzione del freddo con tubo poggiato che dalle piante caratterizzate dal sistema di distribuzione del freddo a tubo interrato.

Sono stati eseguiti 3 raccolti, il primo dopo 30 giorni dal trapianto, il secondo dopo 42 giorni dal trapianto, il terzo dopo 49 giorni dal trapianto (Figura 37). La raccolta delle zucchine è stata manuale. Si è avuto sempre il maggior raccolto dalle piante di zuccina raffrescate con sistema di distribuzione del freddo con tubo poggiato. Al termine della coltivazione, sono stati raccolti in totale 11.7 kg di zucchine dalle piante raffrescate con sistema di distribuzione del freddo con tubo poggiato. Il primo giorno di raccolto è stato caratterizzato da una buona produzione di zucchine anche dalle piante raffrescate con la piastra e tubo mentre la minore produzione è stata registrata per le piante non raffrescate localmente in alcun modo. Al termine della prova, la minore produzione complessiva si è registrata per le piante di zuccina caratterizzate dal sistema di distribuzione del freddo a tubo interrato.

Il peso medio delle zucchine raccolte e il numero di zucchine totali raccolte sono riportati, rispettivamente, nella Tabella 1 e nella Tabella 2. Il giorno del primo raccolto, dopo 30 giorni dal trapianto, le zucchine raccolte dalle piante raffrescate con la piastra e tubo hanno presentato un peso maggiore rispetto alle altre. Il secondo raccolto, eseguito dopo 42 giorni dal trapianto, è stato caratterizzato dal maggior numero di zucchine raccolte dalle piante raffrescate con sistema di distribuzione del freddo con tubo poggiato, che hanno anche presentato il peso medio maggiore. Durante il terzo raccolto, dopo 49 giorni dal trapianto, le zucchine con

peso maggiore sono state quelle raccolte dalle piante non raffrescate localmente in alcun modo, che però erano in numero minore.

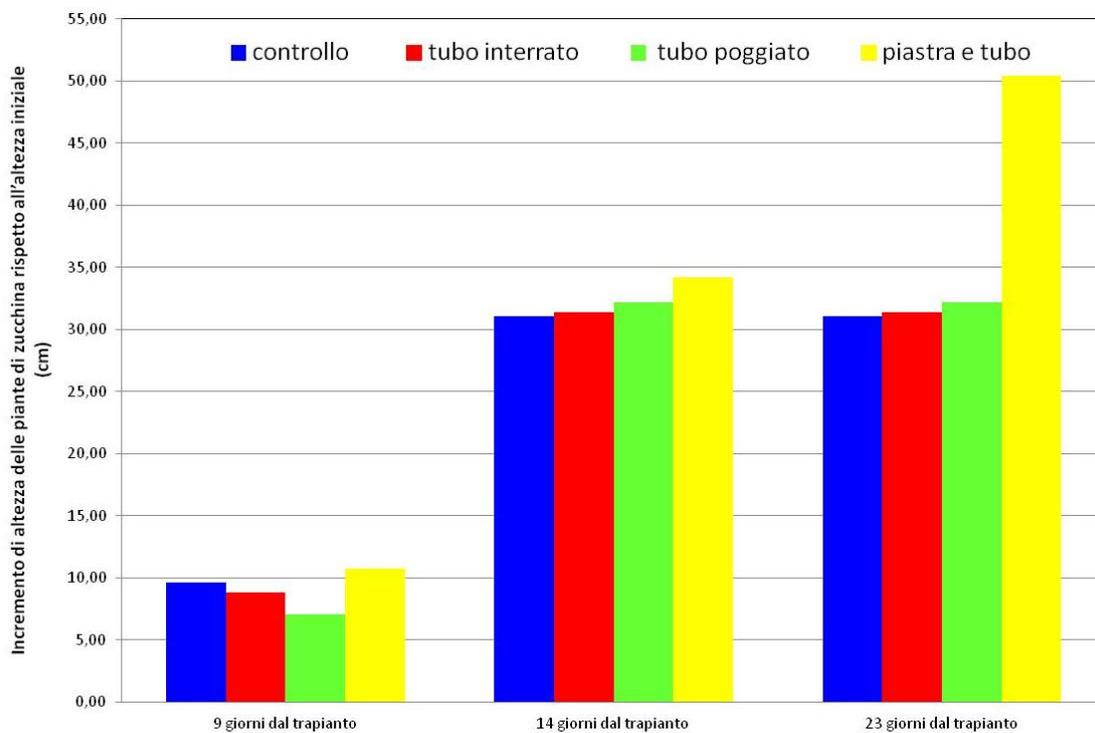


Figura 36. Incremento medio di altezza delle piante di zuccina rispetto all'altezza iniziale; prova estiva.

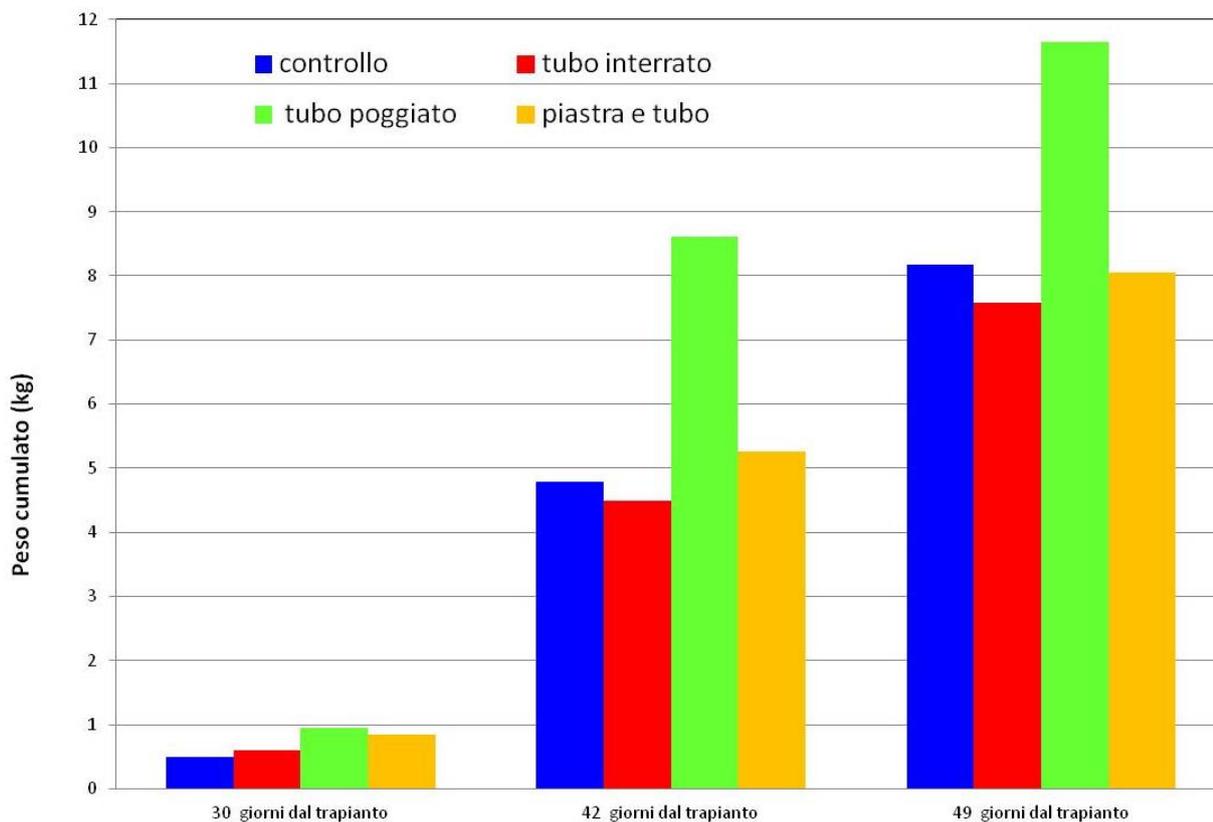


Figura 37. Raccolto cumulato delle zucchine; prova estiva.

Tabella 1. Peso medio delle zucchine.

Data	Giorni dopo il trapianto	Controllo	Tubo interrato	Tubo poggiato	Piastra e tubo
02/09/2020	30	81 g	86 g	86 g	106 g
14/09/2020	42	331 g	243 g	333 g	245 g
21/09/2020	49	188 g	124 g	132 g	147 g

Tabella 2. Numero di zucchine raccolte in totale per raccolto.

Data	Giorni dopo il trapianto	Controllo	Tubo interrato	Tubo poggiato	Piastra e tubo
02/09/2020	30	6	7	11	8
14/09/2020	42	13	15	23	19
21/09/2020	49	18	22	23	22

La prova sperimentale estiva effettuata ha messo in evidenza che il sistema di distribuzione del freddo localizzato con tubo poggiato sul terreno ha contribuito al massimo raccolto cumulato di zucchine (Figura 37) rispetto agli altri sistemi.

2.2.2.1 Parametri climatici esterni, microclima, monitoraggio

Durante il periodo di svolgimento delle prove agronomiche, compreso tra il 3 agosto e il 21 settembre 2020, sono stati rilevati i parametri climatici presso il centro sperimentale. I valori di temperatura dell'aria esterna e di radiazione solare cumulata sono riportati nella Tabella 3. La massima temperatura dell'aria è stata registrata il 3 agosto, mentre la minima il 20 settembre. La Figura 38 mostra l'andamento della temperatura dell'aria nel periodo analizzato, dal quale si evince come la temperatura media sia progressivamente diminuita dall'inizio verso la fine del periodo. La temperatura media giornaliera massima, pari a 29.4 °C, è stata registrata il 3 agosto, la minima, 15.7 °C, il 20 settembre. La radiazione solare cumulata giornaliera è mostrata in Figura 39. Il valore massimo (24.3 MJ m⁻²) è stato registrato il 9 agosto. Anche in questo caso, i valori sono mediamente diminuiti verso la fine del periodo considerato. Complessivamente, l'apporto di radiazione solare nell'intero periodo è stato pari a 978.7 MJ m⁻².

Tabella 3. Massima, media e minima temperatura dell'aria esterna e media della radiazione solare cumulata giornaliera presso il campo sperimentale, 3 agosto-21 settembre 2020.

Temperatura dell'aria esterna			Radiazione solare cumulata giornaliera media
Massima	Media	Minima	
38.2 °C	23.4 °C	10.2 °C	19.6 MJ m ⁻²

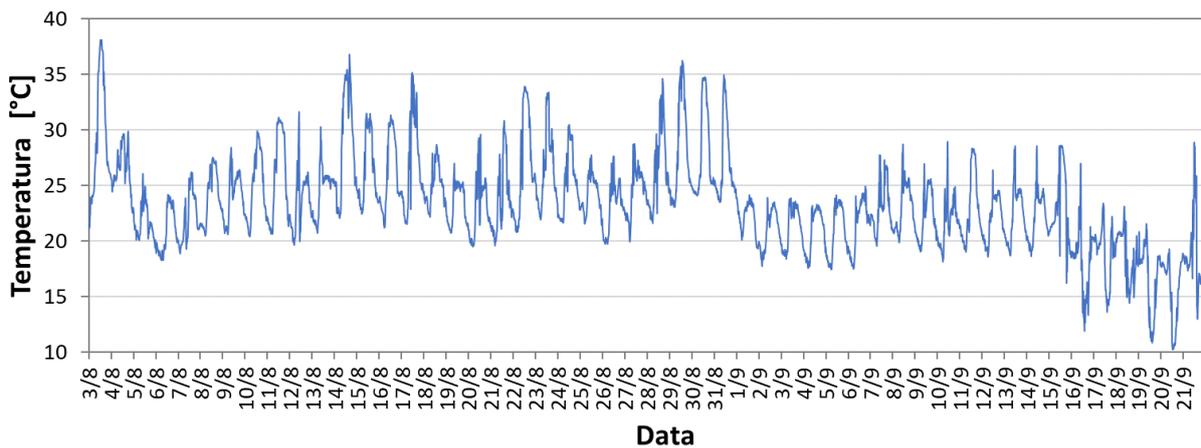


Figura 38. Temperatura dell'aria esterna misurata presso il campo sperimentale, 3 agosto-21 settembre 2020.

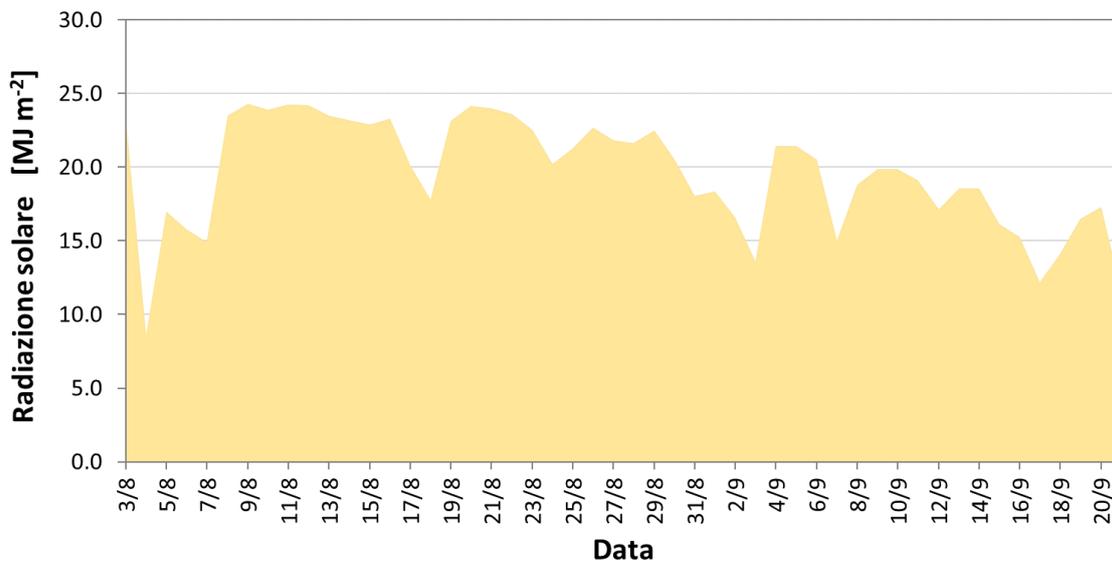


Figura 39. Radiazione solare cumulata giornaliera presso il campo sperimentale, 3 agosto-21 settembre 2020.

L'applicazione dei diversi sistemi di raffreddamento ha avuto un evidente effetto sul microclima delle zone di coltivazione.

Durante le prove sperimentali condotte nell'estate del 2020 è stato testato il sistema di poligenerazione con una prima configurazione di base. Il sistema di solar cooling, alimentato in origine solo da collettori solari, è stato integrato con la caldaia a biomassa (Figura 12). Il test è stato realizzato alternando periodi di accensione della caldaia con periodi di spegnimento della stessa per verificarne l'effetto. La caldaia a biomassa, nei periodi di accensione, ha immesso energia di riscaldamento nel serbatoio caldo nelle prime ore del mattino, quando i collettori solari non sono in grado di fornire sufficiente energia per attivare l'assorbitore. L'accensione della caldaia a biomassa ha permesso di colmare il gap di raffreddamento che si verifica fra le ore 10 e le ore 11-11.30 solari quando si utilizzano solo i collettori solari come sorgente energetica. In effetti l'integrazione della caldaia a biomassa ha consentito l'anticipo della partenza del sistema di raffreddamento fino a coprire il gap temporale di raffreddamento.

Le Figura 40 e Figura 41 illustrano la differenza di comportamento del sistema nelle due condizioni: in assenza di integrazione con caldaia a biomassa ed in presenza di integrazione. Tale intervento di integrazione ha grande importanza poiché nei periodi estivi possono verificarsi picchi di temperatura anche nelle prime ore

della giornata, pertanto si intuisce l'importanza di evitare periodi di non funzionamento del raffrescamento al fine di limitare eventuali danni alla produzione.

L'energia di raffreddamento generata ed in ingresso in serra viene distribuita su 6 diverse linee a servizio delle zone di coltivazione (Figura 16). Sono state utilizzate 3 differenti modalità di distribuzione del freddo, come già descritto, quindi ogni modalità è stata ripetuta 2 volte. La Figura 42 mostra la potenza totale immessa in serra insieme con la potenza utilizzata sulla linea realizzata con tubi interrati. Questa soluzione di distribuzione del freddo è risultata quella con la più elevata quantità di energia distribuita in funzione della elevata capacità termica del suolo, in grado di immagazzinare più energia in confronto all'aria. Questa differenza è evidenziata anche in Figura 43 dove sono confrontate la potenza di raffreddamento erogata dalla linea di raffreddamento realizzata con tubi interrati e la potenza di raffreddamento erogata in aria dalla linea realizzata con piastra e tubi. La linea realizzata con tubi interrati consente valori di potenza anche superiori al 30%.

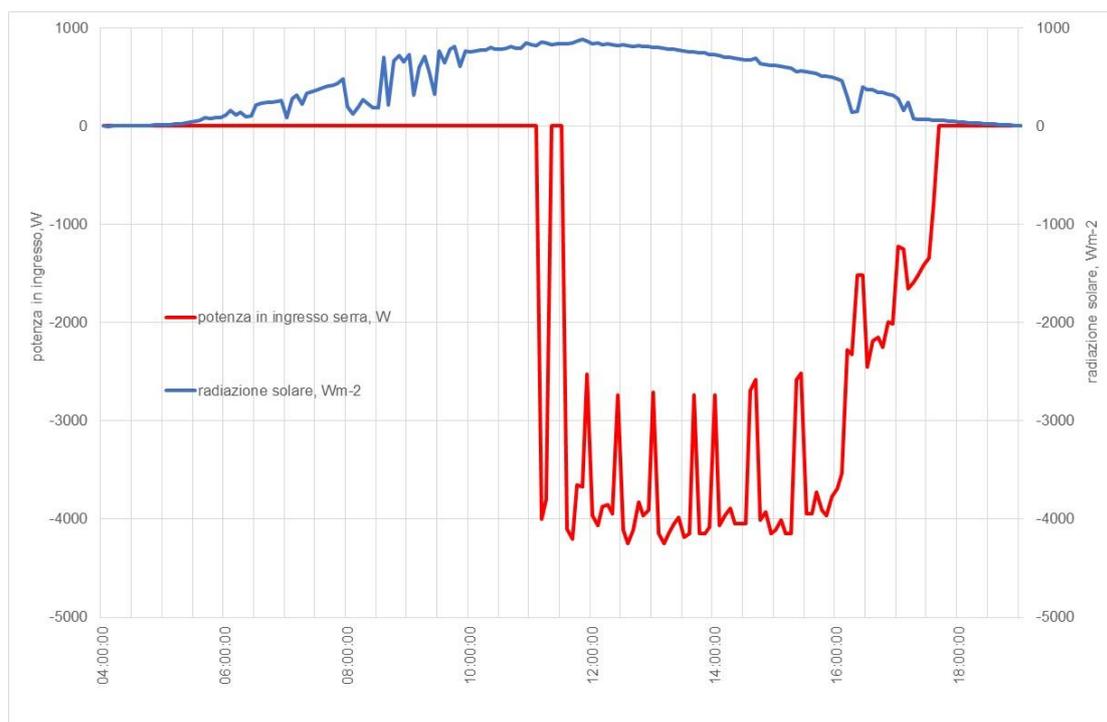


Figura 40. Radiazione solare incidente e potenza di raffreddamento generata nel caso di alimentazione dell'assorbitore solo con i collettori solari.

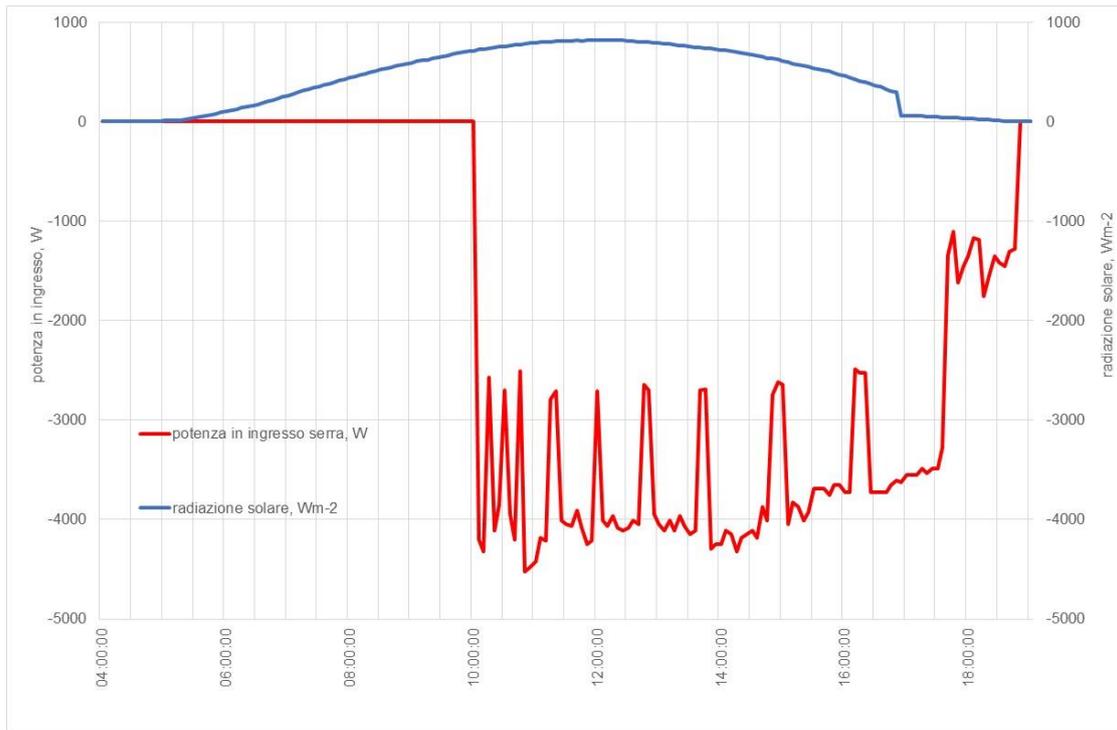


Figura 41. Radiazione solare incidente e potenza di raffreddamento generata nel caso di alimentazione dell'assorbitore con i collettori solari e con la caldaia a biomassa.

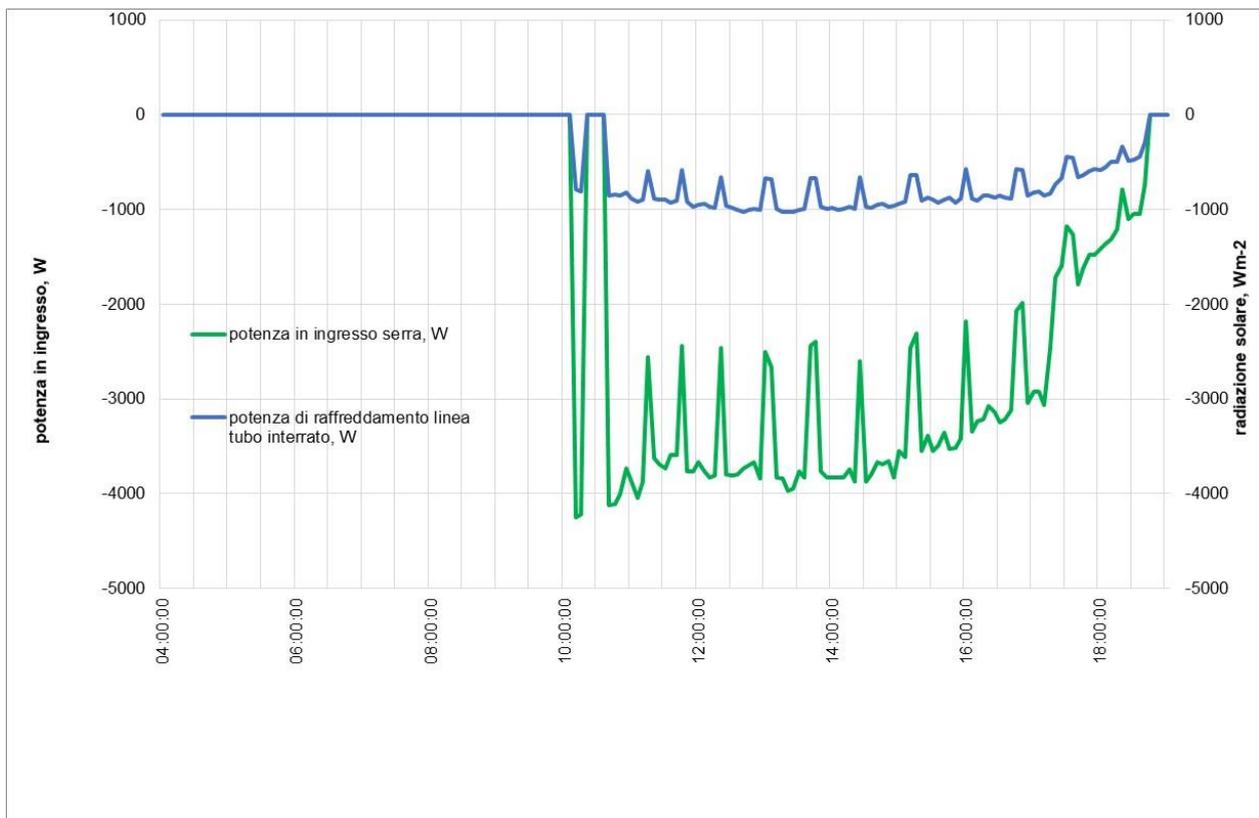


Figura 42. Potenza di raffreddamento in ingresso in serra e distribuita sulla linea di raffreddamento realizzata con tubi interrati.

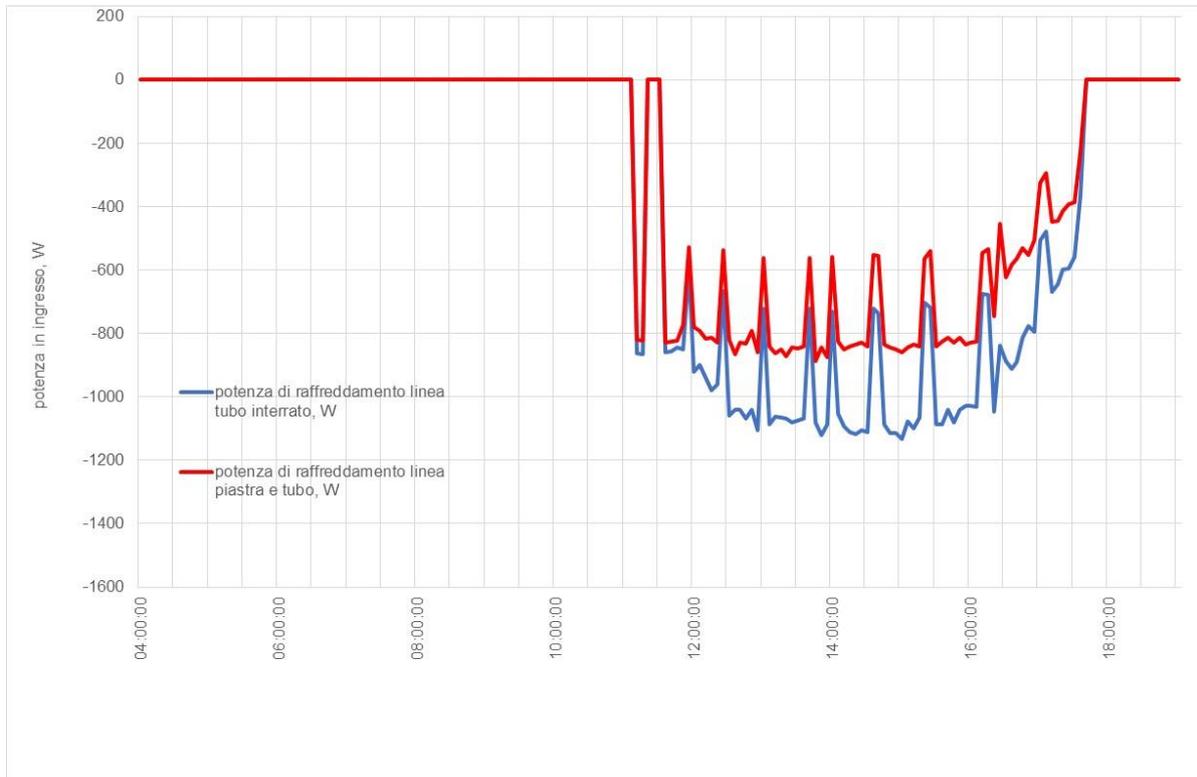


Figura 43. Potenza di raffreddamento sulla linea di raffreddamento realizzata con tubi interrati e sulla linea realizzata con piastra e tubi.

L'applicazione del sistema di raffrescamento, con il test della prima configurazione di base, è stata analizzata verificando gli effetti prodotti nella zona di coltivazione delle piante. La Figura 44 illustra i dati medi misurati nelle prime 2 decadi di agosto relativamente alla temperatura dell'aria. La figura mostra che in realtà i sistemi di raffrescamento non hanno avuto un effetto sensibile di modificazione della temperatura dell'aria, quindi l'effetto di raffrescamento convettivo dell'aria è risultato limitato.

Anche i dati misurati ogni 15 minuti, nell'arco di due giorni (Figura 45), non si discostano da quanto evidenziato, mantenendosi le temperature dell'aria molto vicine fra loro per quanto riguarda le zone raffrescate e la zona non raffrescata.

Diverso è risultato l'effetto per quanto riguarda il raffrescamento del suolo. In questo caso i tubi interrati hanno prodotto il loro effetto dopo alcuni giorni di funzionamento, come si può notare dai dati della seconda decade di agosto illustrati in Figura 46. Gli altri sistemi di raffrescamento non hanno prodotto risultati sensibilmente differenti in confronto al sistema non raffrescato (control).

La Figura 47 mostra i dati misurati ogni 15 minuti nell'arco di due giorni; tali misure evidenziano anche in questo caso che i tubi interrati hanno prodotto un raffrescamento sensibile del suolo rispetto al caso del sistema non raffrescato (control). Non apprezzabile è invece l'effetto degli altri sistemi di raffrescamento.

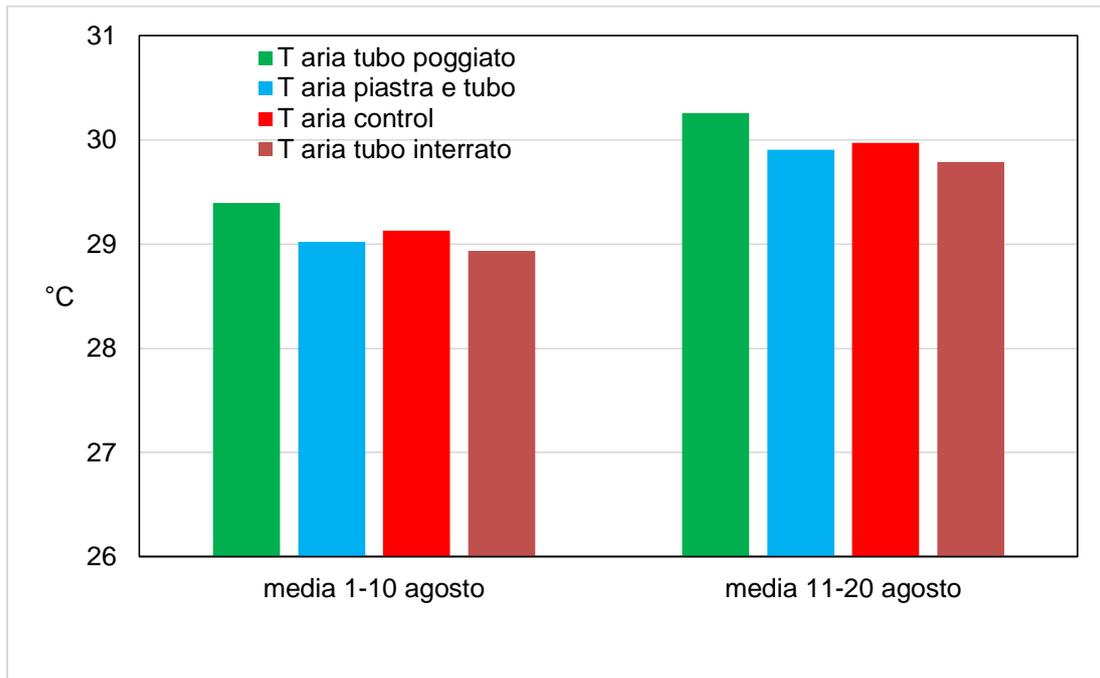


Figura 44. Temperatura dell'aria nella zona di coltivazione ottenuta con: raffrescamento realizzato con tubi interrati, con tubi e piastre in aria, con tubi poggiati sul suolo, in assenza di raffrescamento; valori medi dei periodi 1-10 agosto 2020 e 11-20 agosto 2020.

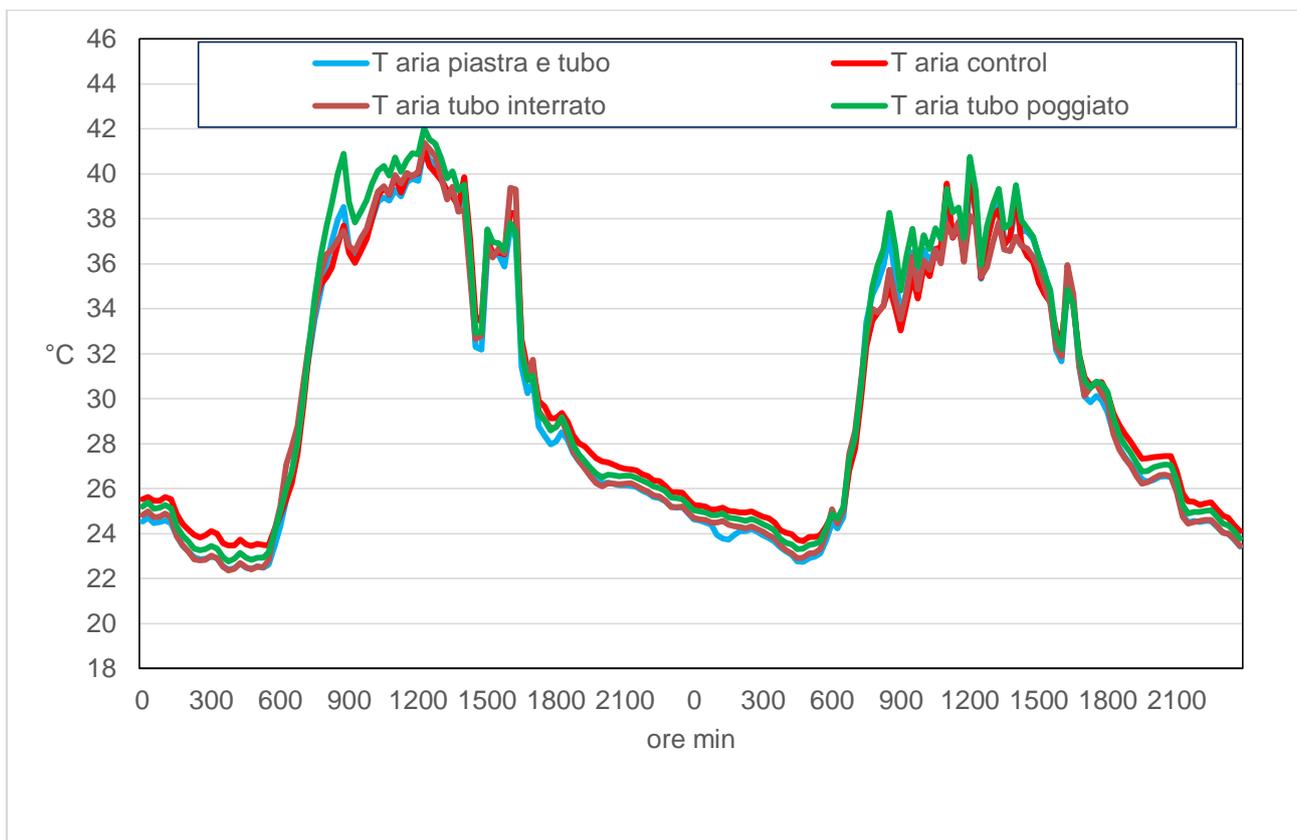


Figura 45. Temperatura dell'aria nella zona di coltivazione ottenuta con: raffrescamento realizzato con tubi interrati, con tubi e piastre in aria, con tubi poggiati sul suolo, in assenza di raffrescamento (control), 17-18/8/2020.

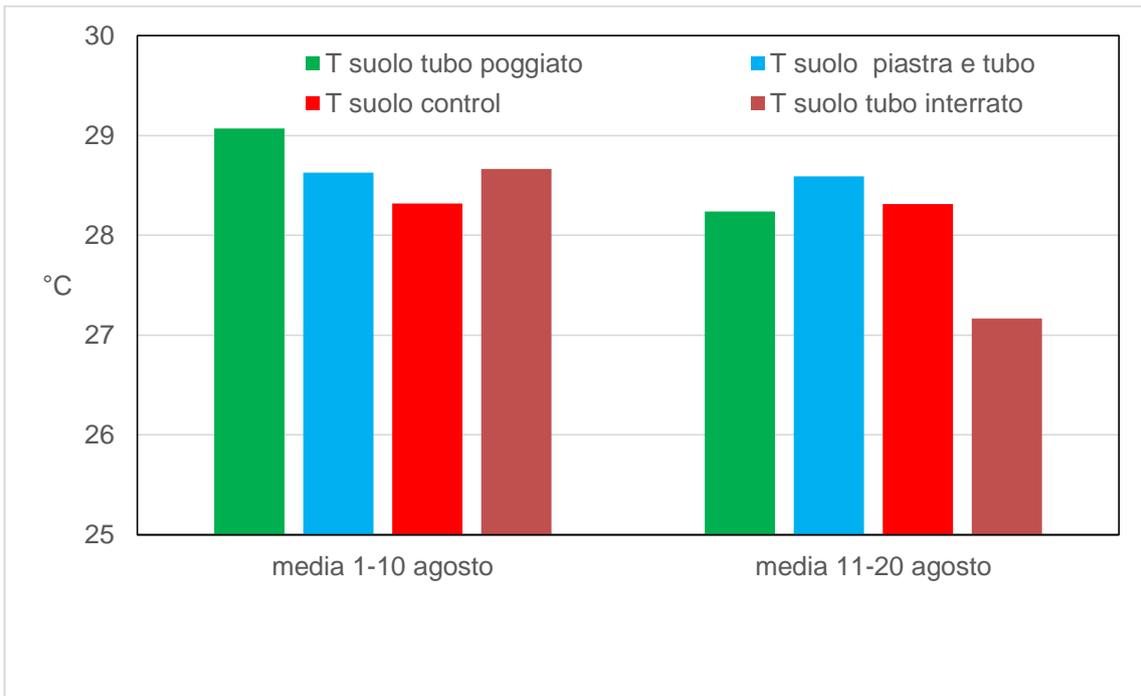


Figura 46. Temperatura del suolo nella zona di coltivazione ottenuta con: raffrescamento realizzato con tubi interrati, con tubi e piastre in aria, con tubi poggiati sul suolo, in assenza di raffrescamento; valori medi dei periodi 1-10 agosto 2020 e 11-20 agosto 2020.

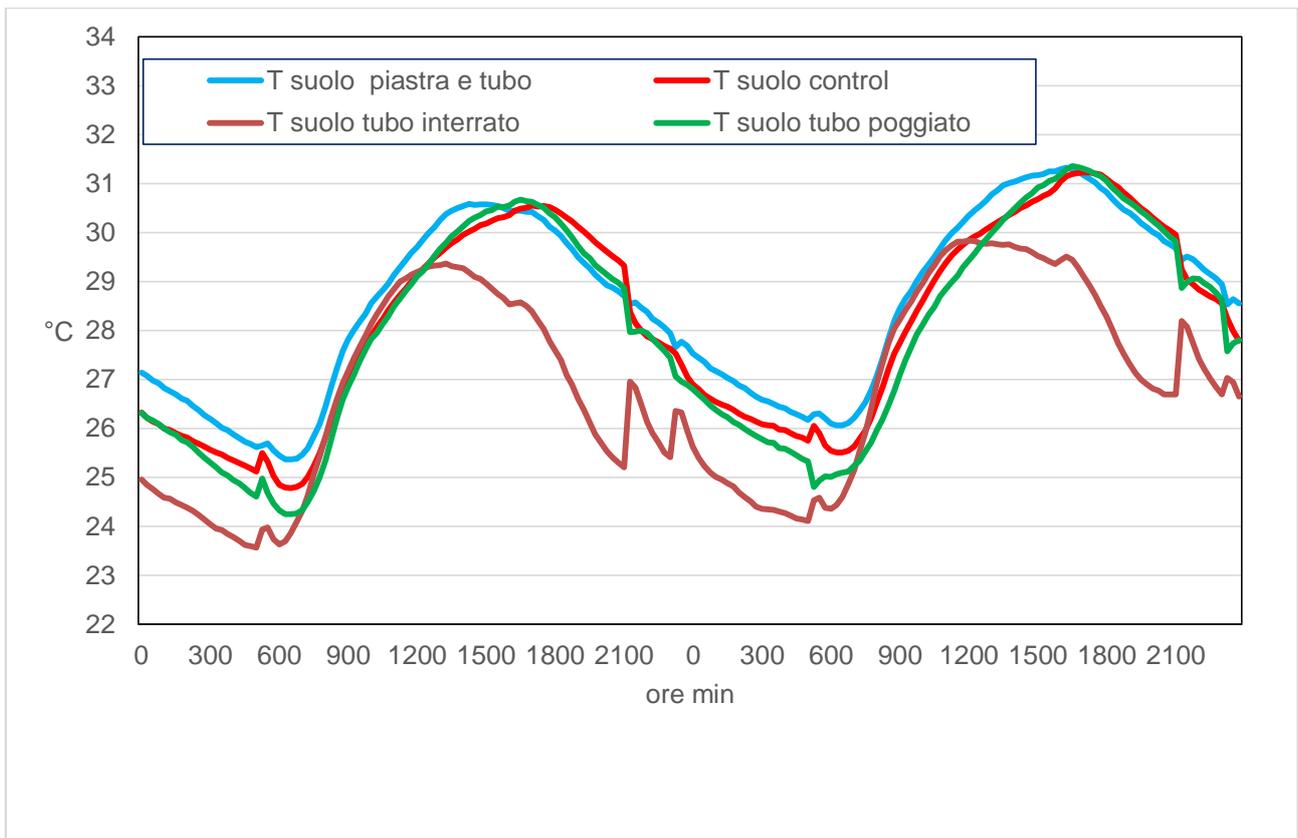


Figura 47. Temperatura del suolo nella zona di coltivazione ottenuta con: raffrescamento realizzato con tubi interrati, con tubi e piastre in aria, con tubi poggiati sul suolo, in assenza di raffrescamento (control), 13-14/8/2020.

In appendice sono riportati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** i dati climatici medi e umulati del periodo compreso tra il 15 maggio e il 15 ottobre 2020. Il database delle condizioni meteorologiche e lo stato dell'impianto di raffrescamento, campionati ogni 15 min, sono riportati nella Tabella A 1 per tre giorni campione del periodo.

2.2.3 Prova sperimentale nel periodo invernale: collettori solari e pompa di calore aria-acqua per il riscaldamento della serra

Nell'inverno 2020 è stata eseguita una prova agronomica al fine di comparare la crescita di piante coltivate utilizzando 3 diversi sistemi di distribuzione del caldo localizzato con la crescita di piante coltivate senza alcun riscaldamento localizzato (controllo) (Figura 21). La prova invernale è stata effettuata su una coltivazione di lattuga Romana e su una coltivazione di cicoria a bacchetta.

Per le prove agronomiche è stato utilizzato uno schema sperimentale a blocchi, con dodici repliche. La coltivazione condotta è stata del tipo fuori suolo. La prova sperimentale è iniziata il 17 dicembre 2020 ed è terminata il 2 marzo 2021. Le piante sono state monitorate nel corso della prova attraverso rilievi fotografici (Figura 48-Figura 50) e rilievi agronomici.

Le caratteristiche di crescita delle piante sono state misurate durante lo svolgimento della prova. L'altezza delle piante e il numero di foglie per pianta sono stati monitorati periodicamente, dal momento del trapianto fino all'inizio del raccolto.

Poche piante di lattuga Romana sono state sostituite per marciume del colletto. Nel complesso le piante non hanno mostrato particolari segni di patologia, non è stato necessario effettuare alcun trattamento fitosanitario. Le piante sono state coltivate con le stesse modalità agronomiche.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 48. Piante coltivate con i diversi sistemi di distribuzione del caldo: a) tubo interrato; b) tubo poggiato; c) piastra e tubo; d) controllo; 2 giorni dal trapianto nei vasi.



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 49. Piante coltivate con i diversi sistemi di distribuzione del caldo: a) tubo interrato; b) tubo poggiato; c) piastra e tubo; d) controllo; 39 giorni dal trapianto nei vasi.



(a)

(b)

(c)

(d)



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 50. Piante coltivate con i diversi sistemi di distribuzione del caldo: a) tubo interrato; b) tubo poggiato; c) piastra e tubo; d) controllo; 68 giorni dopo il trapianto.

La Figura 51 evidenzia l'incremento di altezza delle piante di lattuga rispetto alla loro altezza iniziale; l'incremento è stato valutato nei 55 giorni successivi al trapianto fino al giorno del primo raccolto. Si evince che le lattughe coltivate con il sistema di distribuzione del caldo a tubo interrato sono sempre cresciute di più rispetto alle altre. Le lattughe cresciute meno sono quelle non riscaldate localmente in alcun modo (controllo). Tale comportamento può essere spiegato dal fatto che il riscaldamento del terreno, rispetto al riscaldamento dell'aria, ha influenzato maggiormente la crescita delle piante di lattuga. Il sistema di

distribuzione del caldo a tubi poggianti riscalda sia il substrato di coltivazione sia l'aria in prossimità della pianta stessa, mentre il sistema localizzato con piastra e tubo riscalda le piante mediante superfici radiative.

La Figura 52 riporta l'incremento del numero delle foglie di lattuga rispetto al numero iniziale nei 55 giorni successivi al trapianto fino al primo raccolto. Si evince che le piante di lattuga coltivate con il sistema di distribuzione del caldo a tubo interrato hanno manifestato in media un incremento maggiore di foglie rispetto alle piante coltivate con gli altri sistemi di distribuzione del caldo localizzato e al controllo. Il minore incremento di foglie si è registrato per le piante non riscaldate localmente in alcun modo (controllo). Il riscaldamento localizzato ha influenzato l'incremento delle foglie in modo direttamente proporzionale all'incremento di altezza della lattuga rispetto ai valori misurati il giorno del trapianto.

Dopo 55 giorni dal trapianto si è registrato: un incremento di altezza rispetto all'altezza iniziale pari in media a 12.91 cm e un incremento medio di 17.58 foglie rispetto al giorno del trapianto per le lattughe riscaldate con tubo interrato; un incremento medio di altezza pari a 11.66 cm e un incremento medio di 15.08 foglie per piante con sistema di distribuzione del caldo con tubo poggiato; un incremento medio di altezza pari a 11.95 cm e un incremento medio di 14.16 foglie per piante con sistema localizzato con piastra e tubo; un incremento medio di altezza di 9.54 cm e un incremento medio di 12.66 foglie per le piante non riscaldate localmente in alcun modo.

Dopo 55 giorni dal trapianto, il peso medio della lattuga varia al variare del sistema di condizionamento localizzato: una lattuga riscaldata con tubo interrato pesava in media 275 g, una lattuga riscaldata con tubo poggiato pesava in media 193 g, una lattuga riscaldata con piastra e tubo pesava in media 198 g e una lattuga non riscaldata localmente pesava in media 234 g. Dopo 55 giorni dal trapianto è stato possibile raccogliere l'85% del raccolto totale della lattuga riscaldata con tubo interrato e solo il 19% di lattuga non riscaldata localmente (Figura 53). C'è stato un anticipo di circa 2 settimane rispetto agli altri sistemi di riscaldamento. Sono stati eseguiti 3 raccolti a 55, 68 e 75 giorni dal trapianto.

La prova sperimentale invernale effettuata ha messo in evidenza che il sistema di distribuzione del caldo localizzato con tubi interrati ha contribuito al massimo raccolto cumulato di lattuga Romana (Figura 53) rispetto agli altri sistemi.

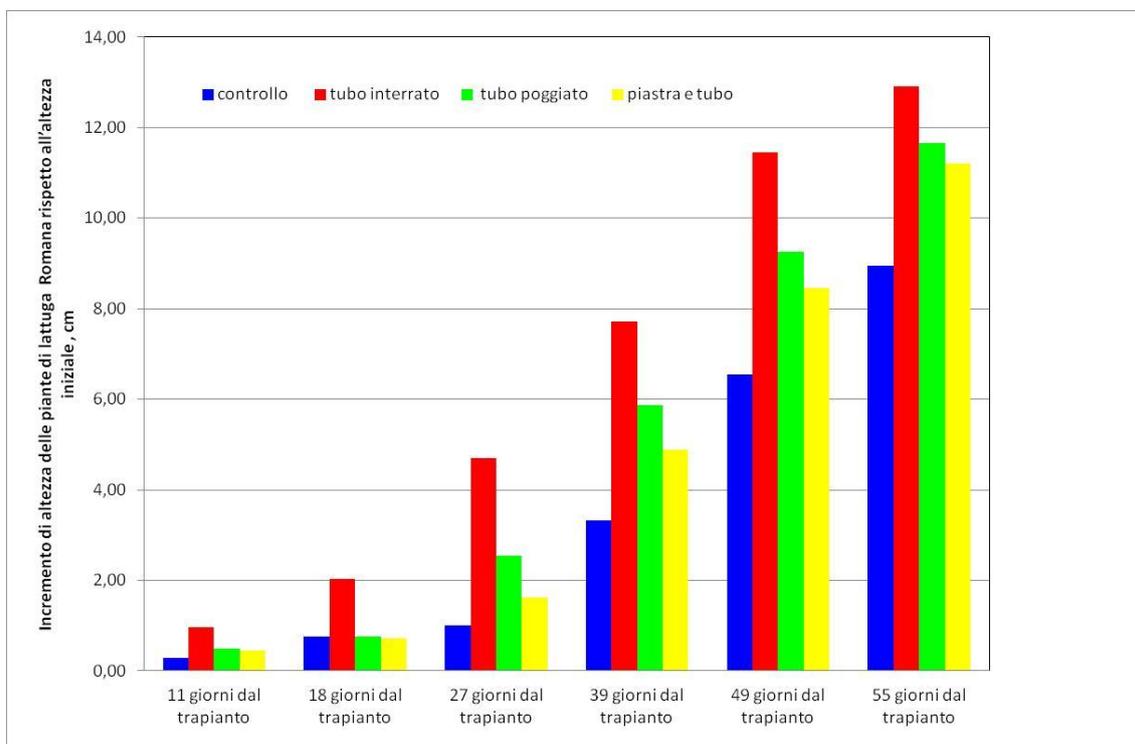


Figura 51. Incremento medio di altezza delle piante di lattuga rispetto all'altezza iniziale fino al giorno del primo raccolto; prova invernale.

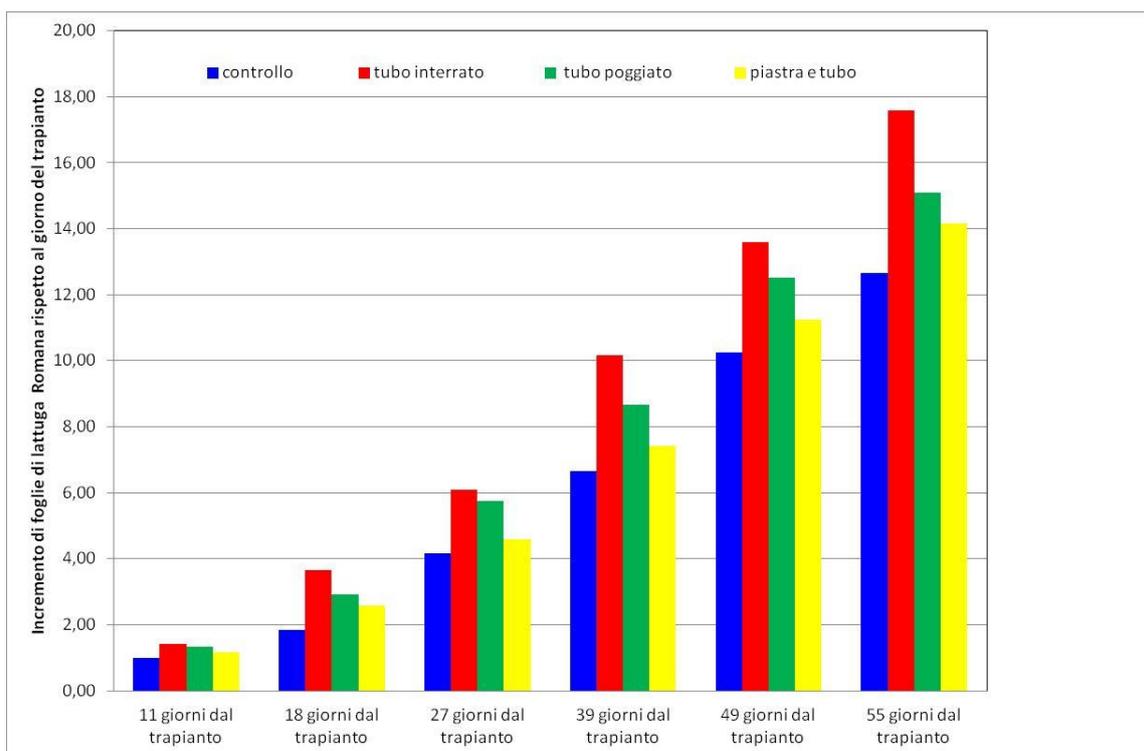


Figura 52. Incremento medio di foglie di lattuga rispetto al giorno del trapianto fino al giorno del primo raccolto; prova invernale.

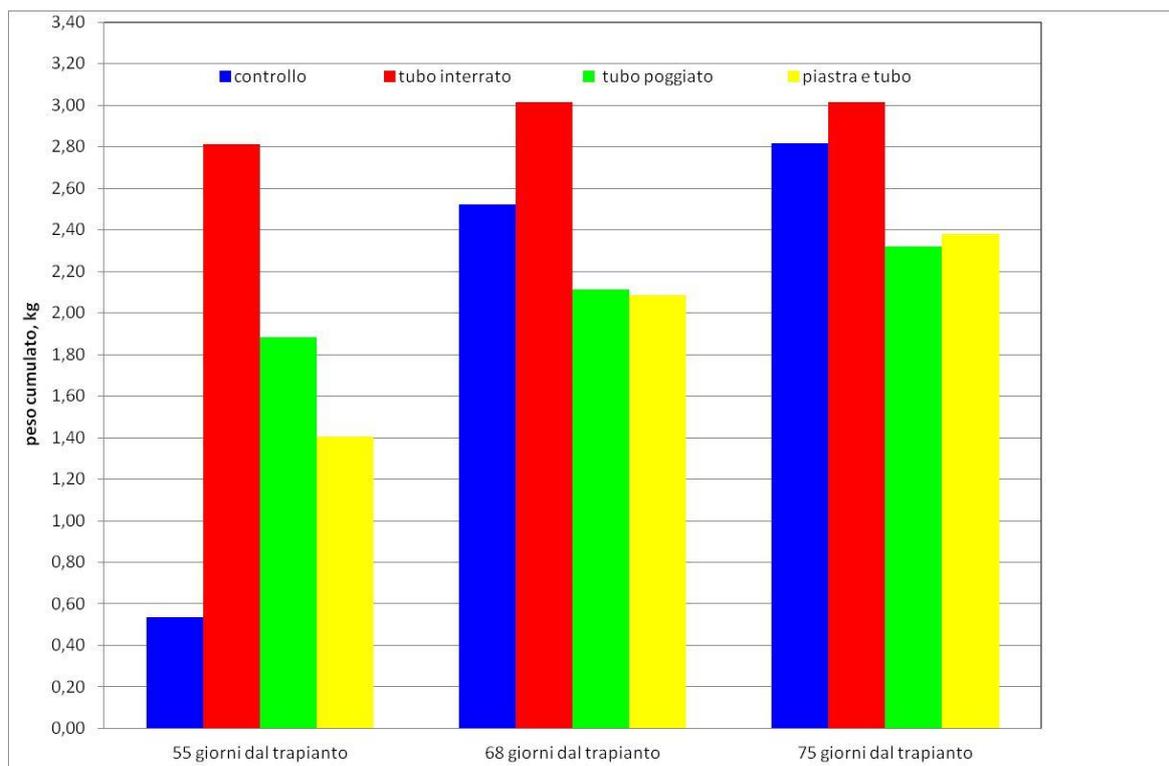


Figura 53. Raccolto cumulato medio della lattuga Romana; prova invernale.

La Figura 54 evidenzia l'incremento della lunghezza delle foglie di cicoria rispetto al giorno del trapianto. Si evince che le foglie di cicoria coltivate con il sistema di distribuzione del caldo a tubo interrato sono sempre cresciute in lunghezza di più rispetto alle altre. Le foglie di cicoria cresciute meno sono quelle non riscaldate

localmente in alcun modo (controllo). La Figura 55 riporta l'incremento del numero di foglie di cicoria rispetto al trapianto. Si evince che le piante di cicoria coltivate con il sistema di distribuzione del caldo a tubo interrato hanno manifestato in media un incremento maggiore di foglie rispetto alle piante coltivate con gli altri sistemi di distribuzione del caldo localizzato e al controllo. Il minore incremento di foglie si è registrato per le piante non riscaldate localmente in alcun modo (controllo). Il riscaldamento del terreno, rispetto al riscaldamento dell'aria, ha influenzato maggiormente la crescita delle piante di cicoria. Il sistema di distribuzione del caldo a tubi poggiati riscalda sia il substrato di coltivazione sia l'aria in prossimità della pianta stessa, mentre il sistema localizzato con piastra e tubo riscalda le piante mediante superfici radiative.

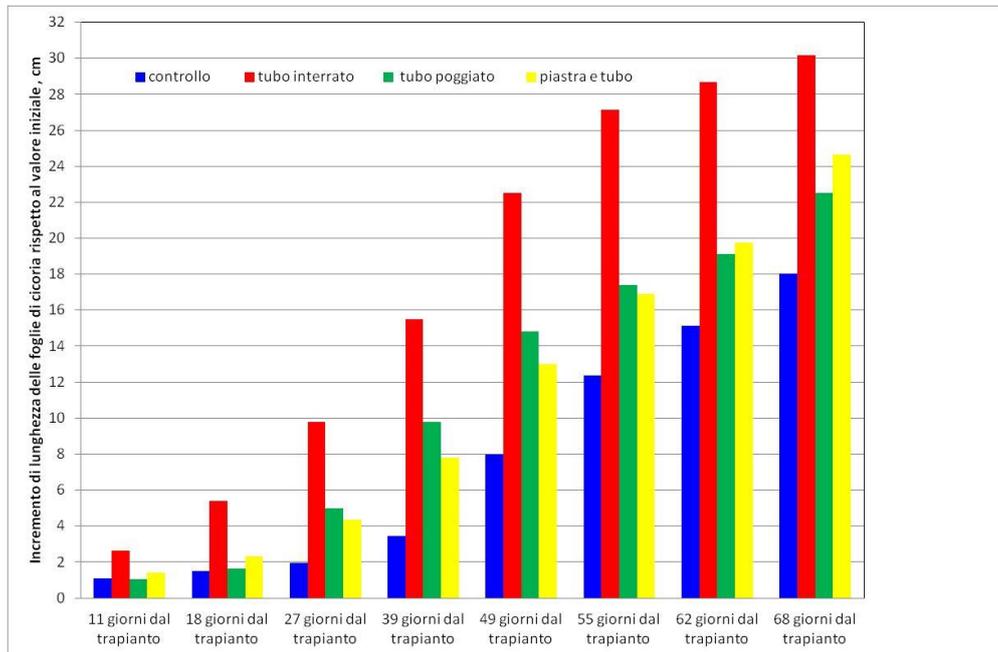


Figura 54. Incremento medio della lunghezza delle foglie di cicoria rispetto al giorno del trapianto; prova invernale.

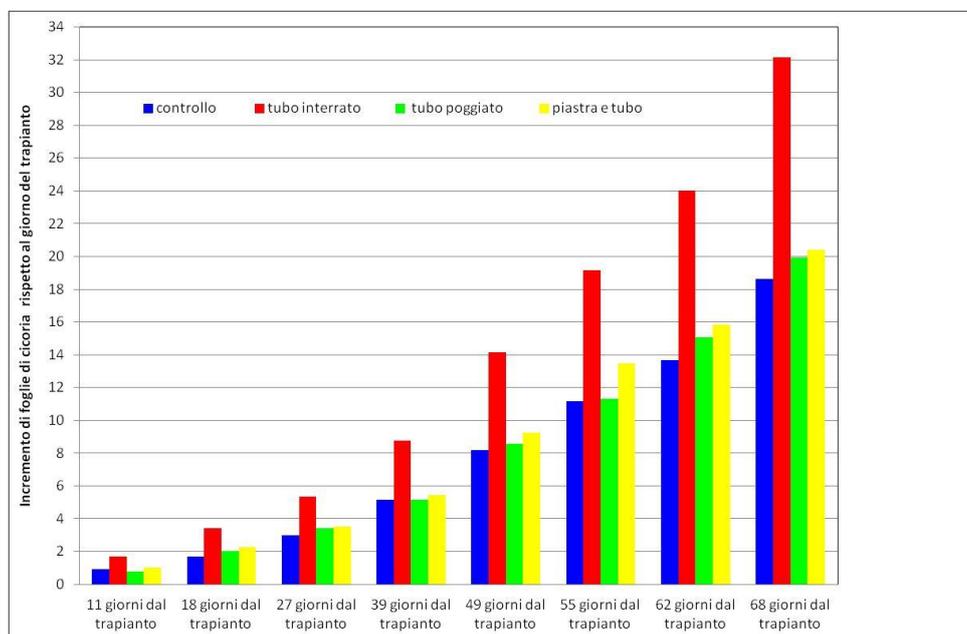


Figura 55. Incremento medio del numero di foglie di cicoria rispetto al giorno del trapianto; prova invernale.

La prova sperimentale invernale effettuata ha messo in evidenza che il sistema di distribuzione del caldo localizzato con tubi interrati ha contribuito ad un maggiore sviluppo delle cicorie (Figura 54 e Figura 55) rispetto agli altri sistemi.

In riferimento alla coltivazione invernale di lattuga Romana è stato eseguito un Panel test. Si tratta di un metodo di analisi sensoriale per valutare le caratteristiche organolettiche della lattuga attraverso gli organi di senso (vista, olfatto, gusto, udito, tatto). Per assaggiare il prodotto ed esprimere un giudizio sono state individuate delle persone comuni in modo che il gruppo di assaggiatori sia corrispondente alle reazioni reali (PANEL POPOLARE). A causa della pandemia di COVID-19 i campioni da assaggiare e i relativi questionari sono stati consegnati a domicilio di ciascun assaggiatore (Home test). Essendo statisticamente provato che bastano gruppi di 10 persone, scelte a caso in una popolazione, il test è stato eseguito su un numero contenuto di assaggiatori.

L'analisi è stata condotta in forma anonima; è stato richiesto di rispondere a un questionario (Tabella 4) per valutare con i sensi la lattuga Romana esprimendo un giudizio da 1 a 10 su caratteristiche visive, olfattive, gustative e tattili. È stato richiesto di esprimere un giudizio totale sulla gradevolezza complessiva.

Sono stati individuati 42 assaggiatori, il 59.5% donne e il 40.5% uomini. Come si evince dalla Figura 56, gli assaggiatori scelti hanno età diverse e sono studenti, lavoratori, pensionati e casalinghe.

Dall'analisi dei questionari raccolti si è evinto che gli assaggiatori hanno evidenziato migliori caratteristiche organolettiche generali per le lattughe riscaldate con piastra e tubo (Figura 57). La lattuga Romana riscaldata con sistema localizzato con piastra e tubo ha ottenuto il 45% di giudizi complessivi massimi mentre la lattuga non riscaldata localmente (controllo) ha ottenuto il minor punteggio complessivo massimo (Figura 57). Gli intervistati hanno espresso nel complesso giudizi da 10 a 8 mentre solo il 9% degli intervistati ha espresso un giudizio totale pari a 7 sulle lattughe senza alcun riscaldamento localizzato (controllo).

Per quanto riguarda l'aspetto visivo, gli assaggiatori hanno evidenziato un colore verde più marcato per le lattughe riscaldate con tubi poggiati e per le lattughe non riscaldate localmente (controllo) mentre le meno verdi sono risultate le lattughe coltivate con il sistema di riscaldamento localizzato a tubi interrati. Il colore più brillante è stato riscontrato per le lattughe riscaldate con piastra e tubo mentre quello meno brillante per le lattughe riscaldate con tubo interrato. Le lattughe riscaldate con piastra e tubo hanno avuto le migliori votazioni per consistenza, forma e dimensione. La presenza di qualche imperfezione è stata evidenziata per tutte le tipologie di riscaldamento e per il controllo.

Per quanto riguarda l'aspetto olfattivo, il miglior giudizio sull'odore e sull'aroma è stato espresso per le lattughe riscaldate con piastra e tubo mentre il peggior giudizio per le lattughe riscaldate con tubo poggiato.

Per quanto riguarda l'aspetto gustativo, il miglior giudizio è stato espresso per le lattughe riscaldate con piastra e tubo e il peggior giudizio per le lattughe riscaldate con tubo poggiato.

Un sapore dolce è stato riscontrato dal 100% degli intervistati per le lattughe riscaldate con piastra e tubo, dal 92% per le lattughe riscaldate con tubo interrato, dal 73% per il controllo, e dal 67% per le lattughe riscaldate con tubo poggiato. La presenza di sapori estranei è stata rilevata dal 33% degli intervistati per le lattughe riscaldate con piastra e tubo, dal 22% per le lattughe con tubo poggiato, dal 22% per le lattughe con tubo interrato e dal 18% per le lattughe non riscaldate localmente.

Per quando riguarda le considerazioni sull'aspetto tattile, sono state giudicate complessivamente migliori le lattughe riscaldate con piastra e tubo mentre gli assaggiatori hanno espresso valutazioni inferiori per le lattughe riscaldate con tubo interrato.

Tabella 4. Questionario del Home Panel Test eseguito su lattuga Romana.

HOME PANEL TEST										
Lattuga Romana										
RISCALDAMENTO	Tubo interrato		Tubo poggiato		Piastra e tubo		Controllo			
Sesso	Donna			Uomo						
Età	<15	15-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	>80	
Professione	studente		Lavoratore attivo			pensionato		Altro:		
ASPETTO VISIVO										
Colore Verde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Brillantezza colore	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Consistenza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Forma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dimensione	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presenza imperfezioni	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ASPETTO OLFATTIVO										
Odore	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aroma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ASPETTO GUSTATIVO										
Gusto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Intensità	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Piacevolezza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Presenza sapori estranei	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tipologia sapore	DOLCE		SALATO		AMARO		ACIDO		ALTRO	
ASPETTO TATTILE										
Durezza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Crocantezza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masticabilità	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tenerezza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sazietà	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
GIUDIZIO TOTALE										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Scala da 1 (Per nulla) a 10 (Estremamente)										

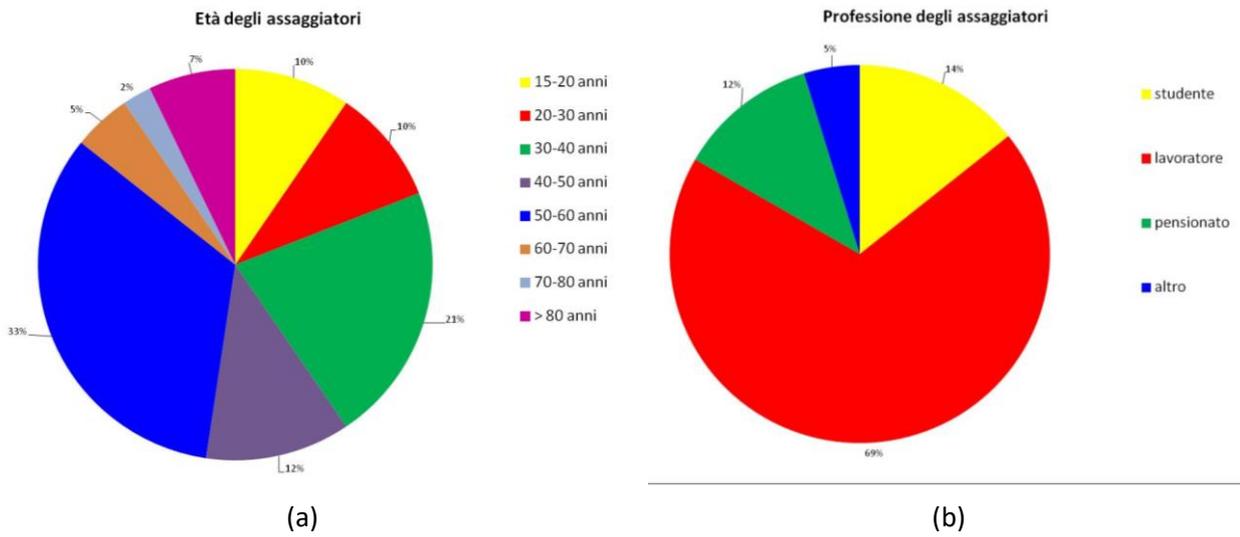


Figura 56. Età (a) e professione(b) degli assaggiatori del PANEL Test.

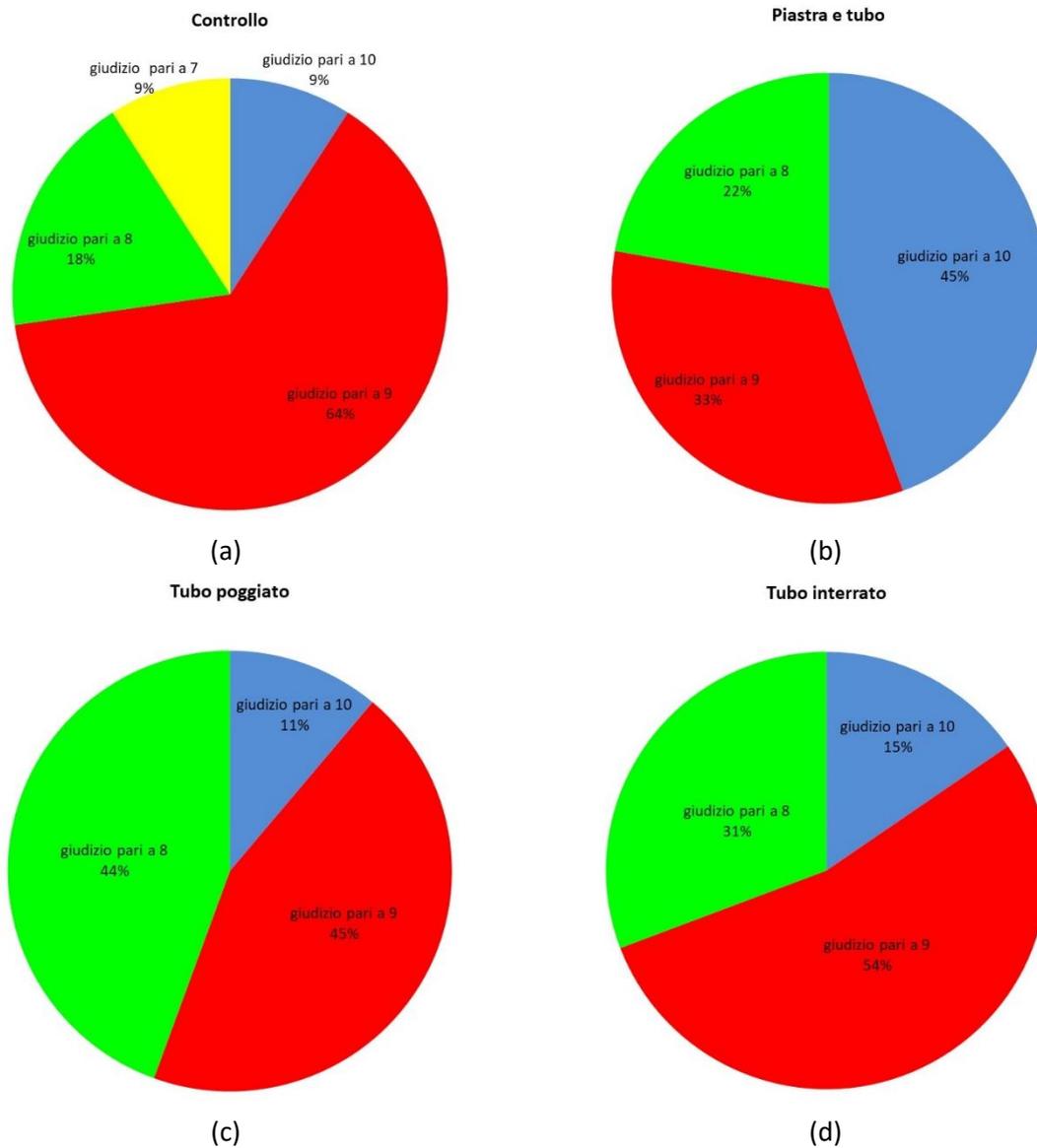


Figura 57. Giudizio complessivo espresso dagli assaggiatori del PANEL Test sulla lattuga Romana coltivata con i diversi sistemi di distribuzione del caldo: a) controllo; b) piastra e tubo; c) tubo poggiato; d) tubo interrato.

2.2.3.1 Parametri climatici esterni, microclima, monitoraggio

Il periodo di prove compreso tra il 17 dicembre 2020 e il 2 marzo 2021 è stato caratterizzato dai valori di temperatura dell'aria esterna e di radiazione solare riportati in Tabella 5. La massima temperatura è stata registrata il 10 febbraio, mentre la minima il 17 gennaio. Nella Figura 58 sono mostrati i valori medi giornalieri della temperatura dell'aria. La temperatura giornaliera media massima, pari a 14.4 °C, è stata rilevata il 10 febbraio, mentre la minima, pari a 2.9 °C, il 14 febbraio. La Figura 59 mostra i valori giornalieri di radiazione solare cumulata. Il valore massimo (15.6 MJ m⁻²) è stato registrato il 1 marzo, mentre il minimo (0.1 MJ m⁻²) il 27 dicembre. Mediamente, l'apporto di radiazione solare si è progressivamente incrementato passando da dicembre a marzo; nel complesso è stato pari a 536.0 MJ m⁻² durante l'intero periodo.

Tabella 5. Massima, media e minima temperatura dell'aria esterna e media della radiazione solare cumulata giornaliera presso il campo sperimentale, 17 dicembre 2020-2 marzo 2021.

Temperatura dell'aria esterna			Radiazione solare cumulata giornaliera media
Massima	Media	Minima	
20.0 °C	9.0 °C	-0.1 °C	7.1 MJ m ⁻²

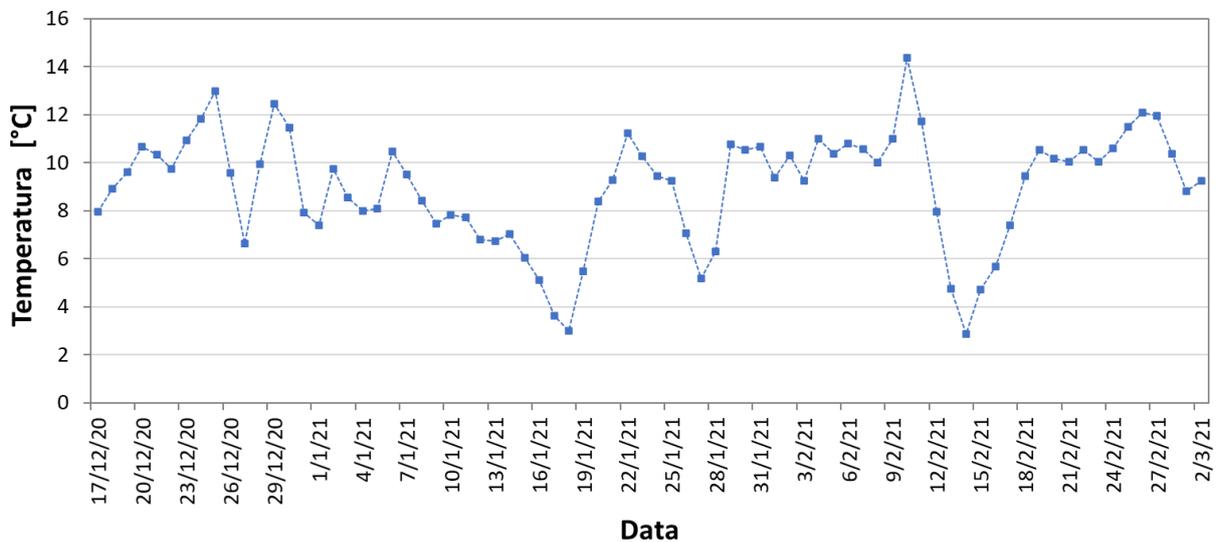


Figura 58. Temperatura media giornaliera dell'aria esterna presso il campo sperimentale, 17 dicembre 2020-2 marzo 2021.

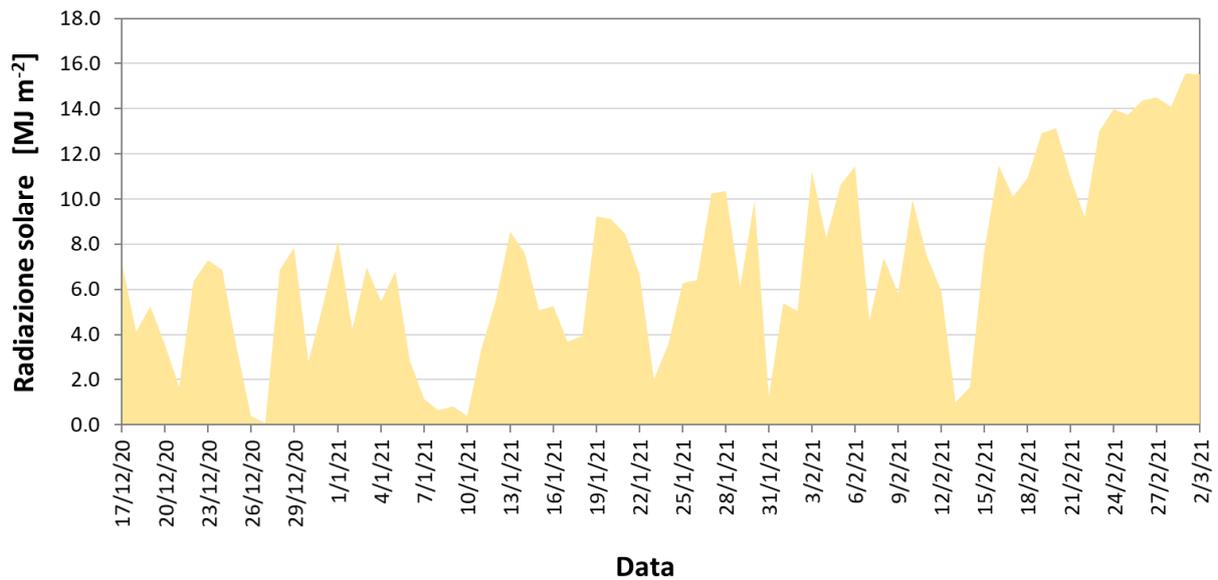


Figura 59. Radiazione solare cumulata giornaliera presso il campo sperimentale, 17 dicembre 2020-2 marzo 2021.

Nel corso dello svolgimento della prova invernale, l’energia solare accumulata durante il giorno è stata stoccata nel serbatoio caldo da 2000 l. Nelle ore notturne, l’energia termica accumulata è stata utilizzata per il riscaldamento delle piante. Le condizioni meteorologiche hanno fortemente influenzato l’accumulo termico. La Figura 60 mostra l’energia catturata dai collettori solari e immagazzinata nel serbatoio caldo il 1° febbraio 2021. L’energia solare accumulata durante l’intera giornata è stata pari a 37.2 MJ, mentre l’energia fornita alle piante mediante una linea del sistema a piastra e tubo pari a 134.4 MJ e da una linea di tubi interrati pari a 168.7 MJ. La differenza di energia necessaria per il riscaldamento delle piante su tutte le linee è stata fornita dalla pompa di calore aria-acqua.

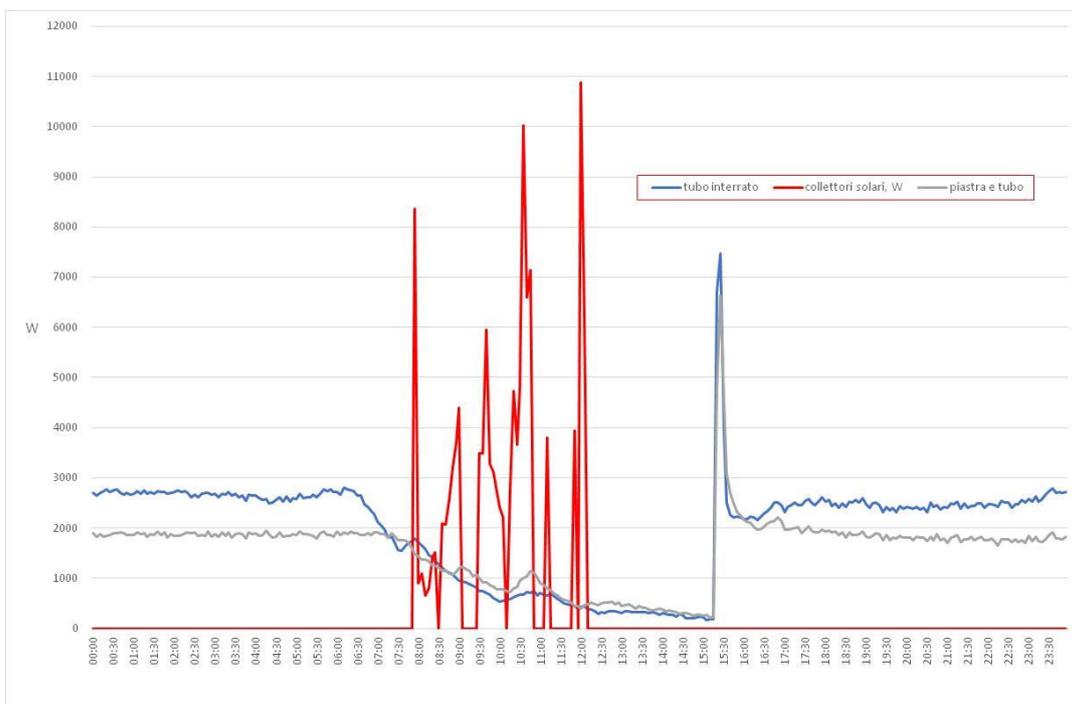


Figura 60. Energia termica accumulata dai collettori solari e immagazzinata nel serbatoio caldo da 2000 l (collettori solari), energia termica fornita all’area di coltivazione da una linea del sistema a piastre (piastra e tubo) e da una linea di tubazioni interrate (tubo interrato).

Durante la sperimentazione sono stati costantemente monitorati i valori di temperatura dell'aria e del suolo relativi al controllo e ai tre sistemi di riscaldamento localizzato. Tali dati sono stati analizzati. Le Figura 61–Figura 62 mostrano la temperatura dell'aria e la temperatura del suolo registrate in corrispondenza di valori di temperatura dell'aria in serra inferiori a 15.0 °C, nei giorni 9–11 gennaio 2021. Questo periodo è stato caratterizzato da una temperatura media dell'aria esterna di 7.7 °C e da valori minimo e massimo pari rispettivamente a 5.0 °C e 10.8 °C.

I valori medi di temperatura dell'aria e del suolo in corrispondenza del controllo e dei tre sistemi di riscaldamento localizzato sono riportati in Tabella 6. La massima temperatura dell'aria è stata registrata in corrispondenza del sistema a tubi poggiati, mentre la minima nel caso dei tubi interrati. Per quanto riguarda la temperatura del suolo, invece, il sistema che ha permesso di riscaldare maggiormente il terreno è stato quello a tubi interrati, mentre il sistema a piastra e tubo è risultato quello meno vantaggioso. Sono state, quindi, confrontate le temperature dell'aria e del suolo registrate in corrispondenza dei tre sistemi di riscaldamento localizzato con quelle del controllo. Relativamente all'aria, il massimo incremento (+4.0%), pari a 0.4 °C, si è registrato nel sistema a tubi poggiati. Nel caso del sistema a tubi interrati, invece, si è ottenuta una riduzione (-3.3%) di temperatura dell'aria rispetto al controllo di 0.4 °C. Di contro, il sistema a tubi interrati è risultato il migliore per riscaldare il suolo, facendo registrare un incremento (+69.7%) di 7.6 °C rispetto al controllo. Il sistema a piastra e tubo, invece, ha permesso di ottenere il più basso incremento (+3.0%) di temperatura del suolo, pari a 0.3 °C.

Nel complesso, si è quindi osservato che i migliori sistemi per riscaldare l'aria e il suolo sono rispettivamente quello a tubi poggiati e quello a tubi interrati. Il sistema a piastra e tubo è in grado di fornire un beneficio sia con riferimento all'aria che al suolo, ma di entità minore.

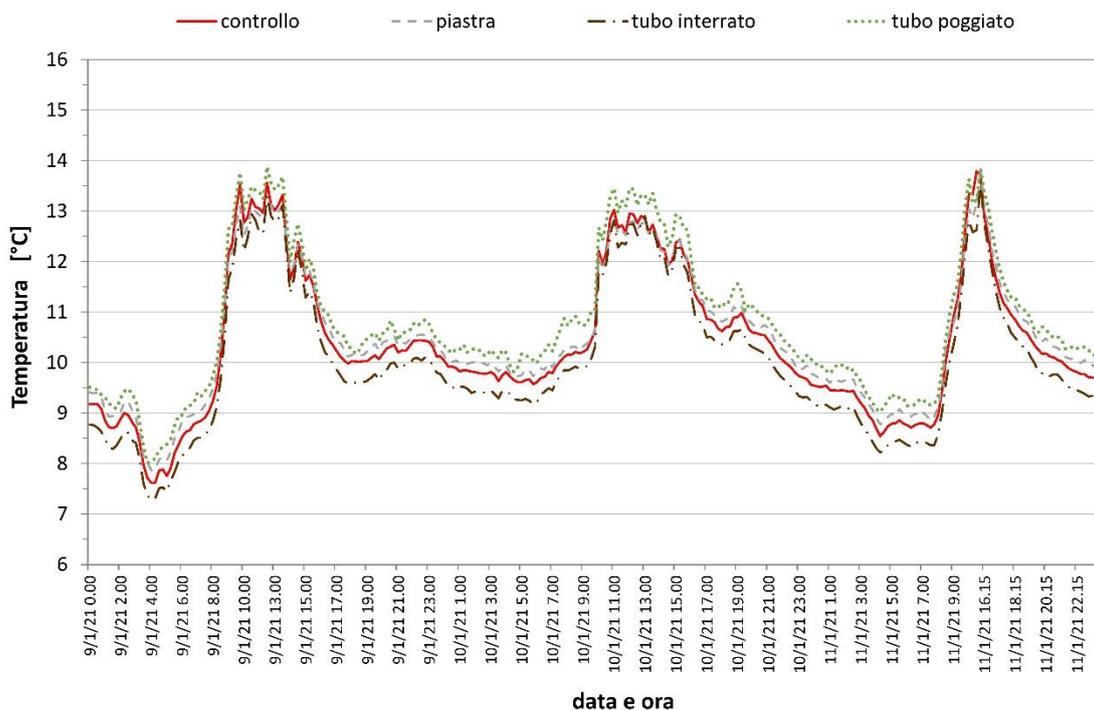


Figura 61. Temperatura dell'aria in prossimità del controllo e dei tre sistemi di riscaldamento localizzato, 9–11 gennaio 2021.

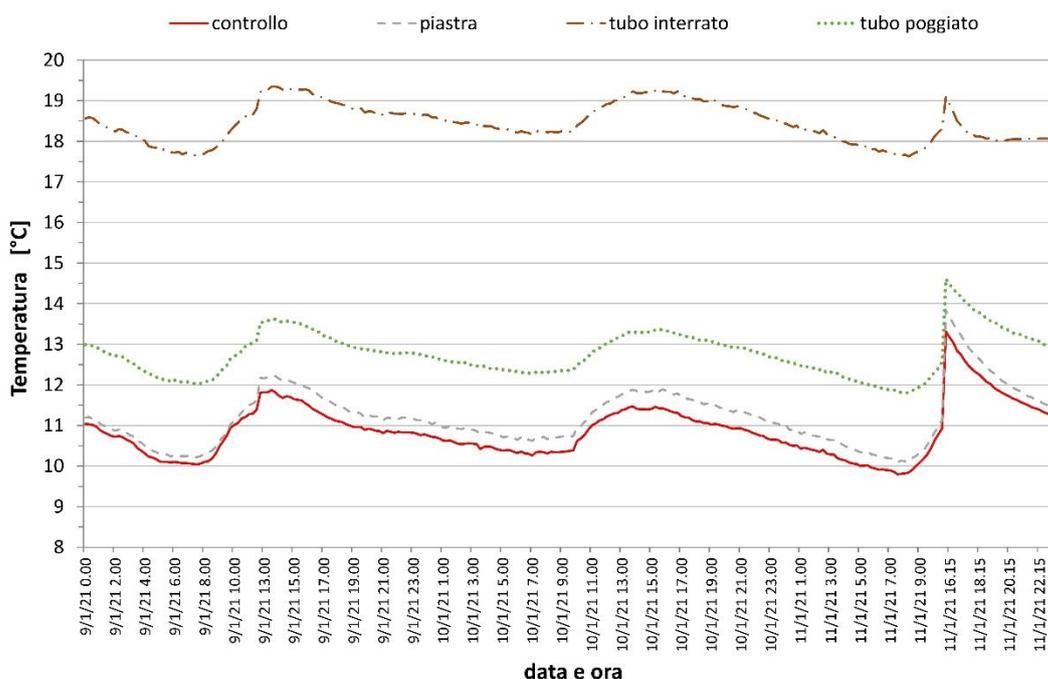


Figura 62. Temperatura del suolo in corrispondenza del controllo e dei tre sistemi di riscaldamento localizzato, 9–11 gennaio 2021.

Tabella 6. Valori medi di temperatura dell’aria e del suolo relativi al controllo e ai tre sistemi di riscaldamento localizzato, 9–11 gennaio 2021.

	Temperatura [°C]	
	Aria	Suolo
Controllo	10.4	10.9
Piastra e tubo	10.5	11.2
Tubo interrato	10.0	18.5
Tubo poggiato	10.8	12.8

In appendice sono riportati in Figura A 2 i dati climatici medi e cumulati del periodo compreso tra il 1 novembre 2020 e il 31 marzo 2021. Il database delle condizioni meteorologiche e lo stato dell’impianto di riscaldamento, campionati ogni 15 min, sono riportati nella Tabella A 2 per tre giorni campione del periodo.

2.2.4 Parametri caratteristici dell’impianto

Durante le prove di funzionamento dell’impianto di poligenerazione nel periodo estivo ed invernale 2020 sono stati misurati i parametri caratteristici dell’impianto, i consumi di biomassa della caldaia e di energia elettrica dei componenti ausiliari.

I valori della portata del fluido termovettore (acqua calda e/o fredda) misurati nelle tubazioni di collegamento dei diversi sistemi che compongono l’impianto di poligenerazione sono evidenziati nella Tabella 7.

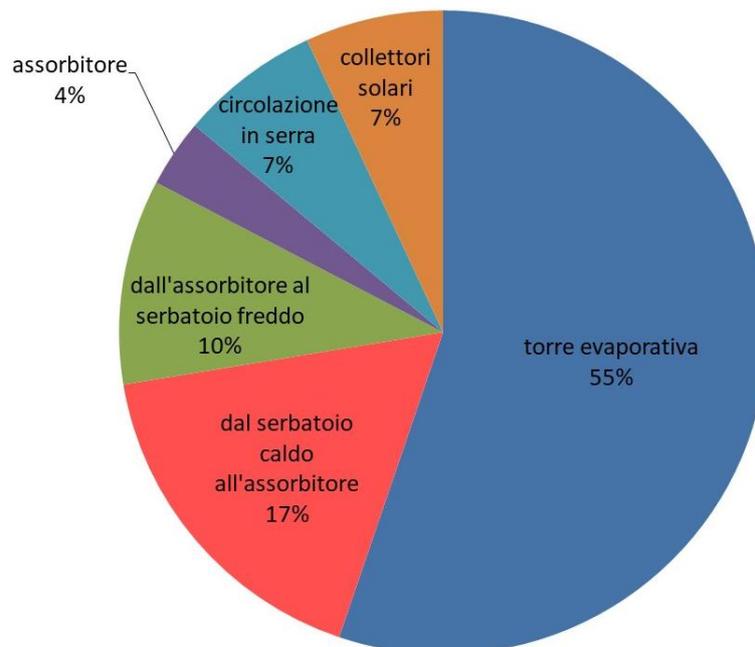
Tabella 7. Portata del fluido termovettore (acqua calda e/o fredda).

	Portata ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Portata (l min^{-1})
dai collettori solari al serbatoio caldo	$0.0007 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	42 l min^{-1}
dal serbatoio caldo all'assorbitore	$0.0008 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	48 l min^{-1}
dall'assorbitore alla torre evaporativa	$0.0028 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	168 l min^{-1}
dall'assorbitore al serbatoio freddo	$0.0005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	30 l min^{-1}
dal serbatoio freddo al serbatoio ausiliario	$0.0003 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	18 l min^{-1}
dalla pompa di calore aria-acqua al serbatoio ausiliario	$0.0018 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	105 l min^{-1}

La potenza elettrica assorbita dall'assorbitore è pari a 48 W.

Il consumo di energia elettrica per il funzionamento di tutti i componenti ausiliari dell'impianto di solar cooling è pari a 2.02 kW. Nel periodo estivo è stato verificato che (Figura 63):

- la torre evaporativa, con la sua pompa trifase, utilizza il 55.2% della potenza complessiva;
- la pompa che viene utilizzata per movimentare l'acqua dal serbatoio caldo all'assorbitore utilizza il 17.2% della potenza complessiva;
- la pompa utilizzata per movimentare l'acqua dall'assorbitore al serbatoio freddo utilizza il 10.3% della potenza complessiva;
- per immettere l'acqua fredda in circolazione nella serra si utilizza il 7.0% della potenza complessiva;
- per far circolare l'acqua calda all'interno dei collettori solari si utilizza il 6.9% della potenza complessiva;
- l'assorbitore utilizza il 3.4% della potenza complessiva.


Figura 63. Consumi di energia elettrica per il funzionamento estivo dei componenti dell'impianto di solar cooling.

Nel periodo estivo la caldaia a biomassa ha utilizzato circa 9 kg/ora di nocciolino di ulivo; con un costo del nocciolino di circa 32 €/q, l'utilizzo della caldaia a biomassa ha un costo di circa 2.88 €/ora.

Al termine delle prove il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha constatato che il sistema di distribuzione dell'energia termica nell'area di coltivazione, in termini di potenze, sezione e numero dei tubi, è stato dimensionato in modo opportuno per gli scopi prefissati. Il dimensionamento delle tubazioni del sistema di distribuzione è risultato opportuno in termini di tipologia di tubazioni usate, sezione dei diametri, posizionamento dei tubi, lunghezze dei tubi.

Si è constatata però la necessità di coibentare meglio le tubazioni all'esterno e all'interno della serra per limitare al massimo le dispersioni termiche.

2.3 Definizione di sistemi passivi di risparmio energetico

A seguito della crescente richiesta di prodotti di qualità il comparto serricolo è interessato dall'introduzione di tecnologie ed impianti finalizzati ad ottenere un controllo del microclima dell'apprestamento protetto sempre più accurato. Il microclima ottimale per la crescita delle piante è ovviamente connesso al clima dell'area geografica, alla scelta del materiale di copertura della serra, alla stagione colturale e alla specie coltivata. Per il conseguimento di tale obiettivo, si è assistito ad un uso crescente di impianti di climatizzazione che utilizzano energia di origine fossile con incrementi non trascurabili dei costi per i serricoltori e del carico ambientale del comparto serricolo. Soluzioni tecnologiche per ridurre i consumi energetici sono auspiccate al fine di ridurre l'uso di combustibili fossili e gli impatti ambientali associati (Hernandez et al., 2017). L'uso di tecnologie per il condizionamento climatico che sfruttano le energie rinnovabili e sistemi passivi per migliorare l'efficienza energetica della serra sono consigliati.

I sistemi di condizionamento possono essere sistemi attivi, passivi o combinati. Nella modalità attiva, gli impianti di condizionamento forniscono caldo/freddo, prelevato da altre fonti, all'ambiente interno per aumentare/diminuire la temperatura interna. Nei sistemi passivi, l'energia solare radiativa viene immagazzinata e utilizzata per riscaldare/raffrescare la serra. I sistemi di condizionamento passivi possono anche essere combinati con quelli attivi per ridurre i costi energetici (Ahamed et al., 2019).

Per il condizionamento climatico estivo, sistemi passivi possono essere ventilazione naturale, reti ombreggianti, materiali di copertura caratterizzati da proprietà radiometriche tali da ridurre la trasmissione della radiazione solare nell'IR corto (Ahemd et al., 2016).

Per il condizionamento climatico invernale, sistemi passivi di risparmio energetico possono essere: schermi termici interni, coperture in film plastico a doppio strato, materiali con bassa trasmittanza nell'IR lungo, lastre in plastica rigida di tipo alveolare con intercapedine.

La scelta dello schermo termico varia in funzione del materiale con cui è realizzato e della modalità, fissa o mobile, richiesta dalla coltivazione in atto. Gli schermi termici fissi sono costituiti da materiali plastici trasparenti, quali film in PE o EVA, di spessore molto ridotto in modo da attenuare la riduzione di radiazione solare incidente. È una soluzione poco costosa che consente un risparmio che può essere del 10-35% rispetto alla presenza del singolo materiale di copertura.

Gli schermi termici mobili rimangono in opera solo durante la notte e vengono utilizzati per diminuire le perdite di calore per irraggiamento e per conduzione e convezione (Figura 64). Gli schermi termici mobili possono essere realizzati in film di PE alluminati, teli in etilene, polipropilene o poliestere colorati, incolori o alluminati. Gli schermi termici tessuti consentono risparmi energetici fino al 40% e offrono il vantaggio, anche economico, di poter essere utilizzati anche per il controllo fotoperiodico o per l'ombreggiamento. Gli schermi termici riflettenti consentono risparmi che possono raggiungere il 50%, ma generalmente sono più costosi e meno resistenti.

Gli schermi termici mobili sono realizzati con materiali caratterizzati da idonee proprietà meccaniche, oltre che radiometriche, tali da poter essere aperti e chiusi in funzione della gestione del microclima all'interno della serra. Durante il giorno, gli schermi termici mobili vengono riavvolti per consentire l'ingresso del riscaldamento; producono comunque un lieve ombreggiamento sul piano di coltivazione. Gli schermi mobili

sono realizzati con fogli di materiali plastici contigui collegati tra loro ma sono meno ermetici rispetto agli schermi termici fissi.

L'uso di tali schermi termici può ridurre del 23-60% la domanda di energia per il riscaldamento a seconda della posizione e del tipo di schermo. Le proprietà radiometriche degli schermi termici, e in particolare la riflessività nell'IR lungo (Figura 65), influenzano il risparmio energetico. La riflessività è la capacità del materiale di riflettere le onde della radiazione incidente nello stesso emisfero che contiene la radiazione incidente. Nel range di lunghezza d'onda dell'IR lungo, compreso fra 2500 e 25000 nm, il materiale testato presso l'Università di Bari ha una riflessività pari al 47.8% e una trasmittanza pari al 9.5%. Lo schermo termico limita la trasmittanza delle onde elettromagnetiche nell'IR lungo mentre consente la riflessione di tali onde all'interno del volume della serra incrementando l'effetto serra e il risparmio energetico.

Il risparmio energetico potrebbe arrivare fino al 90% se gli schermi termici venissero utilizzati insieme a sistemi di accumulo di calore come letto di roccia (Sethi and Sharma, 2008).

Lo schermo termico mobile può evitare l'insorgenza dell'inversione termica (la temperatura dell'aria in serra è inferiore rispetto all'aria esterna), che si verifica frequentemente di notte nelle serre mediterranee in condizioni di cielo sereno. La principale perdita di calore della serra è dovuta allo scambio di radiazioni infrarosse lontane (FIR) che è più alto nelle notti serene. Lo schermo termico agisce come barriera a FIR, riducendo le perdite di calore (Hernandez et al., 2017).



Figura 64. Schermo termico mobile utilizzato presso il campo sperimentale dell'Università di Bari

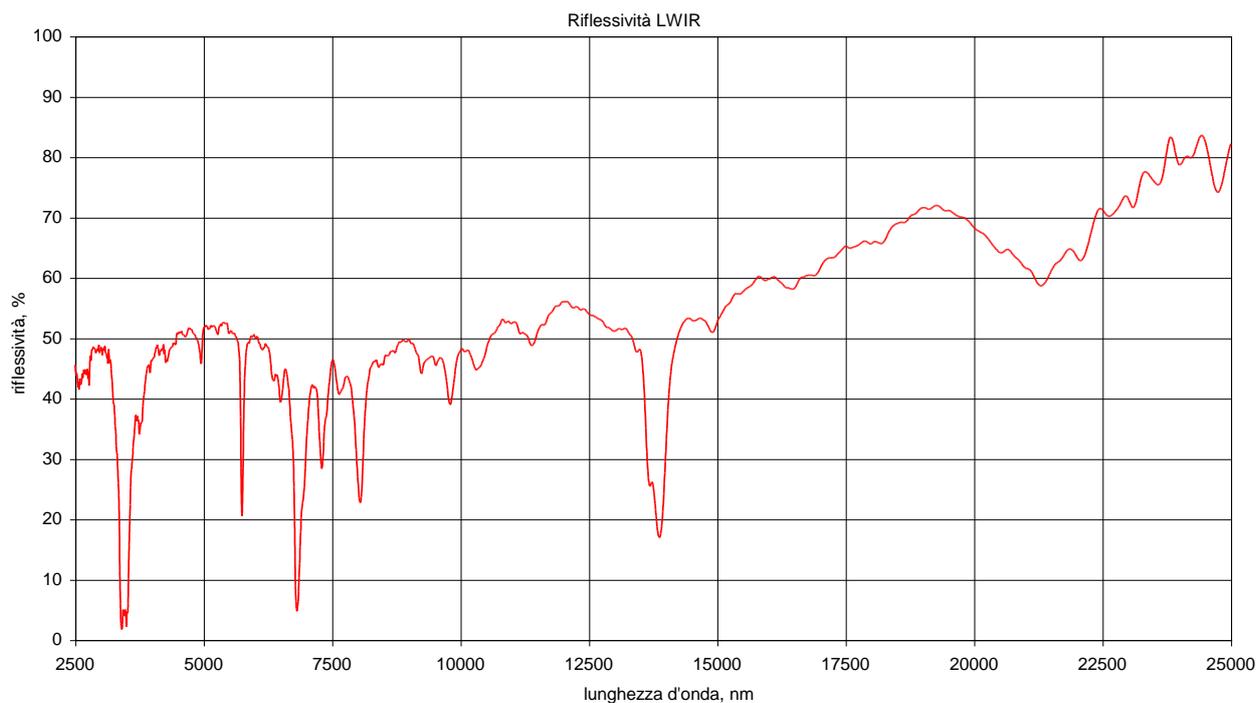


Figura 65. Curva di riflessività dello schermo termico utilizzato presso il campo sperimentale dell'Università di Bari nel range di lunghezza d'onda dell'IR lungo compreso fra 2500 e 25000 nm.

2.4 Pubblicazioni del gruppo di ricerca

I risultati ottenuti dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari e dall'ENEA UTEE AGR non sono stati presentati durante convegni o incontri durante il 2020 per le restrizioni imposte a causa del COVID-19 a livello nazionale ed internazionale.

Un articolo è stato pubblicato:

1. Puglisi, G., Vox, G., Campiotti, C.A., Scarascia Mugnozza, G. and Schettini, E., "Experimental results of a solar cooling system for greenhouse climate control", *Acta Horticulturae*, 1296 (2020), pp. 1107-1114, DOI: 10.17660/ActaHortic.2020.1296.140.

3 Conclusioni

Il controllo delle condizioni climatiche all'interno di un ambiente confinato e l'estensione dei cicli produttivi per l'intero arco dell'anno influenzano la progettazione della serra e degli impianti di condizionamento climatico. Per ridurre i costi legati ai consumi energetici, gli impianti dovrebbero essere alimentati da fonti rinnovabili. L'attività di ricerca dell'Università di Bari si è focalizzata sull'utilizzo di sistemi innovativi basati sullo sfruttamento di fonti energetiche diversificate e rinnovabili per il raffrescamento e riscaldamento delle colture in serra. Lo studio è stato supportato da una campagna di sperimentazione su una serra sperimentale condizionata mediante un impianto di solar cooling/heating integrato con una caldaia a biomassa e una pompa di calore aria-acqua.

Sono stati sperimentati e monitorati tre sistemi di distribuzione del freddo/caldo in prossimità della zona di coltivazione in serra. Un sistema di condizionamento localizzato prevede l'impiego di tubi interrati nel substrato di coltivazione, il secondo è caratterizzato da tubi appoggiati sul substrato di coltivazione, il terzo, denominato piastra e tubo, è costituito da piastre metalliche raffreddate/riscaldare da tubi in acciaio e poste nella zona aerea delle piante.

Nel 2020 la serra sperimentale è stata raffrescata mediante l'impianto di solar cooling integrato con la caldaia a biomassa ed è stata riscaldata utilizzando i collettori solari integrati con la pompa di calore aria-acqua.

La prova sperimentale estiva effettuata ha messo in evidenza che il sistema di distribuzione del freddo localizzato con tubo poggiato sul terreno ha contribuito al massimo raccolto cumulato.

La prova sperimentale invernale effettuata ha messo in evidenza che il sistema di distribuzione del caldo localizzato con tubi interrati ha contribuito ad un maggiore sviluppo delle piante e dunque ad un maggiore raccolto rispetto agli altri sistemi.

Sulla base dei dati raccolti, si può concludere che:

- i sistemi di raffrescamento testati non hanno avuto un effetto sensibile di modificazione della temperatura dell'aria, quindi l'effetto di raffrescamento convettivo dell'aria è risultato limitato.
- i migliori sistemi di condizionamento localizzato per riscaldare l'aria e il suolo sono stati rispettivamente quello a tubi poggiati e quello a tubi interrati. Il sistema a piastra e tubo è in grado di fornire un beneficio sia con riferimento all'aria che al suolo, ma di entità minore.

Il condizionamento climatico può essere incrementato attraverso l'uso di sistemi passivi di risparmio energetico. In estate possono essere utilizzati teli ombreggianti, in inverno schermi termici mobili.

Gli schermi termici mobili possono essere messi in opera in inverno durante la notte al fine di diminuire le dispersioni di calore per irraggiamento, conduzione e convezione. Lo schermo termico agisce come barriera alle onde elettromagnetiche nel range di lunghezza d'onda dell'IR lungo compreso fra 2500 e 25000 nm, riducendo così le perdite di calore e incrementando l'effetto serra. Se lo schermo termico è realizzato in materiale plastico alluminato può essere utilizzato anche in estate di giorno per il controllo fotoperiodico o per l'ombreggiamento.

4 Riferimenti bibliografici

1. M. S. Ahamed, H. Guo, K. Tanino, "Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses", *Biosystems Engineering*, 178 (2019), pp. 9-33, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017.
2. H. A. Ahemd, A. A. Al-Faraj, A. M. Abdel-Ghany, "Shading greenhouses to improve the microclimate, energy and water saving in hot regions: A review", *Scientia Horticulturae*, 201 (2016), pp.36-45, <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.01.030>.
3. K. Benis, I. Turan, C. Reinhart, P. Ferrão, "Putting rooftops to use – A Cost-Benefit Analysis of food production vs. energy generation under Mediterranean climates", *Cities*, 78 (2018), pp. 166-179, DOI: 10.1016/j.cities.2018.02.011.
4. E. Cuce, D. Harjunowibowo, P.M. Cuce, "Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64 (2016), pp. 34-59, DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.077.
5. J. Hernández, S. Bonachela, M. R. Granados, J. C. López, J. J. Magán, J. I. Montero, "Microclimate and agronomical effects of internal impermeable screens in an unheated Mediterranean greenhouse", *Biosystems Engineering*, 163 (2017), pp. 66-77, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.012>.
6. J. Muñoz-Liesa, S. Toboso-Chavero, A. Mendoza Beltran, E. Cuerva, E. Gallo, S. Gassó-Domingo, A. Josa, "Building-integrated agriculture: Are we shifting environmental impacts? An environmental assessment and structural improvement of urban greenhouses", *Resources, Conservation and Recycling*, 169 (2021), 105526, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105526>.
7. A. Nadal, P. Llorach-Massana, E. Cuerva, E. López-Capel, J.I. Montero, A. Josa, J. Rieradevall, M. Royapoor, "Building-integrated rooftop greenhouses: an energy and environmental assessment in the mediterranean context", *Appl. Energy*, 187 (2017), pp. 338-351, DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.11.051.

8. G. Papadakis, D. Briassoulis, G. Scarascia Mugnozza, G. Vox, P. Feuilleley, J.A. Stoffers, "Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials", *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 77(1) (2000), pp. 7-38, DOI: 10.1006/jaer.2000.0525.
9. G. Russo, A.S. Anifantis, G. Verdiani, G. Scarascia Mugnozza, "Environmental analysis of geothermal heat pump and LPG greenhouse heating systems", *Biosystems Engineering*, 127 (2014), pp. 11-23, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.08.002.
10. V.P. Sethi, S.K. Sharma, "Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications", *Solar Energy*, 82 (9) (2008), pp. 832-859, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.010>.
11. M. Teitel, L. Segal, A. Shklyar, M. Barak, "A comparison between pipe and air heating methods for greenhouses", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(3) (1999), pp. 259-273, DOI: 10.1006/jaer.1998.0370.
12. S. Toboso Chavero, A. Nadal, A. Petit-Boix, O. Pons, G. Villalba, X. Gabarrell, A. Josa, J. Rieradevall, "Towards Productive Cities: environmental Assessment of the Food-Energy-Water Nexus of the Urban Roof Mosaic", *J. Ind. Ecol.*, 23 (2018), pp. 767-780, DOI: 10.1111/jiec.12829.
13. G. Vox, E. Schettini, "Evaluation of the radiometric properties of starch-based biodegradable films for crop protection", *Polymer Testing*, 26(5) (2007), pp. 639-651, DOI: 10.1016/j.polymertesting.2007.03.010.
14. G. Vox, E. Schettini, A. Lisi Cervone, A. Anifantis, "Solar thermal collectors for greenhouse heating", *Acta Horticulturae*, 801 (2008), pp. 787-794, DOI: 10.17660/ActaHortic.2008.801.92.
15. G. Vox, M. Teitel, A. Pardossi, A. Minuto, F. Tinivella, E. Schettini, "Chapter 1: Sustainable Greenhouse Systems", *Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management*, (2010), Augusto Salazar e Ismael Rios Editors, Nova Science Publishers, Inc. NY USA. ISBN: 978-1-60876-269-9: 1-79.

5 Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro ha una lunga tradizione nell'insegnamento e nella ricerca scientifica nel campo dell'ingegneria agraria. L'area scientifica di maggiore interesse riguarda lo studio degli aspetti ingegneristici relativi alle strutture, agli impianti, ai materiali e all'energia concernenti gli insediamenti produttivi agricoli quali serre, allevamenti e industrie di trasformazione dei prodotti agricoli.

Le ricerche condotte dal gruppo di ricerca del Dipartimento DISAAT sono finalizzate a ridurre l'impatto ambientale dei sistemi produttivi agricoli mediante l'individuazione di impianti e materiali finalizzati alla riduzione dei consumi energetici, alla gestione dei reflui prodotti e all'introduzione delle energie rinnovabili.

Il gruppo di ricerca ha partecipato a numerosi progetti europei e nazionali, tra i quali: EC RTD "Biodegradable plastics for environmentally friendly mulching and low tunnel cultivation- Bioplastics" (2001-2005); EC LIFE Environment "Biodegradable coverages for sustainable agriculture – BIO.CO.AGRI." (2003-2005); EC CRAFT "Development of protective structures covered with permeable materials for agricultural use - AGRONETS" (2003-2006); EC Collective Research "Labelling agricultural plastic waste for valorising the waste stream - LABELAGRIWASTE" (2006-2009); MIPAF "Ricerche per il miglioramento della frutticoltura meridionale – FRU.MED." (2005-2011); Piano Annuale di Realizzazione 2012 "Modelli per l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici mediante la copertura con essenze vegetali in ambiente mediterraneo"; Piano Annuale di Realizzazione 2013 "Eco-Greenroof & Vertical Greenery System"; Piano Annuale di Realizzazione 2015 "Sistemi di climatizzazione innovativi per edifici e sistemi serra"; Piano Annuale di Realizzazione 2016 "Analisi comparativa e sviluppo di sistemi di distribuzione del freddo negli impianti di raffrescamento solare per serra"; Piano Annuale di Realizzazione 2017 "Analisi di tecniche di raffrescamento sostenibili applicabili in edifici civili e in edifici serra"; Piano Annuale di Realizzazione 2018 "Studio di tecniche di realizzazione di un prototipo di edificio con parete verde a microclima controllato per testare il modello del flusso energetico tra la parete verde e la superficie dell'edificio"; European Territorial Cooperation Programme Greece-Italy

2007-2013 “Agricultural Waste valorisation for a competitive and sustainable Regional Development - AWARD” (2013 - 2015); “Razionalizzazione d’uso delle risorse primarie per una peschicoltura sostenibile - SUS-PEACH”, finanziato dalla Regione Puglia (2017-2019); EC Erasmus+ Programme 2020, Action KA - Knowledge Alliances “Next Generation Training on Intelligent Greenhouses –NEGHTRA” (2020- 2023).

Il gruppo di ricerca è costituito da:

prof.ssa ing. Evelia Schettini – responsabile scientifico, Professore Associato, Ingegnere Civile, PhD in Ingegneria delle Strutture, esperta di materiali di copertura e di impianti per la climatizzazione delle serre.

prof. ing. Giuliano Vox – Professore Associato, Ingegnere Elettronico, esperto di energie rinnovabili, di microclima e di sensoristica ambientale.

Ing. Fabiana Convertino – Ingegnere Civile, Dottore di ricerca in “Biodiversità, agricoltura e Ambiente”, esperta di microclima.

Appendice

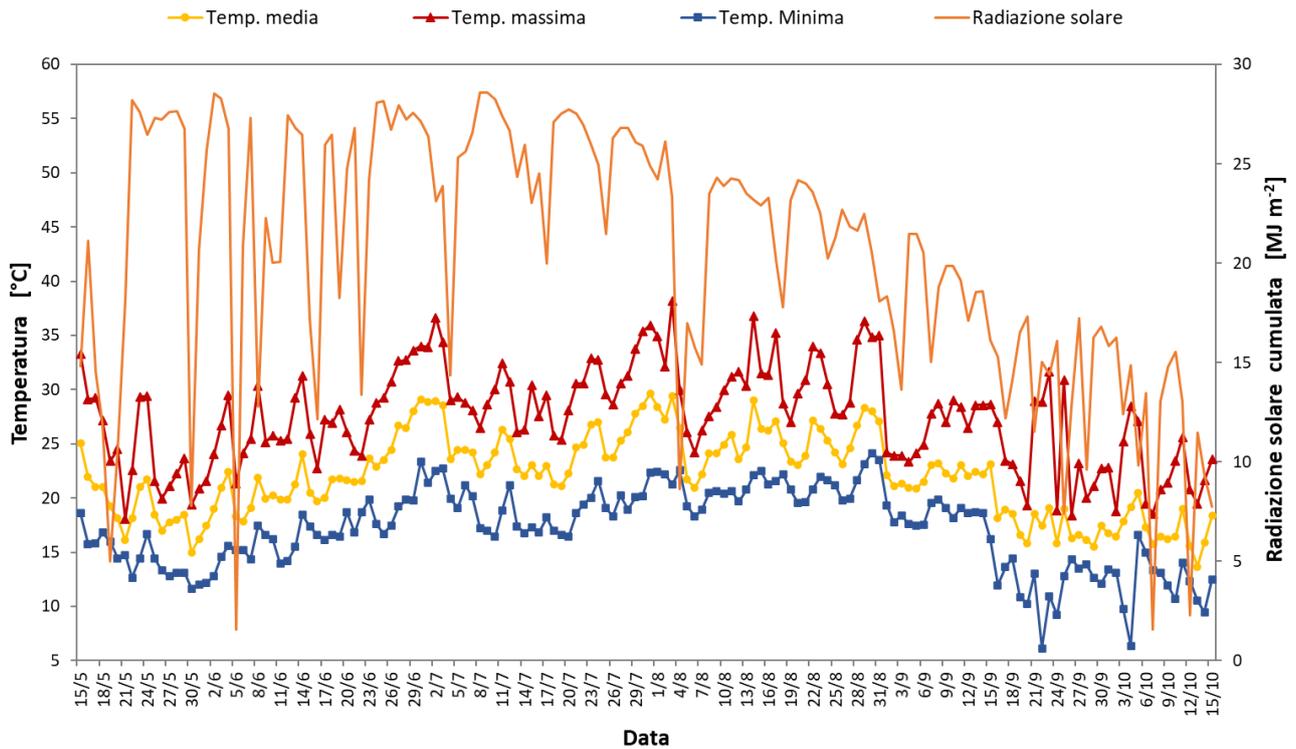


Figura A 1. Temperatura giornaliera media, massima e minima dell’aria esterna (asse principale) e radiazione solare cumulata giornaliera (asse secondario), periodo: 15 maggio–15 ottobre 2020.

Tabella A 1. Database delle condizioni climatiche (R: radiazione solare, T: temperatura dell’aria, UR: umidità relativa dell’aria) e stato del sistema di raffrescamento in serra, 10–12 agosto 2020.

Data e ora	R [Wm ⁻²]	T [°C]	UR [%]	Stato	Data e ora	R [Wm ⁻²]	T [°C]	UR [%]	Stato	Data e ora	R [Wm ⁻²]	T [°C]	UR [%]	Stato
10/8 0.00	0.0	22.2	75.2	OFF	11/8 0.00	0.0	22.1	88.2	OFF	12/8 0.00	0.0	22.0	72.9	OFF
0.15	0.0	22.1	74.7	OFF	0.15	0.0	21.9	88.0	OFF	0.15	0.0	21.8	72.4	OFF
0.30	0.0	22.1	73.2	OFF	0.30	0.0	21.6	88.6	OFF	0.30	0.0	21.7	72.1	OFF
0.45	0.0	21.9	72.6	OFF	0.45	0.0	21.6	90.5	OFF	0.45	0.0	21.7	72.7	OFF
1.00	0.0	22.1	70.5	OFF	1.00	0.0	21.7	88.8	OFF	1.00	0.0	21.4	74.4	OFF
1.15	0.0	22.2	70.1	OFF	1.15	0.0	21.5	87.1	OFF	1.15	0.0	21.2	75.0	OFF
1.30	0.0	21.8	69.8	OFF	1.30	0.0	21.5	87.5	OFF	1.30	0.0	21.2	74.9	OFF
1.45	0.0	21.8	69.1	OFF	1.45	0.0	21.4	87.7	OFF	1.45	0.0	21.2	74.5	OFF
2.00	0.0	21.7	69.3	OFF	2.00	0.0	21.1	87.7	OFF	2.00	0.0	21.3	72.6	OFF
2.15	0.0	21.6	69.5	OFF	2.15	0.0	21.0	87.9	OFF	2.15	0.0	21.2	71.8	OFF
2.30	0.0	21.4	69.9	OFF	2.30	0.0	21.2	86.6	OFF	2.30	0.0	21.1	71.6	OFF
2.45	0.0	21.2	70.5	OFF	2.45	0.0	21.2	84.6	OFF	2.45	0.0	20.8	72.0	OFF
3.00	0.0	21.3	71.4	OFF	3.00	0.0	21.3	82.3	OFF	3.00	0.0	20.0	71.9	OFF
3.15	0.0	21.1	72.3	OFF	3.15	0.0	20.8	82.4	OFF	3.15	0.0	20.3	68.6	OFF
3.30	0.0	20.7	73.3	OFF	3.30	0.0	20.7	81.4	OFF	3.30	0.0	20.3	68.0	OFF
3.45	0.0	20.6	73.6	OFF	3.45	0.0	20.9	79.5	OFF	3.45	0.0	20.3	68.2	OFF
4.00	0.0	20.5	73.3	OFF	4.00	0.0	21.0	77.1	OFF	4.00	0.0	19.8	70.2	OFF
4.15	0.0	20.7	73.2	OFF	4.15	0.0	21.1	75.3	OFF	4.15	0.0	19.8	70.5	OFF
4.30	0.0	20.5	73.7	OFF	4.30	0.0	21.1	73.6	OFF	4.30	0.0	19.7	69.9	OFF
4.45	0.0	20.4	74.7	OFF	4.45	0.0	20.9	74.1	OFF	4.45	0.0	20.0	67.6	OFF
5.00	0.0	20.6	74.4	OFF	5.00	0.0	20.8	73.3	OFF	5.00	0.0	20.2	65.4	OFF

5.15	0.0	20.8	73.1	OFF	5.15	0.0	20.7	73.6	OFF	5.15	0.0	20.4	65.6	OFF
5.30	1.6	21.0	72.0	OFF	5.30	2.9	21.3	70.2	OFF	5.30	2.7	20.3	66.5	OFF
5.45	22.8	21.5	70.3	OFF	5.45	25.2	22.3	65.5	OFF	5.45	25.1	20.7	65.2	OFF
6.00	52.5	22.2	67.2	OFF	6.00	56.4	23.0	62.8	OFF	6.00	56.2	21.6	62.1	OFF
6.15	88.7	22.7	65.21	OFF	6.15	94.8	23.4	62.0	OFF	6.15	94.1	22.5	60.1	OFF
6.30	130.6	23.3	63.7	OFF	6.30	138.0	23.7	63.0	OFF	6.30	137.6	23.3	60.2	OFF
6.45	176.4	23.8	61.9	OFF	6.45	186.1	24.5	62.7	OFF	6.45	185.0	24.0	60.3	OFF
7.00	223.3	24.4	59.1	OFF	7.00	234.2	25.5	60.7	OFF	7.00	232.2	24.7	59.0	OFF
7.15	269.8	25.1	57.9	OFF	7.15	281.1	26.5	57.8	ON	7.15	277.5	25.0	56.3	ON
7.30	315.3	25.2	56.0	ON	7.30	328.1	27.4	51.8	ON	7.30	324.5	26.0	56.2	ON
7.45	360.3	25.6	54.1	ON	7.45	376.0	27.4	48.8	ON	7.45	372.2	27.3	54.8	ON
8.00	403.6	25.8	52.8	ON	8.00	421.9	27.0	46.1	ON	8.00	418.6	25.6	52.8	ON
8.15	448.9	25.9	54.2	ON	8.15	466.0	26.6	44.7	ON	8.15	462.6	25.9	50.1	ON
8.30	490.4	26.1	54.4	ON	8.30	508.1	26.5	45.5	ON	8.30	502.9	25.7	45.9	ON
8.45	532.6	26.1	53.5	ON	8.45	547.1	26.5	43.7	ON	8.45	545.5	24.7	42.2	ON
9.00	571.6	25.8	54.4	ON	9.00	586.1	27.3	45.0	ON	9.00	584.8	28.2	39.5	ON
9.15	608.4	25.4	54.6	ON	9.15	620.8	26.2	44.7	ON	9.15	623.6	29.7	38.7	ON
9.30	643.8	26.1	55.4	ON	9.30	655.5	27.0	43.0	ON	9.30	655.8	31.2	37.7	ON
9.45	676.5	26.9	55.0	ON	9.45	689.4	27.9	43.0	ON	9.45	684.1	31.6	38.3	ON
10.00	708.0	27.6	55.8	ON	10.00	718.0	30.5	43.1	ON	10.00	713.0	26.3	38.3	ON
10.15	732.0	27.9	56.0	ON	10.15	743.0	30.7	42.6	ON	10.15	736.0	21.3	40.6	ON
10.30	758.0	27.8	56.5	ON	10.30	762.0	30.7	45.7	ON	10.30	763.0	20.0	39.5	ON
10.45	780.0	27.4	56.3	ON	10.45	780.0	30.5	46.9	ON	10.45	791.0	20.7	37.5	ON
11.00	797.0	26.7	55.7	ON	11.00	800.0	30.7	46.9	ON	11.00	805.0	20.8	39.1	ON
11.15	807.0	28.3	55.7	ON	11.15	816.0	30.6	45.9	ON	11.15	818.0	21.0	40.6	ON
11.30	821.0	26.6	54.7	ON	11.30	829.0	31.0	43.6	ON	11.30	831.0	22.0	40.5	ON
11.45	830.0	27.3	55.0	ON	11.45	837.0	31.2	43.2	ON	11.45	838.0	22.3	42.4	ON
12.00	833.0	28.3	53.2	ON	12.00	840.0	31.0	45.2	ON	12.00	843.0	22.7	42.7	ON
12.15	834.0	28.6	54.8	ON	12.15	842.0	31.0	45.7	ON	12.15	845.0	23.4	41.6	ON
12.30	832.0	29.0	53.9	ON	12.30	837.0	30.8	47.4	ON	12.30	841.0	23.5	42.2	ON
12.45	825.0	29.9	55.2	ON	12.45	832.0	30.8	46.7	ON	12.45	835.0	24.3	41.5	ON
13.00	816.0	29.5	57.4	ON	13.00	827.0	30.9	45.6	ON	13.00	825.0	24.4	41.1	ON
13.15	804.0	29.7	55.4	ON	13.15	817.0	30.9	45.2	ON	13.15	810.0	24.4	42.0	ON
13.30	787.0	29.8	54.1	ON	13.30	799.0	30.9	46.3	ON	13.30	799.0	24.6	40.1	ON
13.45	767.0	29.5	55.2	ON	13.45	777.0	30.8	47.6	ON	13.45	782.0	24.7	39.5	ON
14.00	748.0	29.8	54.1	ON	14.00	754.0	30.7	48.0	ON	14.00	760.0	25.0	38.1	ON
14.15	723.0	29.4	55.3	ON	14.15	727.0	30.6	48.5	ON	14.15	733.0	25.0	39.6	ON
14.30	698.4	29.5	53.6	ON	14.30	699.8	30.7	48.1	ON	14.30	705.0	25.4	40.0	ON
14.45	666.4	29.3	53.3	ON	14.45	671.1	30.7	46.9	ON	14.45	675.0	25.2	42.2	ON
15.00	631.7	29.3	53.8	ON	15.00	635.0	30.8	46.9	ON	15.00	642.1	25.3	40.7	ON
15.15	591.6	28.9	56.4	ON	15.15	602.1	30.7	46.2	ON	15.15	601.1	25.1	41.6	ON
15.30	552.5	28.4	58.9	ON	15.30	565.7	30.7	46.1	ON	15.30	556.5	25.1	39.9	ON
15.45	513.2	28.3	59.0	ON	15.45	524.7	30.4	45.2	ON	15.45	510.1	25.1	39.8	ON
16.00	471.4	28.3	58.0	ON	16.00	481.0	30.3	45.0	ON	16.00	467.2	25.1	38.5	ON
16.15	428.0	28.3	56.5	ON	16.15	433.0	30.0	47.8	ON	16.15	425.4	25.1	37.7	ON
16.30	384.8	28.5	57.1	ON	16.30	387.6	29.9	48.1	ON	16.30	382.5	25.4	38.7	ON
16.45	336.2	28.3	57.0	ON	16.45	340.6	29.8	49.8	ON	16.45	334.7	25.5	38.3	ON
17.00	287.6	28.2	58.3	ON	17.00	294.9	29.7	48.7	ON	17.00	287.3	25.4	37.9	ON
17.15	240.2	28.2	58.6	ON	17.15	247.0	29.9	45.8	ON	17.15	240.0	25.8	38.8	ON
17.30	191.4	28.1	57.6	ON	17.30	199.6	29.8	44.7	ON	17.30	190.0	25.7	39.5	ON
17.45	145.4	27.9	59.7	ON	17.45	151.6	29.9	45.8	ON	17.45	143.1	25.5	40.1	ON
18.00	100.6	27.5	64.3	ON	18.00	106.1	29.5	47.7	ON	18.00	99.9	25.3	47.3	ON
18.15	61.1	27.0	67.4	OFF	18.15	62.2	28.9	52.4	ON	18.15	56.6	26.0	52.1	OFF
18.30	16.6	26.0	72.3	OFF	18.30	13.5	28.2	57.5	OFF	18.30	10.0	25.9	55.4	OFF

18.45	0.0	25.3	75.7	OFF	18.45	0.0	27.2	65.1	OFF	18.45	0.0	25.1	58.9	OFF
19.00	0.0	26.1	77.6	OFF	19.00	0.0	26.8	70.5	OFF	19.00	0.0	25.4	62.0	OFF
19.15	0.0	25.5	79.2	OFF	19.15	0.0	25.9	74.0	OFF	19.15	0.0	26.2	64.5	OFF
19.30	0.0	24.5	82.0	OFF	19.30	0.0	24.7	79.6	OFF	19.30	0.0	25.8	68.6	OFF
19.45	0.0	24.0	84.8	OFF	19.45	0.0	24.2	81.7	OFF	19.45	0.0	25.2	72.1	OFF
20.00	0.0	23.8	86.1	OFF	20.00	0.0	23.8	82.7	OFF	20.00	0.0	25.0	74.3	OFF
20.15	0.0	23.3	86.9	OFF	20.15	0.0	24.1	84.3	OFF	20.15	0.0	24.9	73.9	OFF
20.30	0.0	23.3	88.6	OFF	20.30	0.0	24.0	85.1	OFF	20.30	0.0	24.5	74.1	OFF
20.45	0.0	23.1	88.4	OFF	20.45	0.0	23.8	85.7	OFF	20.45	0.0	23.4	74.9	OFF
21.00	0.0	23.1	86.6	OFF	21.00	0.0	23.6	85.5	OFF	21.00	0.0	23.6	72.5	OFF
21.15	0.0	23.2	86.0	OFF	21.15	0.0	23.2	85.2	OFF	21.15	0.0	23.4	71.4	OFF
21.30	0.0	23.0	84.2	OFF	21.30	0.0	21.9	83.6	OFF	21.30	0.0	23.5	69.1	OFF
21.45	0.0	22.9	83.9	OFF	21.45	0.0	22.1	82.5	OFF	21.45	0.0	23.5	67.7	OFF
22.00	0.0	22.6	84.1	OFF	22.00	0.0	22.0	81.2	OFF	22.00	0.0	23.2	67.9	OFF
22.15	0.0	22.1	84.8	OFF	22.15	0.0	21.4	83.2	OFF	22.15	0.0	22.8	66.9	OFF
22.30	0.0	21.9	86.6	OFF	22.30	0.0	21.5	83.0	OFF	22.30	0.0	22.5	66.8	OFF
22.45	0.0	22.1	89.6	OFF	22.45	0.0	22.0	81.8	OFF	22.45	0.0	22.4	67.2	OFF
23.00	0.0	22.2	90.3	OFF	23.00	0.0	22.1	79.3	OFF	23.00	0.0	22.2	66.9	OFF
23.15	0.0	22.3	89.1	OFF	23.15	0.0	22.4	78.5	OFF	23.15	0.0	22.4	65.7	OFF
23.30	0.0	22.1	88.8	OFF	23.30	0.0	22.4	75.7	OFF	23.30	0.0	22.2	65.3	OFF
23.45	0.0	22.1	88.2	OFF	23.45	0.0	22.4	73.7	OFF	23.45	0.0	22.2	64.3	OFF
Tempo di accensione [%]				45	Tempo di accensione [%]				47	Tempo di accensione [%]				46

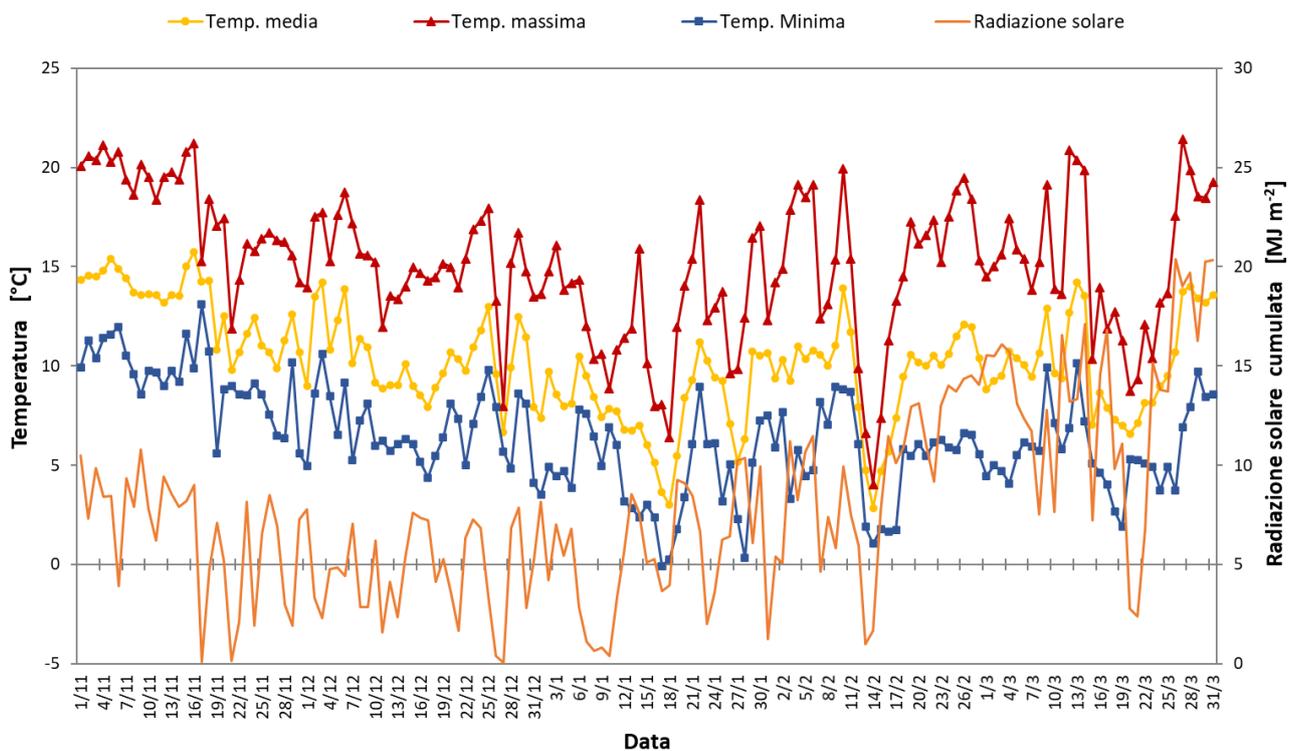


Figura A 2. Temperatura giornaliera media, massima e minima dell’aria esterna (asse principale) e radiazione solare cumulata giornaliera (asse secondario), periodo : 1 novembre 2020–31 marzo 2021.

Tabella A 2. Database delle condizioni climatiche (R: radiazione solare, T: temperatura dell'aria, UR: umidità relativa dell'aria) e stato del sistema di riscaldamento in serra, 13–15 gennaio 2021.

Data e ora	R [Wm ⁻²]	T [°C]	RH [%]	Stato	Data e ora	R [Wm ⁻²]	T [°C]	RH [%]	Stato	Data e ora	R [Wm ⁻²]	T [°C]	RH [%]	Stato
13/1 0.00	0.0	3.6	93.5	ON	14/1 0.00	0.0	3.8	99.3	ON	15/1 0.00	0.0	6.4	83.4	ON
0.15	0.0	3.8	92.5	ON	0.15	0.0	3.7	99.6	ON	0.15	0.0	7.0	65.6	ON
0.30	0.0	3.6	92.8	ON	0.30	0.0	3.7	100.0	ON	0.30	0.0	7.2	60.0	ON
0.45	0.0	3.2	94.1	ON	0.45	0.0	3.6	100.0	ON	0.45	0.0	7.1	59.8	ON
1.00	0.0	3.1	94.5	ON	1.00	0.0	3.6	100.0	ON	1.00	0.0	7.1	58.9	ON
1.15	0.0	3.2	94.4	ON	1.15	0.0	3.7	100.0	ON	1.15	0.0	6.9	61.0	ON
1.30	0.0	3.6	92.4	ON	1.30	0.0	3.5	100.1	ON	1.30	0.0	6.7	61.1	ON
1.45	0.0	3.5	92.7	ON	1.45	0.0	3.4	100.0	ON	1.45	0.0	6.4	61.7	ON
2.00	0.0	3.0	94.7	ON	2.00	0.0	3.4	100.0	ON	2.00	0.0	5.8	63.8	ON
2.15	0.0	3.0	94.9	ON	2.15	0.0	3.3	100.0	ON	2.15	0.0	5.2	65.5	ON
2.30	0.0	3.2	94.7	ON	2.30	0.0	3.5	100.0	ON	2.30	0.0	4.8	67.0	ON
2.45	0.0	3.4	93.9	ON	2.45	0.0	3.6	99.5	ON	2.45	0.0	4.2	70.4	ON
3.00	0.0	3.5	93.1	ON	3.00	0.0	3.4	99.4	ON	3.00	0.0	3.7	74.2	ON
3.15	0.0	3.5	92.5	ON	3.15	0.0	3.4	99.6	ON	3.15	0.0	3.0	77.5	ON
3.30	0.0	3.7	92.0	ON	3.30	0.0	3.6	98.2	ON	3.30	0.0	3.5	73.5	ON
3.45	0.0	3.7	91.7	ON	3.45	0.0	3.1	98.6	ON	3.45	0.0	3.8	71.0	ON
4.00	0.0	3.7	91.7	ON	4.00	0.0	3.0	99.1	ON	4.00	0.0	4.4	67.4	ON
4.15	0.0	3.8	91.5	ON	4.15	0.0	3.0	97.9	ON	4.15	0.0	4.2	68.4	ON
4.30	0.0	3.9	91.3	ON	4.30	0.0	2.8	97.5	ON	4.30	0.0	4.1	68.1	ON
4.45	0.0	3.8	91.9	ON	4.45	0.0	2.5	98.1	ON	4.45	0.0	4.3	67.6	ON
5.00	0.0	3.8	92.3	ON	5.00	0.0	2.7	97.8	ON	5.00	0.0	4.2	68.9	ON
5.15	0.0	3.8	92.2	ON	5.15	0.0	2.8	96.9	ON	5.15	0.0	4.3	68.1	ON
5.30	0.0	3.8	92.4	ON	5.30	0.0	2.6	97.4	ON	5.30	0.0	3.9	69.1	ON
5.45	0.0	3.6	93.4	ON	5.45	0.0	2.8	97.4	ON	5.45	0.0	3.9	68.5	ON
6.00	0.0	3.6	92.9	ON	6.00	0.0	2.9	96.9	ON	6.00	0.0	3.5	70.2	ON
6.15	0.0	3.7	92.5	ON	6.15	0.0	3.3	95.2	ON	6.15	0.0	3.6	71.8	ON
6.30	0.0	3.8	93.1	ON	6.30	0.0	2.9	94.9	ON	6.30	0.0	3.5	72.5	ON
6.45	0.0	3.4	95.4	ON	6.45	0.0	2.4	95.0	ON	6.45	0.0	3.6	71.7	ON
7.00	0.0	3.2	97.0	ON	7.00	0.0	2.5	93.3	ON	7.00	0.0	3.7	71.2	ON
7.15	0.0	3.4	96.6	ON	7.15	0.0	3.3	87.7	ON	7.15	0.0	3.6	71.0	ON
7.30	0.0	3.7	92.8	ON	7.30	0.0	3.2	87.6	ON	7.30	0.0	3.4	72.3	ON
7.45	0.0	3.1	96.6	ON	7.45	1.2	3.5	84.6	ON	7.45	1.5	4.0	70.0	ON
8.00	1.2	2.8	96.9	ON	8.00	20.8	4.5	76.7	ON	8.00	22.0	4.3	68.2	ON
8.15	12.7	3.2	94.7	ON	8.15	52.3	5.7	71.7	ON	8.15	54.7	5.0	65.1	ON
8.30	24.0	3.7	91.2	ON	8.30	94.8	6.7	68.7	ON	8.30	93.0	5.7	62.4	ON
8.45	69.8	4.0	90.7	ON	8.45	125.5	7.3	68.6	ON	8.45	132.1	6.6	59.7	ON
9.00	202.1	6.0	83.4	ON	9.00	214.2	8.3	66.0	OFF	9.00	173.7	7.5	56.6	ON
9.15	156.2	7.0	75.3	ON	9.15	204.1	9.4	62.0	OFF	9.15	209.8	7.6	57.8	OFF
9.30	249.5	7.8	69.0	OFF	9.30	181.6	9.2	59.2	OFF	9.30	247.0	7.1	63.3	OFF
9.45	267.3	8.3	66.8	OFF	9.45	288.6	10.3	54.6	OFF	9.45	283.2	7.9	57.6	OFF
10.00	307.9	8.7	65.9	OFF	10.00	396.8	11.7	52.9	OFF	10.00	316.6	8.8	52.0	OFF
10.15	316.3	9.0	64.8	OFF	10.15	394.3	12.5	52.3	OFF	10.15	344.7	9.0	50.1	OFF
10.30	365.7	9.5	61.9	OFF	10.30	379.9	12.8	53.2	OFF	10.30	375.1	9.3	49.2	OFF
10.45	388.8	9.9	60.0	OFF	10.45	381.6	13.1	55.1	OFF	10.45	338.5	9.4	51.4	OFF
11.00	404.2	10.4	57.8	OFF	11.00	402.0	13.5	55.6	OFF	11.00	278.4	9.4	51.9	OFF
11.15	424.3	10.9	54.1	OFF	11.15	412.8	13.9	55.2	OFF	11.15	222.8	9.5	53.4	OFF
11.30	439.2	10.9	50.1	OFF	11.30	431.0	14.3	55.3	OFF	11.30	308.6	10.2	50.5	OFF
11.45	446.3	11.2	50.4	OFF	11.45	441.0	14.9	55.0	OFF	11.45	225.8	10.1	51.4	OFF
12.00	451.0	11.3	51.2	OFF	12.00	442.7	15.6	55.0	OFF	12.00	191.1	9.9	50.2	OFF
12.15	451.1	11.6	52.0	OFF	12.15	452.4	15.9	54.4	OFF	12.15	184.4	9.8	51.2	OFF

12.30	447.6	11.8	51.5	OFF	12.30	459.1	15.7	53.2	OFF	12.30	190.0	9.6	55.6	OFF
12.45	438.1	11.8	49.7	OFF	12.45	420.8	11.6	51.4	OFF	12.45	174.4	9.4	57.0	OFF
13.00	428.7	11.8	49.6	OFF	13.00	187.9	9.3	52.0	OFF	13.00	103.9	8.8	59.7	OFF
13.15	416.9	11.9	50.9	OFF	13.15	238.7	9.3	53.4	OFF	13.15	243.7	8.6	59.3	OFF
13.30	396.9	11.8	51.8	OFF	13.30	338.7	9.1	54.0	OFF	13.30	254.6	9.3	56.6	OFF
13.45	375.7	11.6	51.2	OFF	13.45	463.8	9.0	52.1	OFF	13.45	81.2	8.7	58.3	OFF
14.00	351.8	11.5	51.5	OFF	14.00	206.1	8.4	56.4	OFF	14.00	87.4	8.4	59.7	OFF
14.15	324.7	11.7	51.4	OFF	14.15	136.1	7.9	59.0	OFF	14.15	107.0	8.4	59.6	OFF
14.30	291.7	11.6	50.1	OFF	14.30	130.7	7.2	59.4	OFF	14.30	82.7	8.3	59.9	OFF
14.45	260.3	11.5	49.1	OFF	14.45	68.3	7.3	58.2	OFF	14.45	54.8	8.0	60.6	ON
15.00	226.0	11.1	49.7	OFF	15.00	117.5	6.9	57.1	OFF	15.00	78.6	7.9	60.6	ON
15.15	188.4	10.9	53.3	OFF	15.15	121.3	7.1	56.6	OFF	15.15	84.7	7.9	59.2	ON
15.30	149.9	10.6	55.5	OFF	15.30	71.5	7.4	57.8	OFF	15.30	61.5	7.8	59.0	ON
15.45	109.9	10.3	56.1	OFF	15.45	72.0	7.4	57.5	OFF	15.45	26.9	7.5	58.7	ON
16.00	70.2	10.0	57.1	OFF	16.00	66.8	7.2	58.4	OFF	16.00	14.5	7.3	60.3	ON
16.15	36.3	9.6	58.5	OFF	16.15	22.3	7.0	68.6	OFF	16.15	0.0	7.0	63.5	ON
16.30	3.5	9.0	62.5	OFF	16.30	7.9	7.6	69.4	OFF	16.30	0.0	6.7	66.4	ON
16.45	0.0	8.3	66.9	ON	16.45	0.0	7.6	69.4	OFF	16.45	0.0	6.4	67.3	ON
17.00	0.0	7.8	68.6	ON	17.00	0.0	9.3	67.8	OFF	17.00	0.0	6.1	70.2	ON
17.15	0.0	7.2	71.8	ON	17.15	0.0	10.0	65.5	ON	17.15	0.0	5.9	71.9	ON
17.30	0.0	6.5	75.7	ON	17.30	0.0	8.2	65.1	ON	17.30	0.0	5.6	75.1	ON
17.45	0.0	6.6	76.8	ON	17.45	0.0	8.2	66.2	ON	17.45	0.0	5.3	77.7	ON
18.00	0.0	7.1	74.4	ON	18.00	0.0	8.1	68.9	ON	18.00	0.0	5.2	76.1	ON
18.15	0.0	7.6	74.1	ON	18.15	0.0	8.6	72.1	ON	18.15	0.0	5.3	74.3	ON
18.30	0.0	7.1	77.9	ON	18.30	0.0	8.8	73.9	ON	18.30	0.0	5.5	73.6	ON
18.45	0.0	6.3	82.4	ON	18.45	0.0	8.9	74.9	ON	18.45	0.0	5.6	72.5	ON
19.00	0.0	6.6	81.3	ON	19.00	0.0	9.0	75.8	ON	19.00	0.0	5.6	72.6	ON
19.15	0.0	7.2	79.5	ON	19.15	0.0	9.1	76.5	ON	19.15	0.0	5.6	75.2	ON
19.30	0.0	7.8	77.4	ON	19.30	0.0	9.0	77.8	ON	19.30	0.0	5.3	80.5	ON
19.45	0.0	7.3	79.8	ON	19.45	0.0	9.2	78.2	ON	19.45	0.0	5.1	82.7	ON
20.00	0.0	8.5	73.7	ON	20.00	0.0	8.3	90.5	ON	20.00	0.0	5.0	83.9	ON
20.15	0.0	8.6	73.9	ON	20.15	0.0	8.2	96.3	ON	20.15	0.0	4.9	85.4	ON
20.30	0.0	8.1	75.9	ON	20.30	0.0	7.6	99.9	ON	20.30	0.0	4.8	87.1	ON
20.45	0.0	7.7	78.1	ON	20.45	0.0	7.2	100.0	ON	20.45	0.0	4.7	88.4	ON
21.00	0.0	7.9	76.8	ON	21.00	0.0	7.0	100.1	ON	21.00	0.0	4.7	89.9	ON
21.15	0.0	8.0	75.4	ON	21.15	0.0	6.6	100.1	ON	21.15	0.0	4.6	93.4	ON
21.30	0.0	7.4	79.9	ON	21.30	0.0	6.5	100.1	ON	21.30	0.0	4.3	94.9	ON
21.45	0.0	7.1	82.0	ON	21.45	0.0	6.6	99.8	ON	21.45	0.0	4.2	95.4	ON
22.00	0.0	6.9	83.3	ON	22.00	0.0	7.3	86.4	ON	22.00	0.0	4.1	96.1	ON
22.15	0.0	6.8	85.1	ON	22.15	0.0	7.7	78.5	ON	22.15	0.0	3.9	96.6	ON
22.30	0.0	6.2	88.3	ON	22.30	0.0	7.2	83.8	ON	22.30	0.0	4.0	96.5	ON
22.45	0.0	6.0	89.7	ON	22.45	0.0	6.5	87.8	ON	22.45	0.0	4.0	95.3	ON
23.00	0.0	5.5	92.0	ON	23.00	0.0	6.3	86.9	ON	23.00	0.0	4.0	94.2	ON
23.15	0.0	4.6	95.6	ON	23.15	0.0	6.3	87.2	ON	23.15	0.0	4.2	92.4	ON
23.30	0.0	4.1	97.8	ON	23.30	0.0	6.2	90.3	ON	23.30	0.0	4.4	91.0	ON
23.45	0.0	3.8	99.1	ON	23.45	0.0	6.2	91.1	ON	23.45	0.0	4.3	91.5	ON
Tempo di accensione [%]				70	Tempo di accensione [%]				66	Tempo di accensione [%]				77