



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi del comportamento energetico di una serra bioclimatica con sistema vegetale interno per migliorare l'efficienza energetica dell'edificio

Prof. Fabio Fantozzi, Prof. Carlo Bibbiani,
Arch. PhD Caterina Gargari

ANALISI DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO DI UNA SERRA BIOCLIMATICA CON SISTEMA VEGETALE INTERNO PER MIGLIORARE L'EFFICIENZA ENERGETICA DELL'EDIFICIO

Prof. Fabio Fantozzi (Dip. DESTEC Università di Pisa), Prof. Carlo Bibbiani (Centro CiRAA Università di Pisa), Arch. Caterina Gargari (Dip. DESTEC Università di Pisa)

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: *2 - Materiali e soluzioni innovative per ottimizzare l'isolamento dell'involucro edilizio*

Linea di attività: *LA2.5 - Analisi del comportamento energetico di una serra bioclimatica con sistema vegetale interno per migliorare l'efficienza energetica dell'edificio - II*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Giovanni Puglisi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Analisi del comportamento energetico di una serra bioclimatica con sistema vegetale interno per migliorare l'efficienza energetica dell'edificio*"

Responsabile scientifico ENEA: Dott. Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Dip. DESTEC Università di Pisa: Prof. Fabio Fantozzi

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 OTTIMIZZAZIONE DEL MODELLO DI ENERGY PLUS.....	5
2.1 OTTIMIZZAZIONE DEL MODELLO DI ENERGY PLUS.....	5
2.2 IL MODULO DI E+ CUSTOMIZZATO DENOMINATO “GREENHOUSE”.....	9
2.3 VALIDAZIONE DEL MODELLO E RISULTATI.....	11
2.4 COSTRUZIONE DEL MODELLO CLIMATICO 2021.....	16
2.5 ULTERIORE IMPLEMENTAZIONE DEL MODULO GREENHOUSE.....	22
2.6 ANALISI CRITICA DEL NUOVO MODELLO ENERGYPLUS.....	28
3 CONCLUSIONI.....	35
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	36

Sommario

Sono state analizzate in dettaglio le incongruenze persistenti tra gli andamenti della curva di simulazione e la curva di monitoraggio con l'obiettivo di rilevare eventuali criticità metodologiche ed implementare un nuovo modello di calcolo maggiormente reattivo alle molteplici variabili in gioco nel fenomeno di evapotraspirazione.

Analizzati i limiti del modulo Water Use equipment nel descrivere il comportamento evapotraspirativo e verificata in letteratura l'assenza di un modello migliore, si è deciso di svilupparne uno specifico per la simulazione delle serre con presenza di elementi vegetali integrando, attraverso uno script di Python, l'equazione di Baille per la misura della potenza scambiata per evapotraspirazione. Il modello, denominato Greenhouse, è stato testato con riferimento ai dati climatici per l'anno 2020, in modo da valutare le curve di T operativa e umidità relativa nella serra rispetto alle sinusoidi di monitoraggio e a quelle di simulazione con il precedente modello Energy Plus. Il nuovo modulo consente di migliorare del 66% l'affidabilità della simulazione riducendo lo scarto tra il modello reale e il modello virtuale che adesso si attesta mediamente attorno a 1,8°C nel periodo giugno-settembre.

Stimolati dalla presenza di essenze diverse nella serra e dal reale scenario di utilizzo, il modulo Greenhouse è stato ulteriormente implementato includendo la possibilità di indicare un giorno di "ingresso" delle piante nella serra e un giorno di "uscita"; il livello di crescita delle piante al momento del loro posizionamento nella serra attraverso una variazione dinamica dei valori di LAI al variare della T base specifica di ogni singola pianta dei GDD calcolati per il periodo specifico. Il livello di personalizzazione dell'attuale modulo costituisce quindi un indubbio miglioramento in termini di affidabilità e sensibilità ed è in grado di restituire risultati affidabili nella simulazione delle serre verdi.

1 Introduzione

Le attività svolte a supporto dell'ENEA sono volte ad una caratterizzazione ambientale ed energetica puntuale del sistema serra bioclimatica/ambiente indoor, costruito presso l'Ed. F92 nel Centro di Ricerca ENEA Casaccia. L'attività primaria nel corso del secondo anno di ricerca è stata l'ottimizzazione del modello di calcolo di Energy Plus e la creazione di un nuovo codice di calcolo, sviluppato tramite l'integrazione con Python, in grado di valutare in maniera dinamica, l'interazione tra irraggiamento solare e superficie fogliare di elementi vegetali collocati in ambiente interno e predire con maggiore precisione, e in maniera variabile al variare del LAI, l'andamento dei valori termoigrometrici della serra.

L'integrazione dei dati di monitoraggio ricavati dalla piattaforma Olindo con la banca dati Meteororm, ha consentito di completare l'analisi su base annua, colmando le lacune derivanti dalla mancata registrazione dei sensori in alcuni periodi dell'anno.

Infine, anche il modello geometrico di Energy Plus è stato affinato e sono stati creati 3 scenari diversi di analisi per testare la robustezza del modello ed identificare le variazioni del comportamento termoigrometrico dalla serra al variare di alcuni parametri fondamentali quali:

- tipologia di essenza vegetale
- variazione del LAI
- variazione dell'area vegetale

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1. Ottimizzazione del modello di Energy Plus

Il modello geometrico per la simulazione del comportamento estivo degli edifici è stato realizzato nel corso del primo anno della ricerca attraverso l'applicativo Euclid, utilizzato in bibliografia per la creazione di modelli energetici, sviluppato dal National Renewable Energy Laboratory (NREL). Esso supporta la lettura e la scrittura della geometria EnergyPlus nel suo formato IDF nativo.

In questa seconda fase, il modello è stato ulteriormente semplificato, andando a togliere alcuni elementi geometrici ininfluenti nella determinazione del comportamento termoigrometrico della serra.

Dall'analisi dei risultati delle simulazioni ottenuti nel corso del primo anno di ricerca, erano emerse alcune anomalie nell'andamento dei dati relativi ai ricambi d'aria orari all'interno delle zone termiche che hanno indicato la possibile presenza di dispersioni causate da incongruenze nel modello geometrico.

Il modello in Sketchup è stato quindi "ripulito" da ogni seppur minimo errore grafico nella definizione dei nodi a chiusura delle Zone termiche.

Lo schema del modello geometrico semplificato, è riportato in Figura 1.

Le caratteristiche degli elementi opachi e trasparenti sono state già descritte in [1] e non sono state modificate.

Al contrario, alla luce delle imprecisioni nella simulazione dell'andamento dei valori dell'umidità relativa (UR) interna alla serra, come già evidenziati in [1], si è proceduto ad una revisione della configurazione dei moduli relativi al modello di calcolo degli scambi termici per ventilazione naturale in *Natural Ventilation – Airflow Network*

Rispetto alla sperimentazione 2020, il modello è stato modificato sostituendo, come parametro di calcolo della pressione del vento, l'altezza della apertura con il parametro *External Node*.

I nodi esterni, nel modello *AirflowNetwork*, definiscono le condizioni ambientali esterne dell'edificio. Queste condizioni includono i coefficienti di pressione del vento, che variano da facciata a facciata e possono essere estremamente variabili in relazione alla geometria dell'edifici e che vengono richiamati attraverso i moduli. *Wind Pressure Coefficient Values* e *Wind Pressure Coefficient Array*.

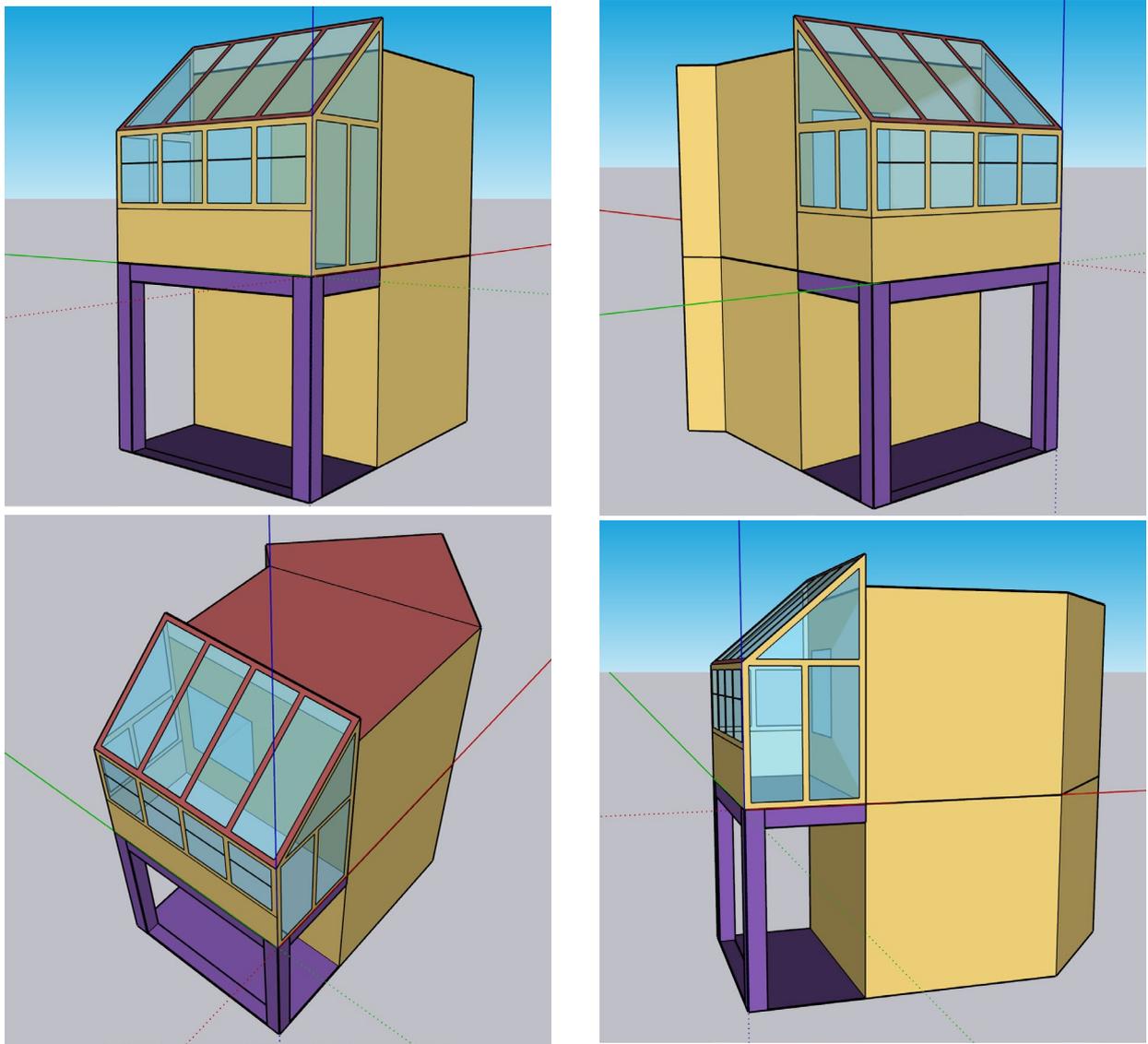
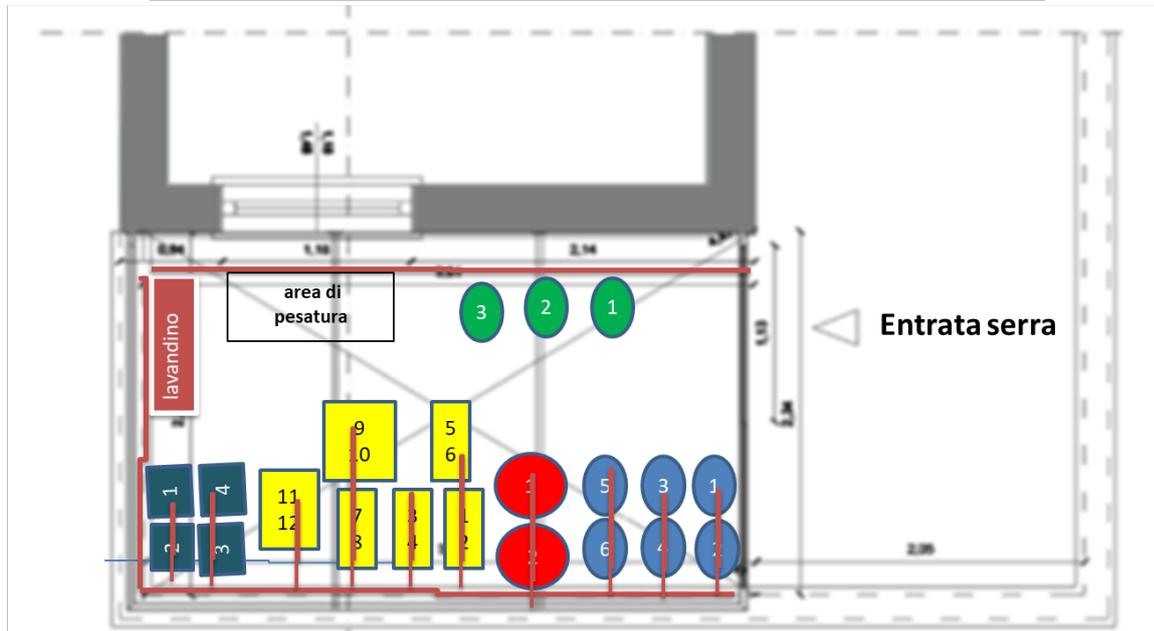


Figura 1 schema del modello semplificato utilizzato per la simulazione in E+

La simulazione è stata condotta inizialmente con il file climatico elaborato nel corso del primo anno di ricerca per una verifica della affidabilità e dell'effettivo miglioramento di sensibilità della modellazione e successivamente, nel periodo estivo dell'anno 2021, in particolare nei mesi di Giugno, Luglio, Agosto, Settembre, quando, all'interno della serra sono stati nuovamente collocati alcuni elementi vegetali come da schema in Figura 2.

Disposizione e numero di piante per vaso nella Serra bioclimatica 2021



	Lattuga 2 piante/vaso rettangolare 50x20x20h		Pomodoro 1 pianta/Vaso tondo 40x30h
	Uva fragola 1 pianta/vaso tondo 40x30 h		Sedano 1 pianta/vaso quadrato 40x40x30h
	Peperone 1 pianta/Vaso tondo 50x40h		

Figura 2 Disposizione delle piante e del sistema di irrigazione all'interno della serra

Il 23 Giugno 2021 (Figura 3) sono state inserite in serra le nuove piantine di pomodoro, di sedano e di lattuga e le piante di vite che erano state utilizzate nel corso della sperimentazione del 2020 e mantenute nella serra durante l'anno. Al fine di aumentare le conoscenze anche su altre specie, nella serra sono state inserite anche piantine di peperoncino ottenute da semi di una varietà presente sulla parete verde dell'edificio F92 che ha dimostrato una buona adattabilità al luogo.

Alle piante selezionate corrispondono diverse caratteristiche di LAI e T° base che sono sinteticamente riportate in tabella e che sono state impiegate per la costruzione del nuovo modello di calcolo.

Tabella 1 caratteristiche delle specie vegetali utilizzate

Specie	LAI	GGD T° base
Lattuga	3,8 – 4,3	40°F – 4,5°C
Sedano	4	47°F – 8,5°C
Pomodoro	3,3 - 4,1	50°F – 10°C
Peperoni	1 – 1,3	50°F – 10°C
Vite	1,6 – 2,3	54°F - 12°C

Nella primavera 2021, con la serra vuota e priva quindi di piantine, le finestre sono rimaste costantemente chiuse.

Nel periodo tra il 23 Giugno e il 26 Luglio 2021, una volta posizionate le piante, le finestre sul lato Ovest e sul lato Nord della Serra sono state lasciate semiaperte per favorire la ventilazione. Gli oscuranti sono rimasti alzati

Il 26 Luglio sono state installate 2 lampade LED da 325 W

Dal 26 Luglio fino al termine della sperimentazione (6 Ottobre 2021), gli oscuranti sono stati abbassati, sono state accese le lampade LED a sostituire l'illuminazione naturale ma le finestre sono rimaste semiaperte.

In concomitanza con l'installazione delle lampade a LED, alcuni vasi (3 dei 6 vasi di pomodoro) sono stati trasferiti sulla copertura a verde dell'edificio.

Gli scenari di simulazione, utili alla creazione delle schedule in Energy Plus, sono riportati in Tabella 2

L'oscuramento prodotto dalla serra è stato replicato attraverso il modulo *Window Shading Control* sulla base del profilo giornaliero riportato in Tabella 2.



Figura 3 Posizionamento dei vasi – 23 Giugno 2021

Tabella 2 schema di apertura chiusura delle finestre e della tenda interna

DATA	FINESTRE			TENDA OSCURANTE		FINESTRA DI COLEGAMENTO L'AULA	
	CHIUSE	NORD semi-aperta	OVEST semi-aperte	ALZATA	ABBASSATA	APERTA	CHIUSA
fino al 22/06	X			X			
23/06 inserimento vasi con piante		X	X	X			
dal 23/06 al 19/07		X	X	X			X
dal 20/07 al 26/07		X	X	X		X	
27/07 trasferimento di alcuni vasi sul tetto e installazione di lampade LED		X	X		X	X	
fino al 06/10		X	X		X	X	

2.2. Il modulo di E+ customizzato denominato "Greenhouse"

EnergyPlus dispone già da tempo di un'interfaccia di programmazione delle applicazioni (API) che consente agli utenti e al software esterno di interagire con essa durante la simulazione. Questa funzionalità è stata denominata Energy Management System (EMS) poiché il suo utilizzo principale è l'implementazione di algoritmi di controllo personalizzati.

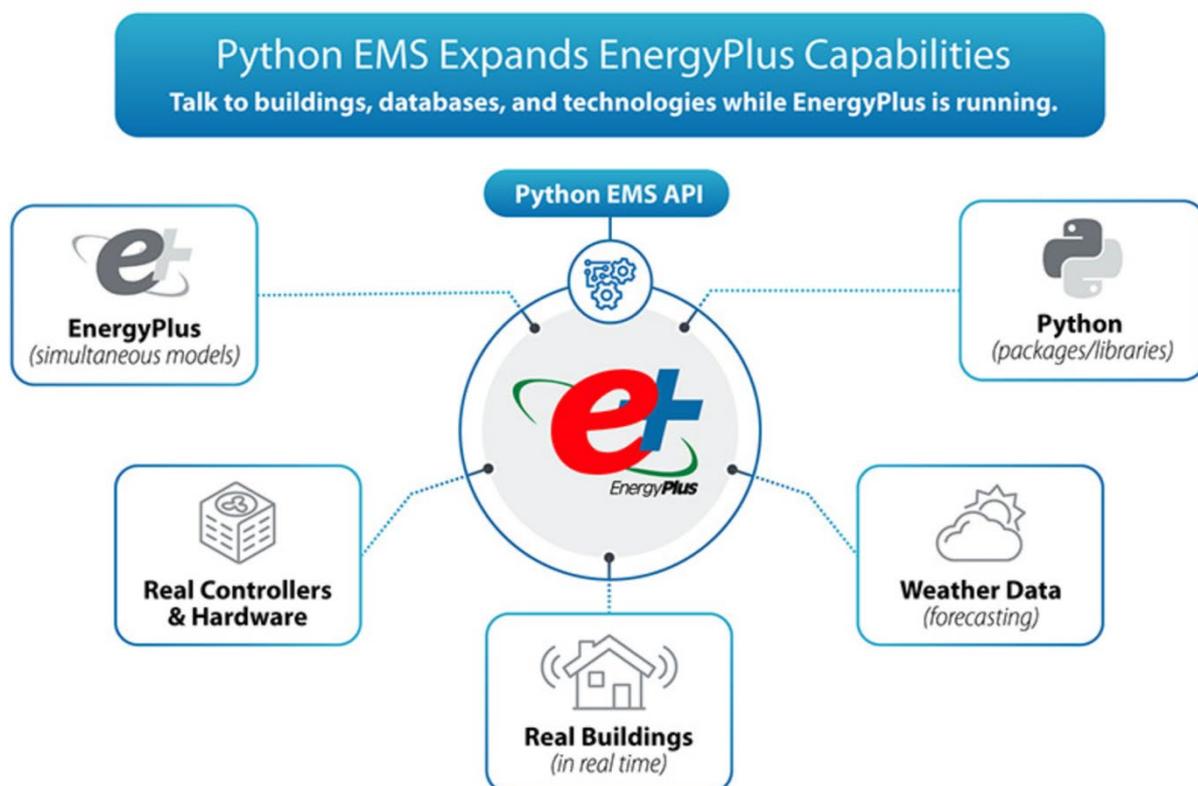
All'inizio dell'implementazione di questa funzionalità, gli utenti della funzione EMS erano costretti a scrivere il loro codice in un linguaggio informatico molto semplice e personalizzato, in formato BASIC. Le caratteristiche dell'EMS originale non consentivano quindi l'uso di librerie esterne e potevano utilizzare esclusivamente i dati disponibili all'inizio della simulazione.

Di recente, tuttavia, la funzionalità EMS ha ottenuto un aggiornamento significativo con il supporto del potente linguaggio di scripting Python.

Python EMS consente a EnergyPlus di integrare e scambiare dati con un gran numero di strumenti e librerie esterne. In questo modo, EnergyPlus acquisisce:

- la capacità di utilizzare le librerie di apprendimento automatico nell'implementazione di algoritmi di controllo degli edifici,
- la capacità di acquisire dati in tempo reale da apparecchiature e sistemi di controllo degli edifici,
- la capacità di incorporare questi dati in applicazioni real-time più complesse che richiedano un dettaglio di analisi e simulazione estremamente accurato.

Queste nuove funzionalità consentono agli utenti di sviluppare, ottimizzare, testare e implementare nuove complesse tecnologie di costruzione e strategie di controllo.



Sfruttando quindi questa implementazione, è stato sviluppato il modulo specifico denominato *Greenhouse* che consente di calcolare la potenza sottratta all'ambiente per evapotraspirazione, a partire dai dati climatici (attraverso l'input *Site Outdoor Air relative Humidity*), calcolando dinamicamente i dati di

Temperatura Operativa della serra (*Zone Operative Temperature*) e Irradianza su superficie orizzontale (ricavati dall'*Output Surface Inside Face Solar Radiation Heat gain Rate per Area*), .

L'evapotraspirazione (ET) è un tipico processo ambientale biologico che influenza la temperatura delle foglie, il fabbisogno idrico delle colture e il microclima della serra. Attualmente, come emerso dall'analisi della bibliografia nel corso del primo anno di ricerca, due sono le tecniche validate di misurazione dei valori di evapotraspirazione in una serra:

- il primo, diretto, prevede una misurazione diretta del contenuto volumetrico di acqua nel suolo attraverso sensori dielettrici;
- il secondo, indiretto, consiste nel calcolo di ET attraverso un modello matematico basato su variabili ambientali rilevate attraverso sensori meteorologici.

Nel corso del primo anno di ricerca [1], era stato implementato in EnergyPlus un modello di calcolo basato sulla misura delle pesate dei vasi effettuate in serra successivamente ai cicli di irrigazione, per valutare sperimentalmente, attraverso la misura ponderale, la quantità di acqua effettivamente evapotraspirata rispetto alla quantità irrigata.

Il modello di calcolo basato sulla misurazione diretta, sconta però l'impossibilità di interagire, in maniera dinamica, con l'andamento reale dei parametri meteorologici poiché le curve di Irradianza giornaliera, utilizzate per la costruzione della curva di variazione oraria della evapotraspirazione, sono create sulla base di un giorno tipo e non può essere impiegato quindi come modello predittivo.

Se è vero che, nonostante negli ultimi 50 anni siano stati teorizzati numerosi modelli empirici per la valutazione della evapotraspirazione nei substrati quale funzione delle diverse variabili climatiche, spesso tali relazioni richiedono accurate calibrizioni, la possibilità offerta dall'implementazione del linguaggio Python in EnergyPlus offre una nuova opportunità di gestione del modello complesso e offre uno spiraglio di indagine che si è ritenuto opportuno sfruttare in un campo di sì ampio interesse scientifico ancora incerto dal punto di vista degli strumenti di misurazione e simulazione.

Pertanto, in questo secondo anno, si è deciso di migliorare il modello di calcolo, utilizzando quindi un approccio di tipo indiretto, in grado di scambiare informazioni ad ogni step di calcolo con il software EnergyPlus e restituire quindi un risultato direttamente correlato non solo alle caratteristiche degli elementi vegetali ma anche alle oscillazioni reali del file climatico.

Analizzate le complessità del modello di Penman–Monteith, si è deciso di utilizzare per la scrittura del codice di Python, l'equazione di Baille [2] [3], risultata affetta da valori di incertezza minori rispetto ad altre formule disponibili in bibliografia [4].

$$ET_m = A \times (1 - \text{Exp} [-0,7LAI]) \times I_s + B \times LAI \times (1 - RH) \times PVS$$

dove

ET _m	Evapotraspirazione	[W/m ²]
A = 0,24	costante	[--]
LAI	Leaf Area Index	[m ² /m ²]
I _s	Irradianza solare	[W/m ²]
B = 37,6	costante	[W/m ² kPa]
RH	Umidità Relativa	[%]
PVS	Pressione del vapore saturo	[kPa]

La formula, implementata nel codice Python, richiama, ad intervalli di orari, i dati dell'umidità relativa esterna (letti dai sensori ENEA e restituiti nel file climatico) e i valori di Irradianza sulla superficie orizzontale

della Serra calcolati da EnergyPlus su base oraria ed espressi come flusso di calore per unità di superficie, proveniente dall'irraggiamento diretto attraverso le superfici vetrate e incidente sull'area a verde presente nella serra.

Field	Units	Obj1
Name		EvapoProgram
Program Line 1		RUN ComputeVPD
Program Line 2		Set A = 0.4
A4		Set B = 0.015
A5		set K = 0.6
A6		Set LAI = 1.5
A7		Set Lambda = 2450
A8		Set ExpArg = (-K * LAI)
A9		Set AreaVerde = 2
A10		
A11		Set EvapoABS = A*(1 - (@Exp ExpArg)) * SurfaceRad + (B * LAI * VPD)
A12		Set EvapoSchedAct = EvapoABS*AreaVerde
A13		

Figura 4 la formula di Baille richiamata dall'EMS di EnergyPlus

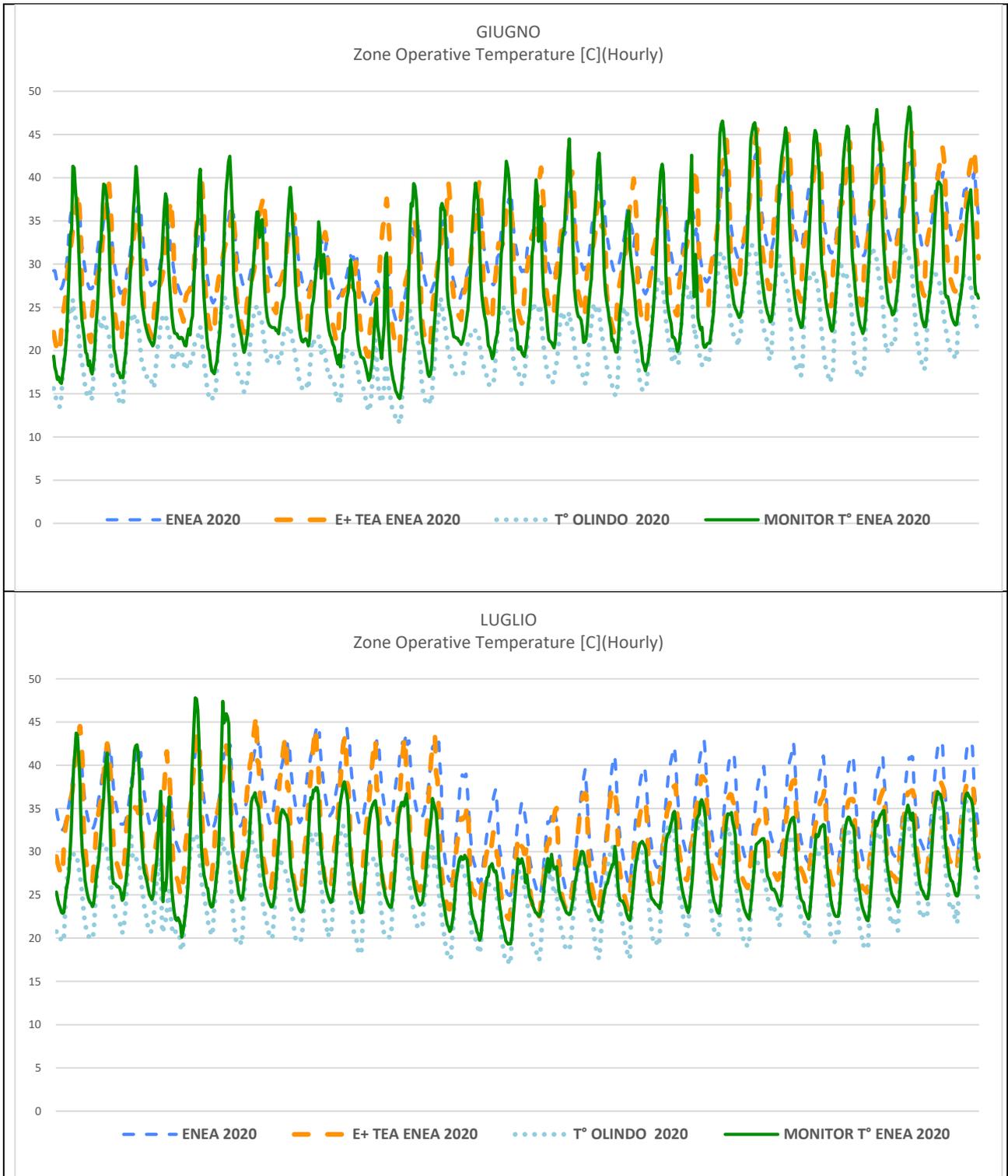
2.3. Validazione del modello e risultati

Per la validazione del nuovo modello di E+ si è scelto di confrontare, sulla base del medesimo file climatico come elaborato e già verificato in [1], i risultati ottenuti utilizzando il file *idf* sviluppato nel corso del primo anno di ricerca [1] e il nuovo file *idf* che implementa la formula di Baille così come descritto in 2.1.

I grafici di Tabella 3 mostrano a confronto:

ENEA 2020	grafico della T° interna nel mese specifico, elaborato da E+ nel corso del primo anno di ricerca
E+TEA ENEA 2020	grafico della T° interna nel mese specifico, elaborato da E+ nel corso del secondo anno di ricerca
T° OLINDO	grafico della T° esterna nel mese specifico, misurato dai sensori OLINDO nel corso del primo anno di ricerca
MONITOR T°ENEA 2020	grafico della T° interna nel mese specifico, misurato dai sensori ENEA nel corso del primo anno di ricerca

Le curve dei grafici in Figura 5 e Figura 6 rilevano chiaramente il miglioramento ottenuto con il nuovo modello E+. I grafici della simulazione E+TEA ENEA 2020 mostrano infatti un andamento molto più congruo rispetto alle curve di monitoraggio MONITOR ENEA 2020, in particolare rispetto ai valori di UR, conseguito sia mediante l'affinamento del modello geometrico, sia mediante una più precisa simulazione degli scambi convettivi per ventilazione, sia soprattutto attraverso l'implementazione della formula di Baille e il calcolo in regime dinamico della potenza termica sottratta all'ambiente per evapotraspirazione.



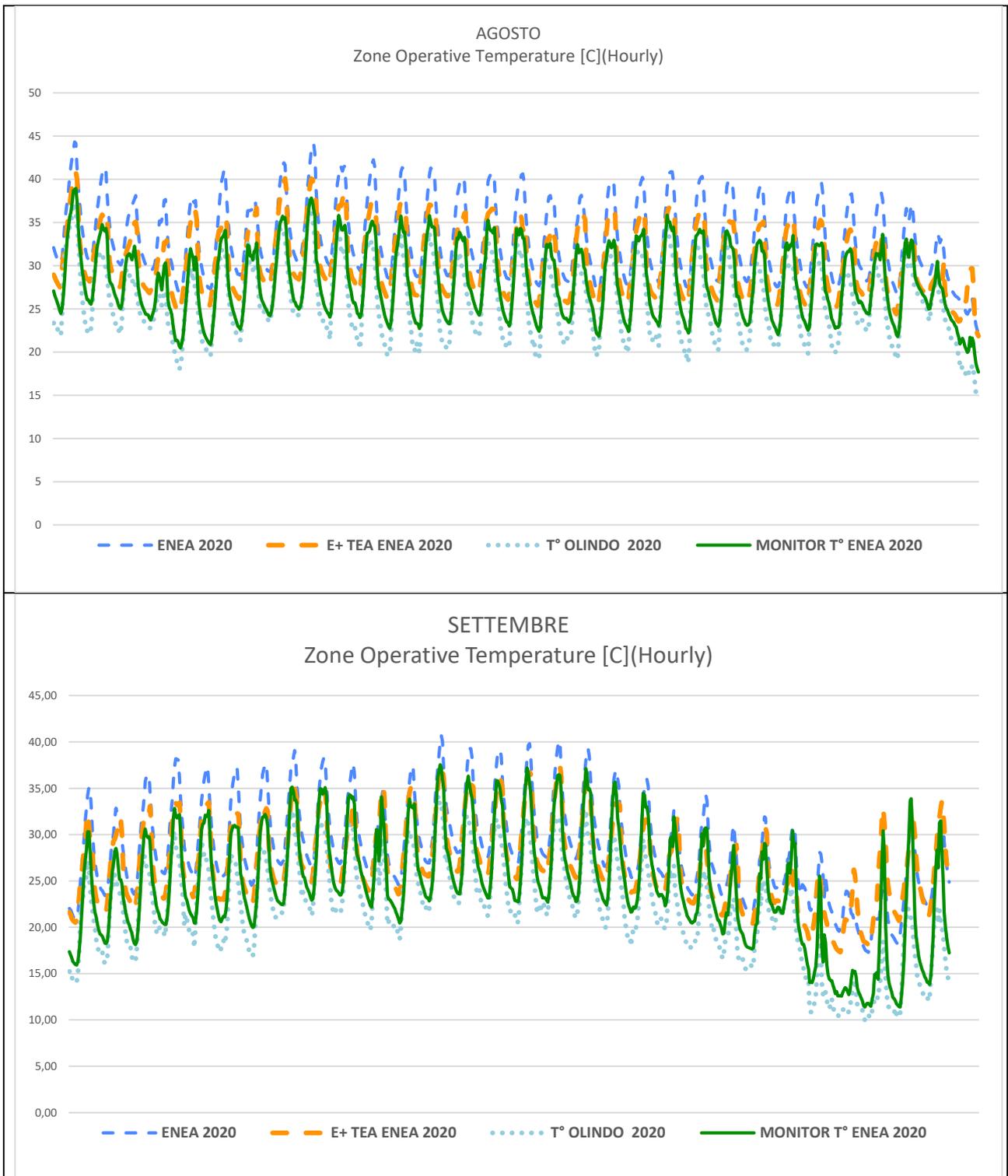
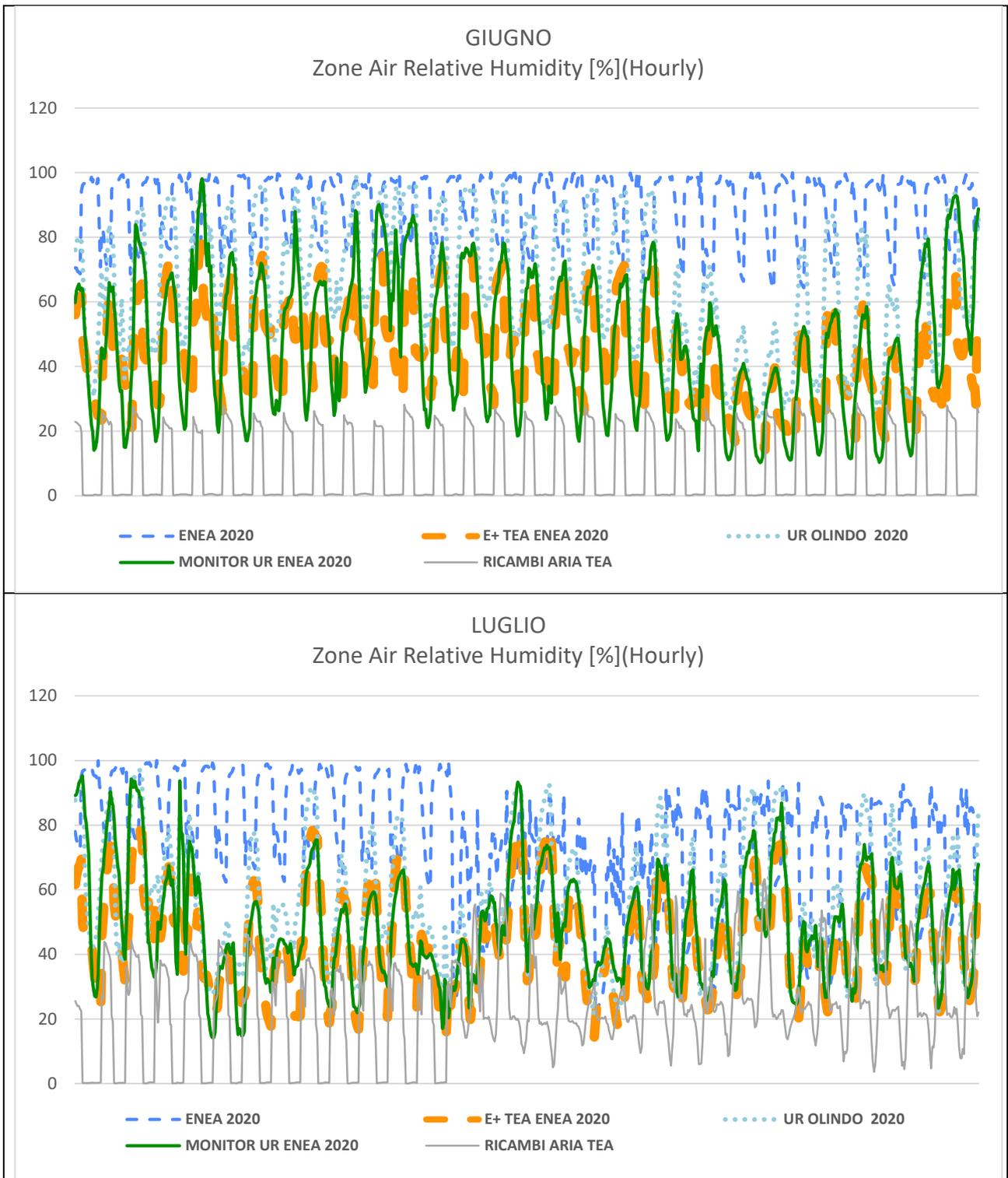


Figura 5 – andamento mensile della T° interna alla serra



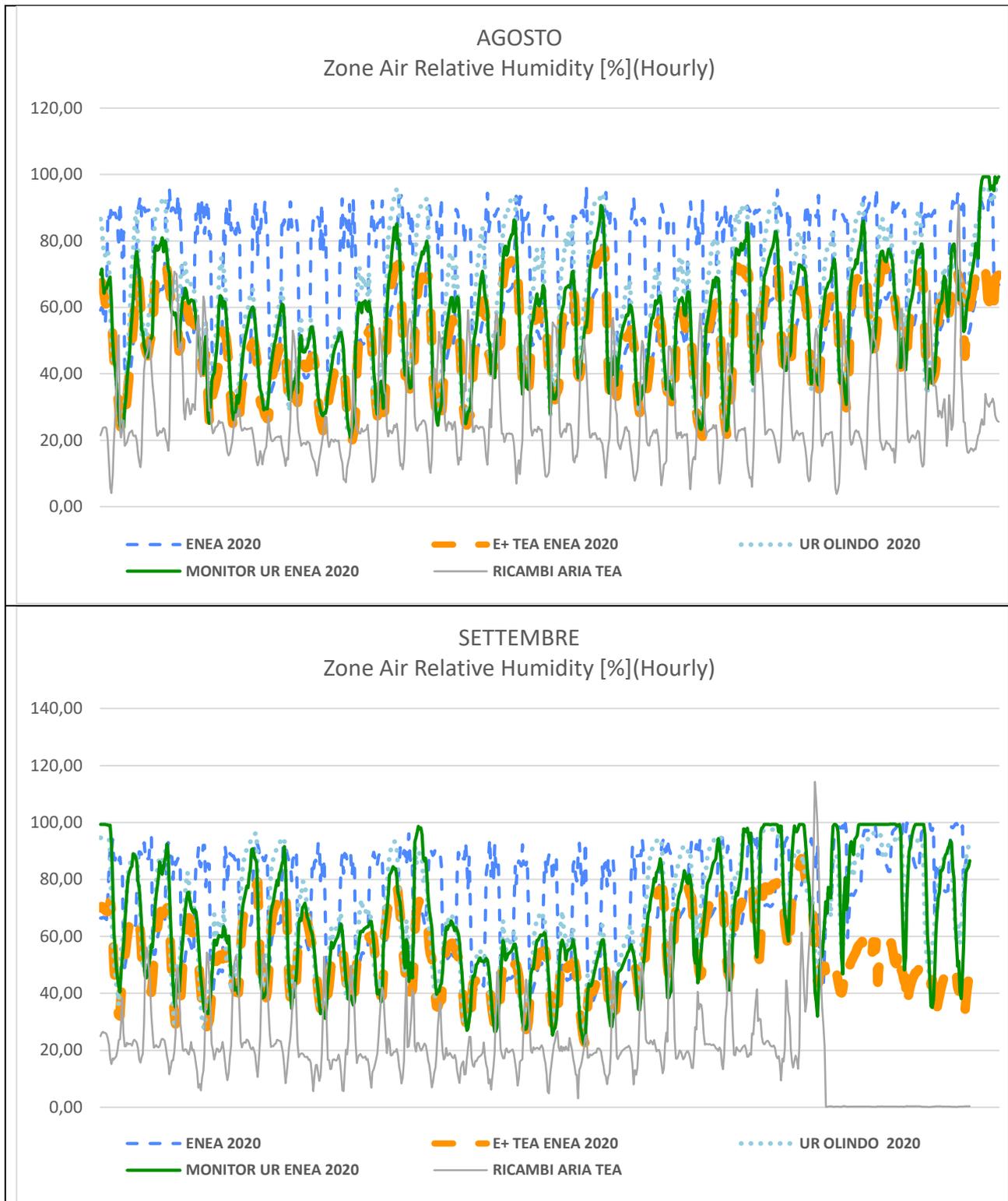


Figura 6 – andamento mensile della UR interna alla serra

Il miglioramento è apprezzabile con maggiore facilità nella lettura dei file climatici relativi ai giorni-tipo, come riportati di seguito in Figura 7

L'attendibilità del modello di EnergyPlus è stata quindi ampiamente ottimizzata rispetto a quanto sviluppato nel corso del primo anno di ricerca, con una congruenza ottimale tra gli andamenti delle curve di T° e UR del modello e del caso studio reale.

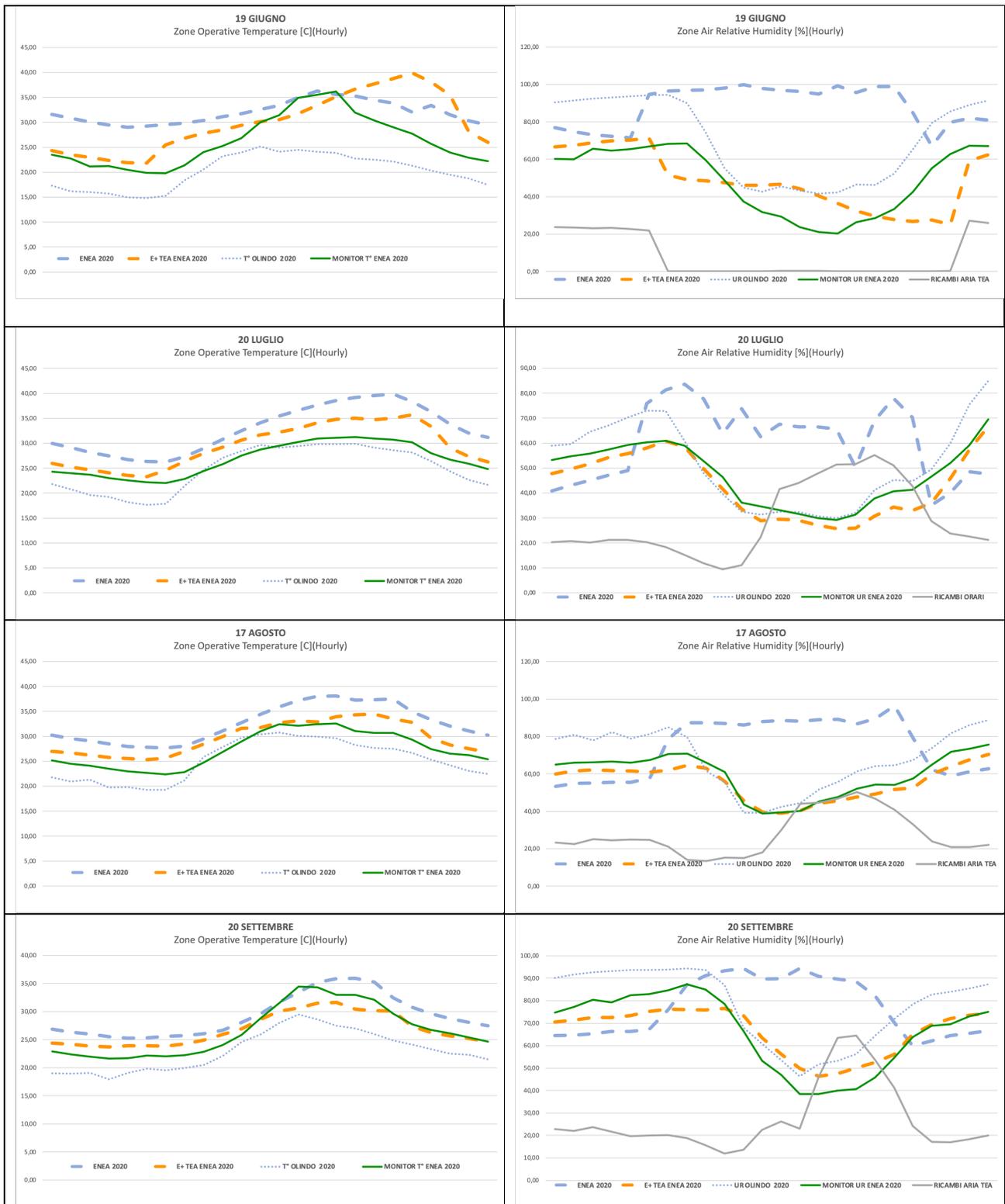


Figura 7 andamento della T° e UR interna alla serra nel giorno-tipo

2.4. Costruzione del modello climatico 2021

Nel corso dell'anno 2021 ENEA ha condotto una nuova simulazione con una diversa e più completa distribuzione di piante all'interno della serra e monitorato i parametri termoisometrici esterni ed interni attraverso i medesimi sensori precedentemente installati.

Purtroppo nel corso dell'anno il rilevamento ha subito numerose interruzioni e il file climatico scaricato dalla piattaforma OLINDO per l'anno 2021 risulta quindi largamente incompleto.

Per sopperire a queste carenze di dati, si è fatto riferimento alla piattaforma Meteonorm, ricavando, per l'anno 2021, un file climatico generato per la località specifica Casaccia Edificio F92 (lat 42.04; long 12.30).

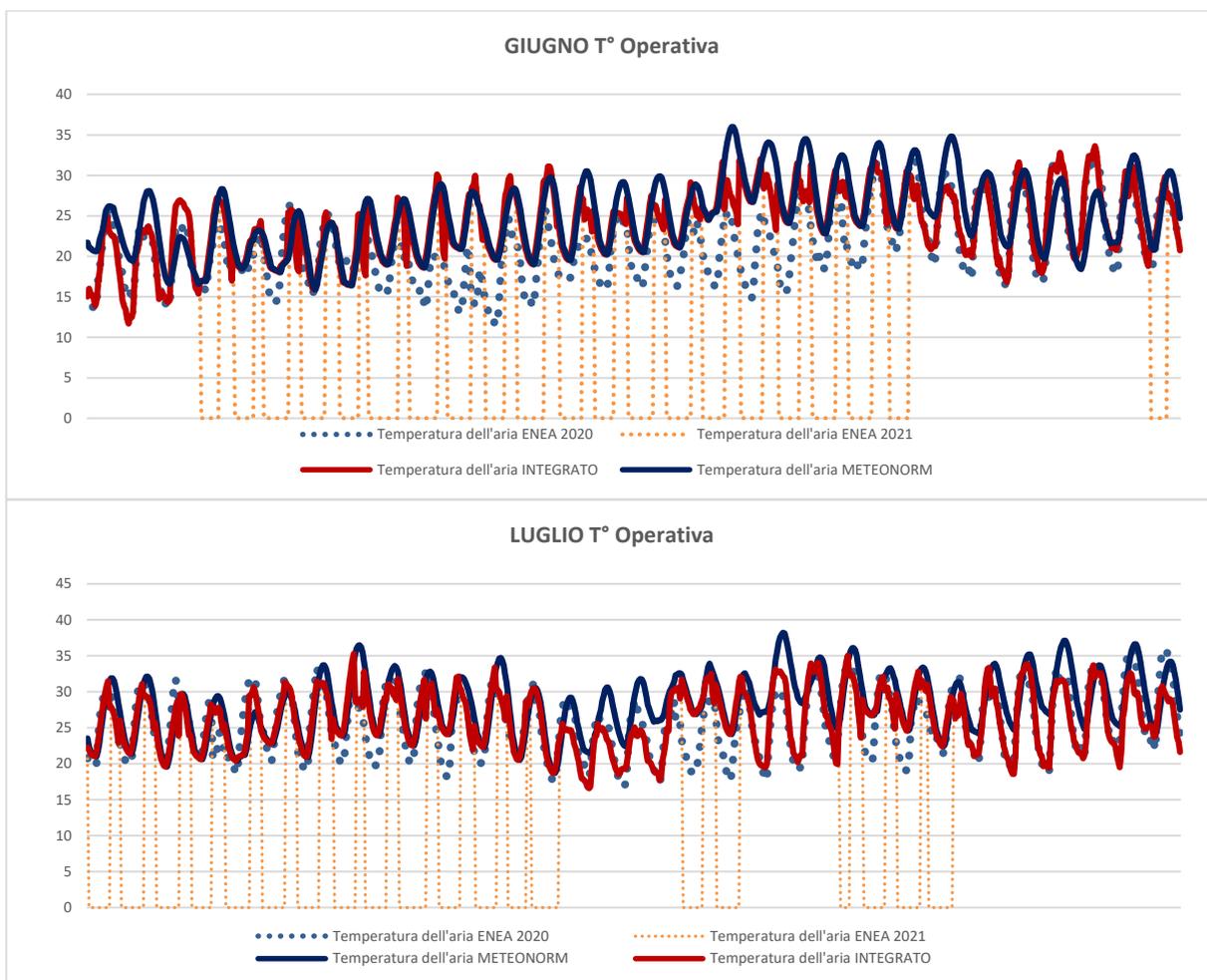
Nel weather-file così generato, sono stati sostituiti i dati disponibili dalle centraline di monitoraggio, generando quindi un file climatico "ibrido" contenente cioè dati specifici rilevati dal monitoraggio in situ e dati generici scaricati dalla piattaforma Meteonorm.

In particolare, sono stati integrati dati relativi ai seguenti parametri:

- Dry Bulb Temperature {C}**
- Relative Humidity {%}**
- Global Horizontal Radiation {Wh/m2}**
- Wind Direction {deg}**
- Wind Speed {m/s}**
- Liquid Precipitation Depth {mm}**

Tale file è stato utilizzato in E+ per la simulazione energetica.

In Figura 8 sono riportati i grafici dei file climatici a confronto relativi all'andamento della T° esterna



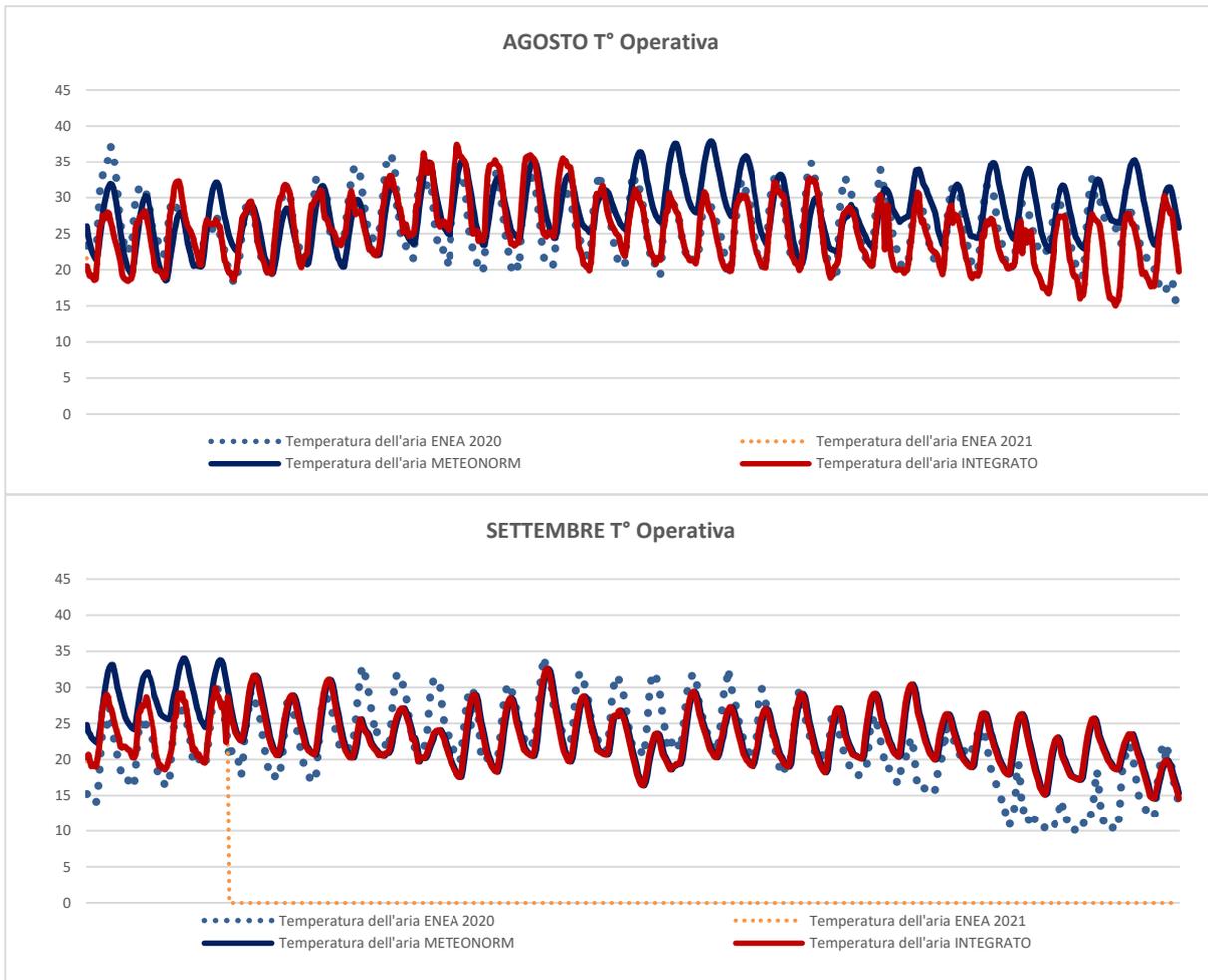
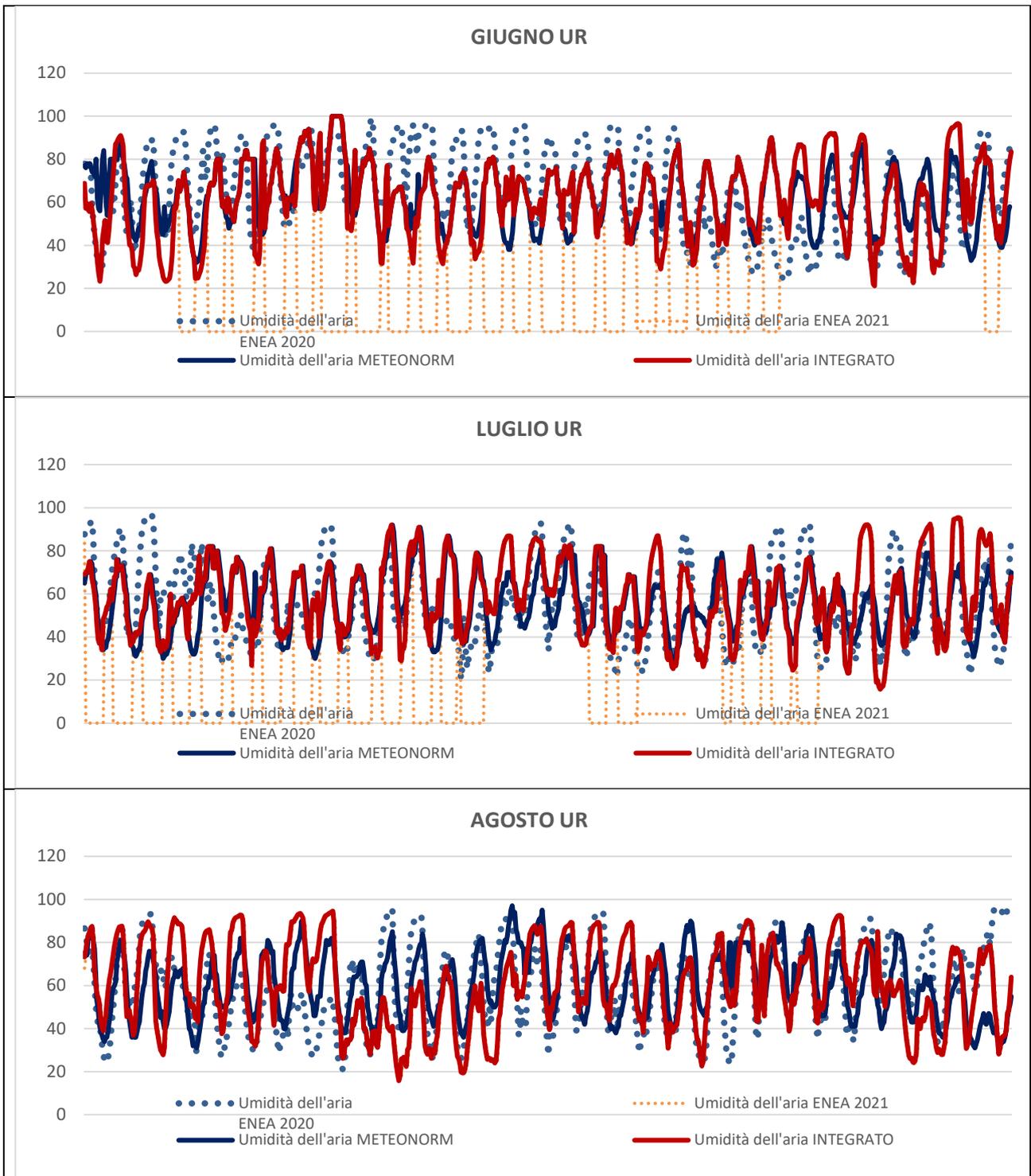


Figura 8 andamento delle curve di temperatura nei diversi file climatici

In Figura 9 sono riportati i grafici dei file climatici a confronto, relativi all'andamento della UR esterna

In Figura 10 sono riportati i grafici dei file climatici a confronto, relativi all'andamento della velocità del vento

In Figura 11 sono riportati i grafici dei file climatici a confronto, relativi all'andamento della radiazione solare diretta



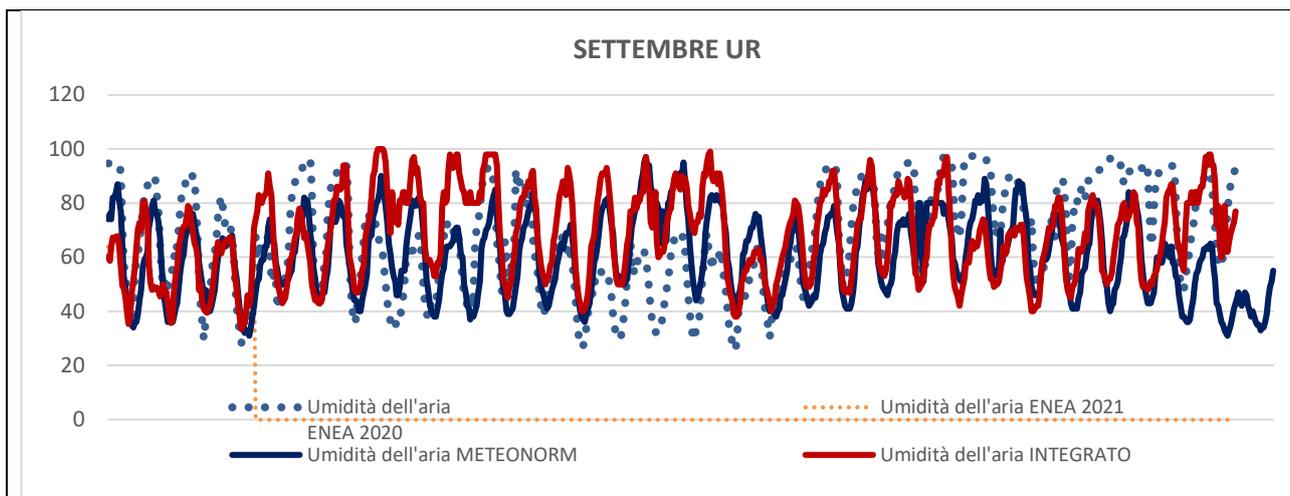
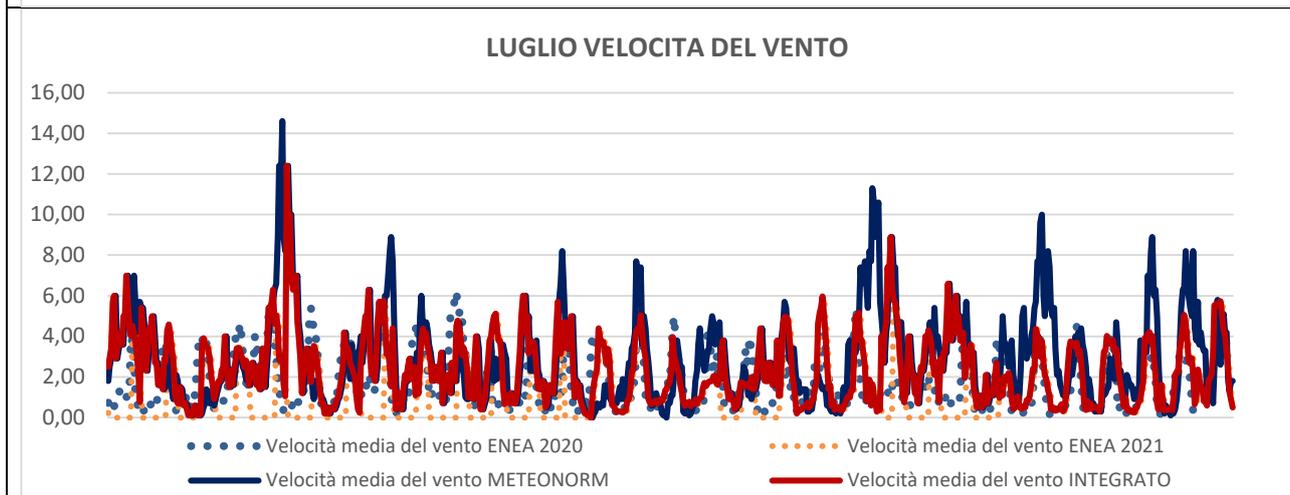
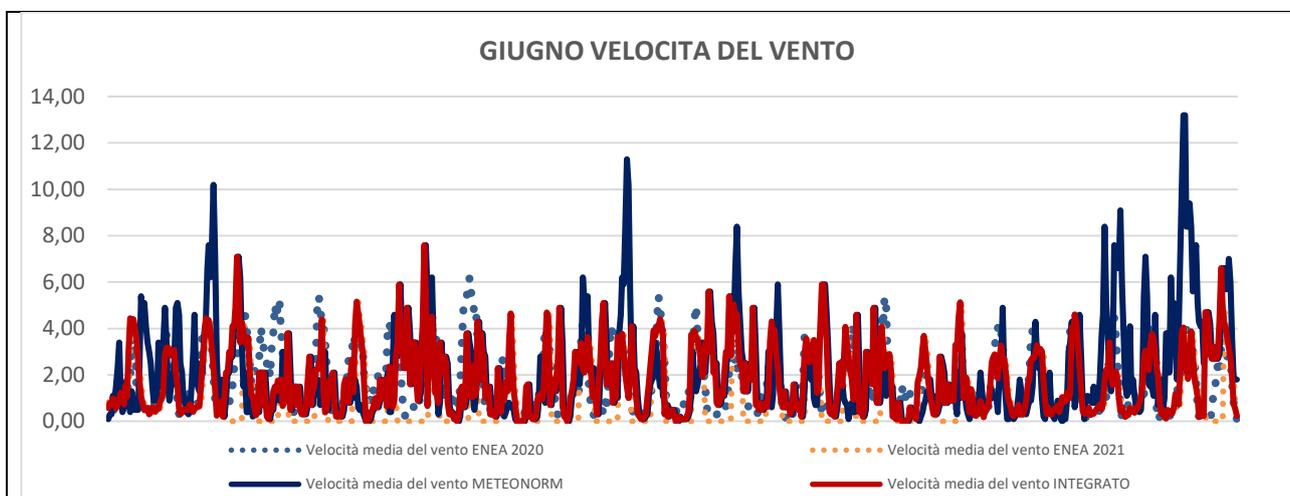


Figura 9 andamento delle curve di umidità relativa nei diversi file climatici



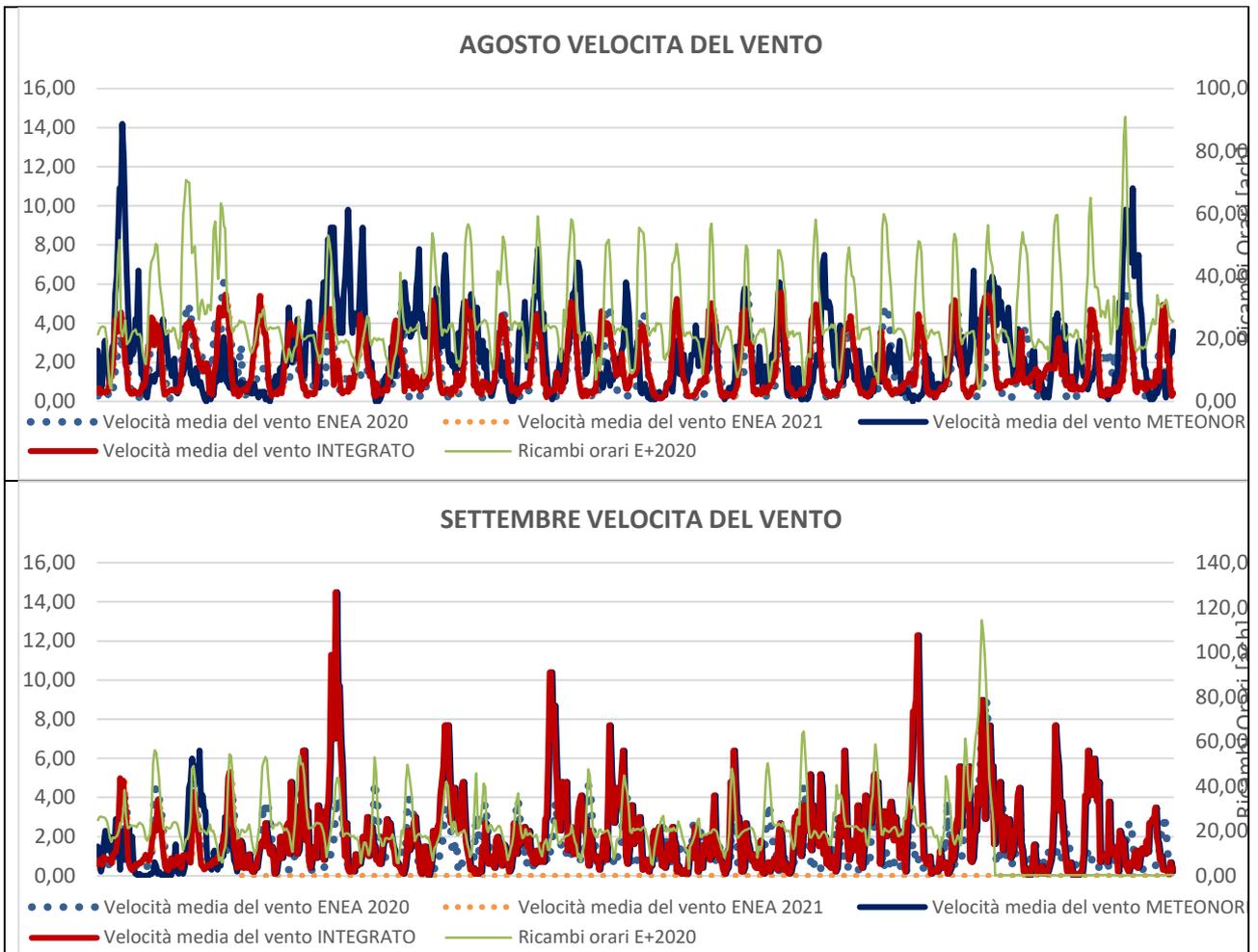
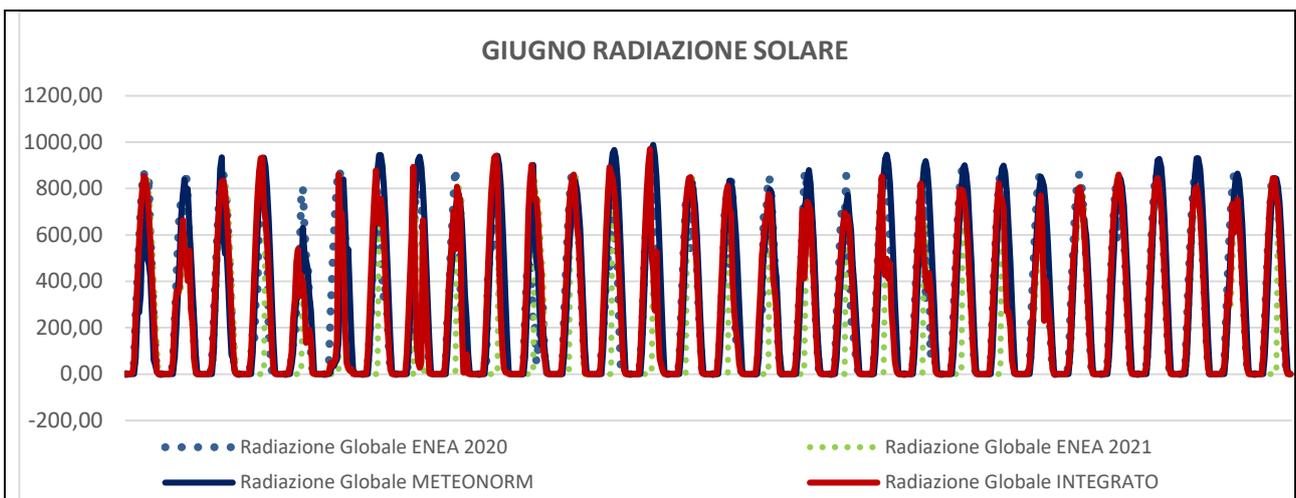


Figura 10 andamento delle curve di velocità del vento nei diversi file climatici



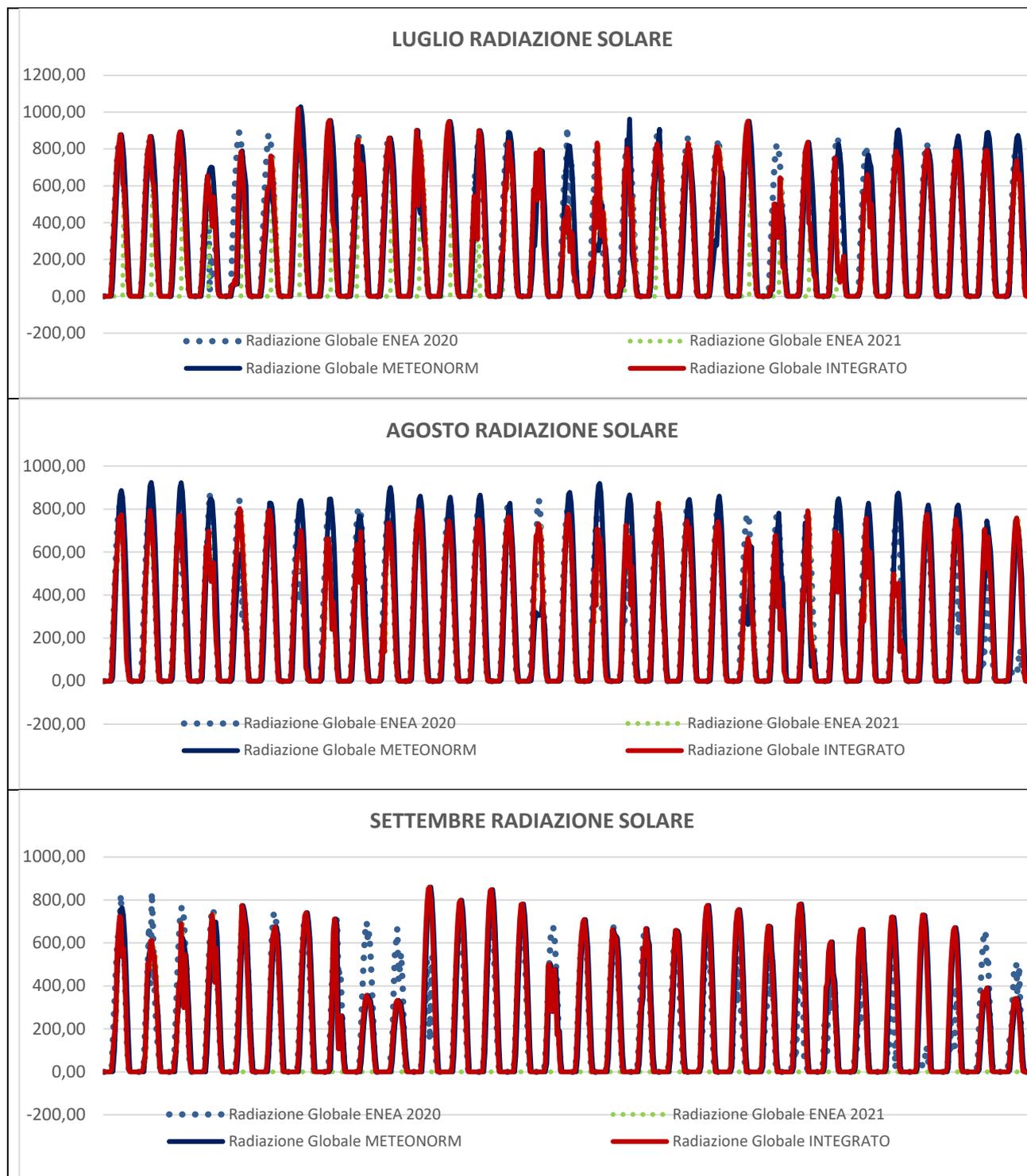


Figura 11 andamento delle curve di irraggiamento nei diversi file climatici

2.5. Ulteriore implementazione del modulo Greenhouse

Stimolati dalla presenza di essenze diverse nella serra, e dallo scenario di utilizzo degli spazi, con l’apertura e la chiusura delle finestre e degli oscuranti, ma soprattutto con l’improvvisa eliminazione di alcuni elementi verdi dall’ambiente confinato, il modulo *Greenhouse* è stato ulteriormente implementato includendo la possibilità di indicare un giorno di “ingresso” delle piante nella serra e un giorno di “uscita” e

il livello di crescita delle piante al momento del loro posizionamento nella serra in modo da poter simulare e variare all'occorrenza i parametri che influenzano la formula di calcolo dell'evapotraspirazione del modulo *Greenhouse*.

In particolare, è stato sviluppato un secondo script di Python in grado di correlare i valori di LAI al momento del posizionamento delle piante in serra con la T_{base} di riferimento per la specie vegetale e i gradi giorno di crescita specifici per la località e il periodo temporale in esame e descrivere e calcolare quindi l'incremento del valore di LAI in relazione alle condizioni climatiche a contorno.

Lo sviluppo dell'area fogliare della pianta è descritto come funzione della fisiologia della pianta (utilizzando i gradi giorno o GDD, ossia i "Growing Degree Days").

Il modello lavora simulando intervalli di tempo giornalieri. Gli stadi di sviluppo sono stimati mediante l'accumulazione dei GDD (Growing Degree Days, °C). Il modello di crescita della coltura è basato sull'approccio dell'efficienza di uso della radiazione [5] [6] in quanto ciò permette una descrizione relativamente semplice dei fattori chiave che influenzano l'accumulo di sostanza secca nella pianta

I gradi crescenti (GDs) sono definiti come il numero di gradi di temperatura al di sopra di una certa temperatura di base soglia, che varia tra le specie di colture.

La temperatura di base è quella temperatura al di sotto della quale la crescita delle piante è zero. I GDD sono calcolati ogni giorno come riportato più avanti nel testo. Le GDD vengono accumulate sommando il contributo giornaliero di GD man mano che la stagione avanza.

Una formula semplificata per il calcolo dei GDD si basa sulla media tra la temperatura massima e minima giornaliera, rispetto alla T_{base}

$$GDD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}$$

I valori di T_{base} sono ricavati dalla letteratura e mediamente valutati, per le colture presenti nella serra, come riportato in Tabella 1

Per il calcolo del valore di LAI al variare dei GDD si è utilizzata la formula in [7], che esprime il LAI come funzione sigmoide del tempo termico accumulato (espresso in GDD)

$$LAI = a_1 + \frac{(a_2 - a_1)}{1 + e^{\left(\frac{a_3 - GDD}{a_4}\right)}}$$

dove

$$a_1 = -0.335$$

$$a_2 = 4,803$$

$$a_3 = 755,3$$

$$a_4 = 134,7$$

sono i coefficienti di regressione

Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
InitializeLAI GDD	ComputeVPD	ComputeLAI	UpdateTemps	ComputeGDD	StartGrowth
SET LAI = 0.0	SET ExpArg = -392	IF simstarted == 1	IF Hour == 0	IF simstarted == 1	IF DayOfYear == 17
SET GDD = 0.0	Set VPD = 0.6215*(IF growthstarted ==	SET dailyTmax = Zc	IF Hour == 23	SET growthstarted =
		SET a1 = -0.335	SET dailyTmin = Zo	IF Minute <= 15	ENDIF
		SET a2 = 4.803	ELSE	SET Tbase = 10	IF DayOfYear == 29
		SET a3 = 755.3	SET dailyTmin = @t	SET possibleGDD =	SET growthstarted =
		SET a4 = 134.7	SET dailyTmax = @	IF growthstarted ==	ENDIF
		SET ExpArgLAI = (a	ENDIF	Set GDD = GDD + (
		SET NewLAI = a1 +		ENDIF	
		Set LAI = @Max Ne		ENDIF	
		Set LAI = @Min LAI		ENDIF	
		Set LAI = @Max LA		ENDIF	
		ENDIF			
		ENDIF			

Figura 12 la subroutine per il calcolo dei GDD e del LAI variabile

Ipotizzando quindi un valore di LAI corrispondente allo sviluppo fogliare delle piante al momento del loro ingresso nella serra e valutato il valore di GDD nel giorno di ingresso, il modello Greenhouse è in grado di stimare la crescita della pianta variando il valore di LAI e di conseguenza il valore calcolato di ET_m .

In questo modo, modificando i valori di LAI iniziale e di T_{base} , è possibile simulare anche l'effetto che diverse specie vegetali, a parità di condizioni, possono produrre all'interno della serra.

Il modulo integra inoltre una funzione di massima crescita possibile, che limita l'ulteriore incremento del valore di LAI al raggiungimento del valore limite per la specie in analisi o del periodo di crescita fisiologico (3-4 mesi)

Il livello di personalizzazione dell'attuale modello *Greenhouse*, costituisce quindi un indubbio miglioramento in termini di affidabilità e sensibilità ed è in grado di restituire risultati attendibili nella simulazione delle serre verdi come risultante dalla Figura 13 e Figura 14 in cui, in verde, sono riportati i grafici ricavati dai sensori di monitoraggio ENEA, in arancio i grafici elaborati dal modello E+ con *Greenhouse*, in rosa i grafici elaborati dal modello E+ con *Greenhouse* e LAI dinamico.

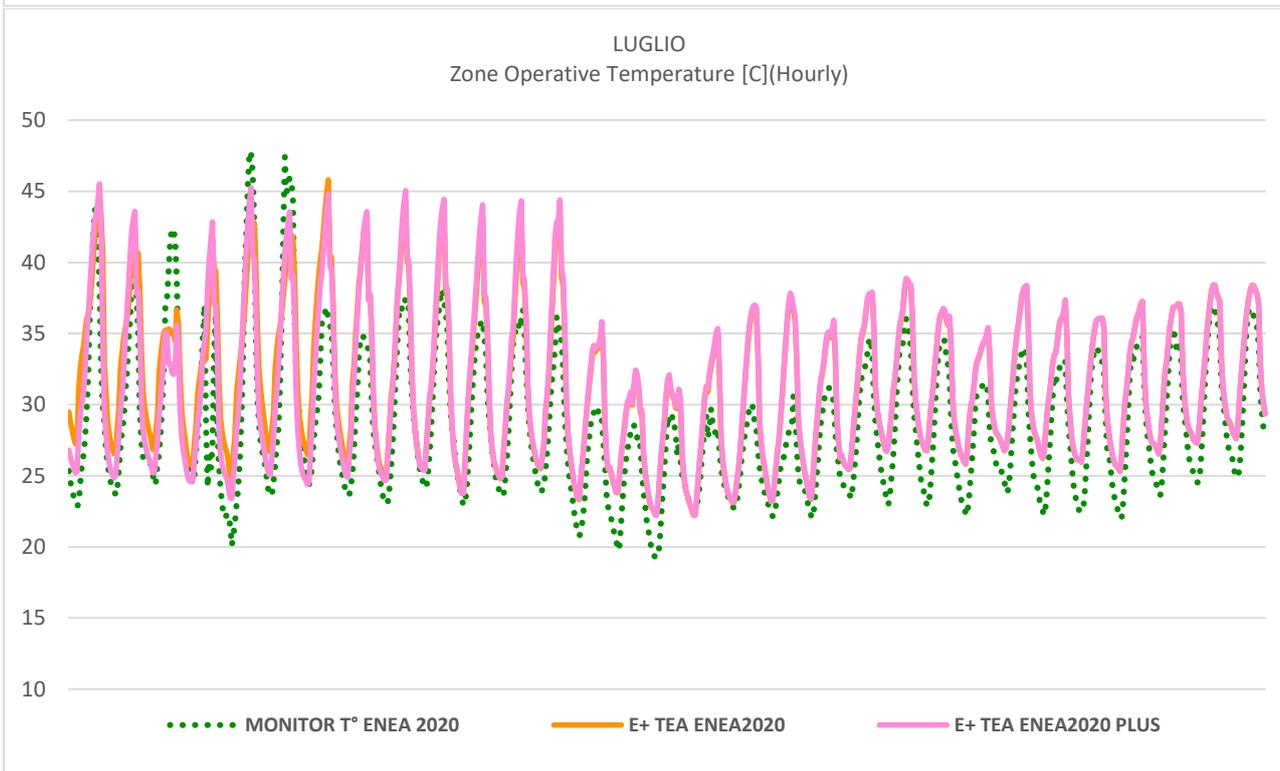
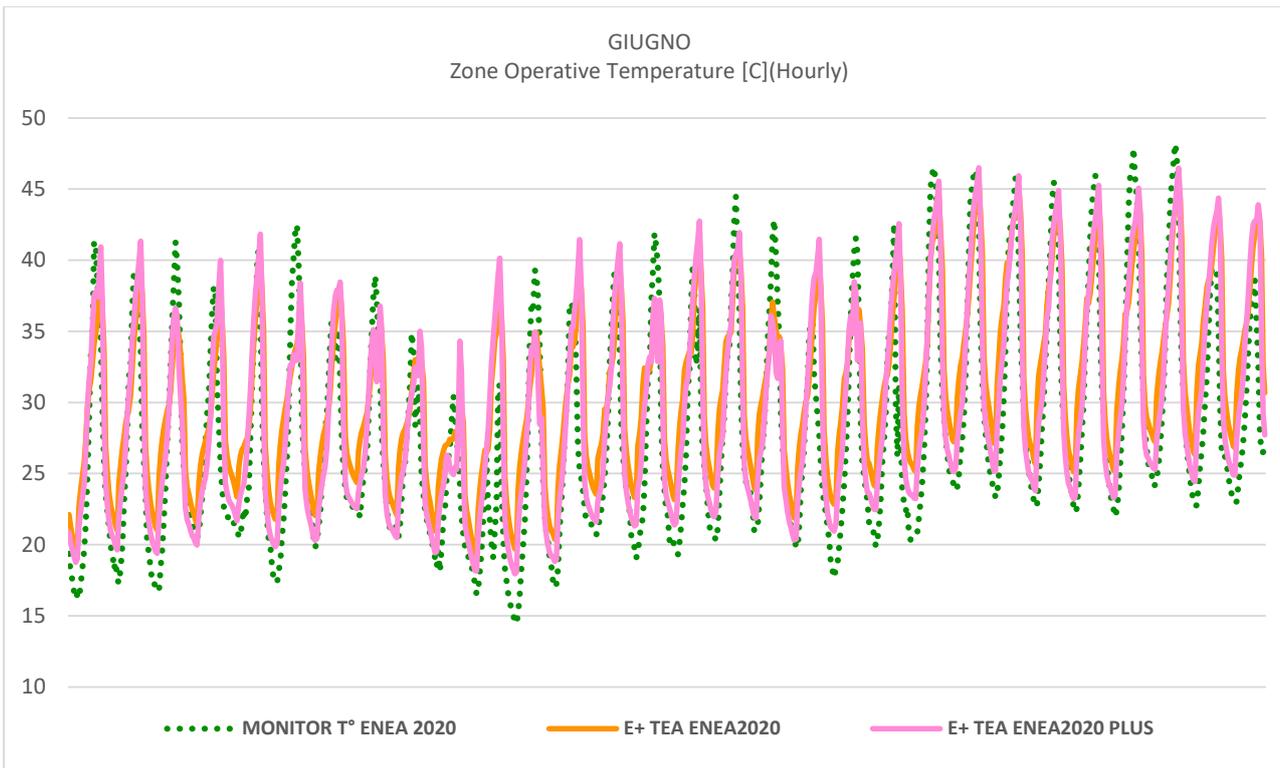
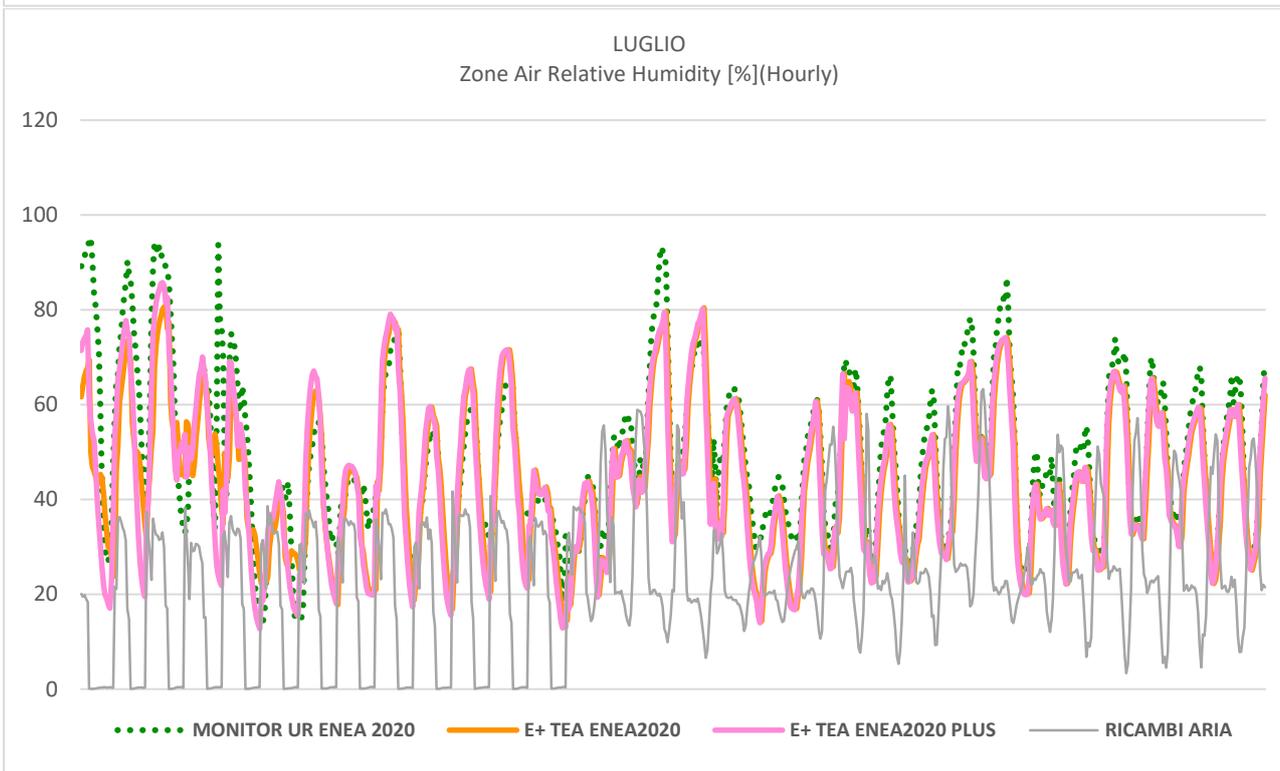
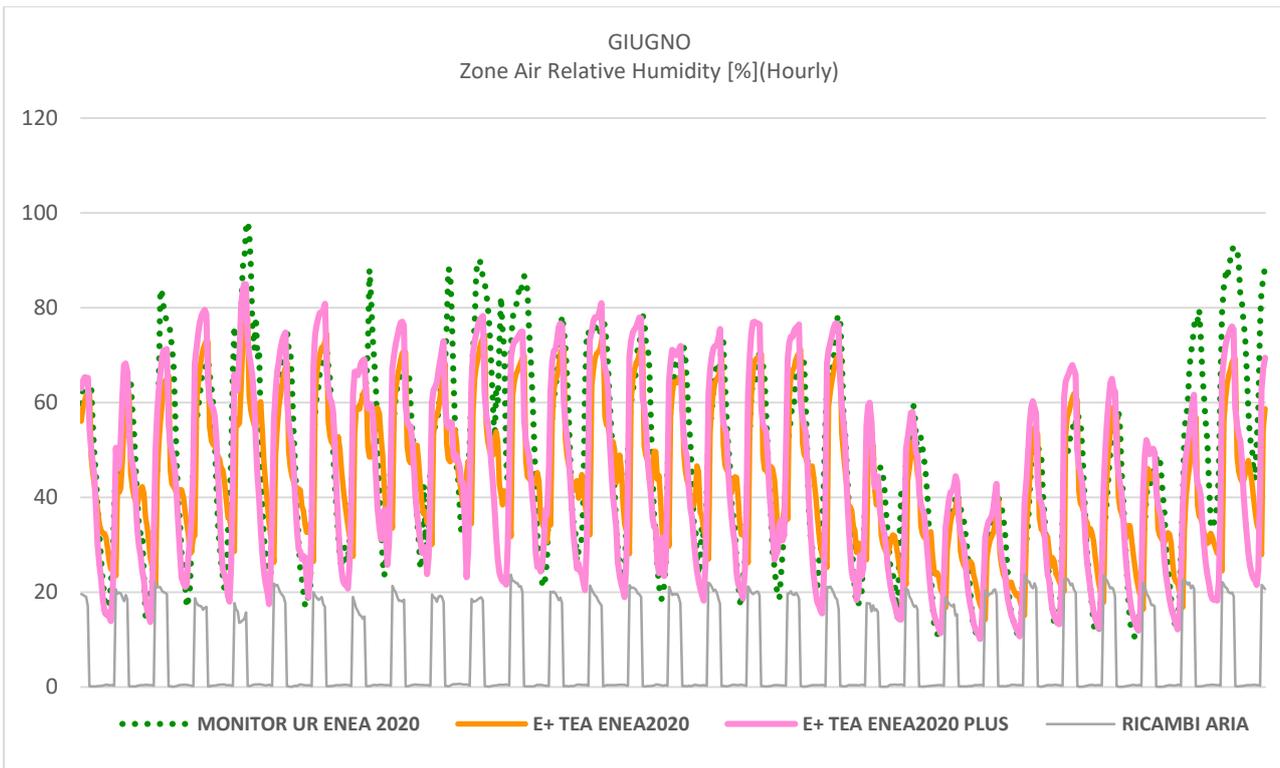




Figura 13 analisi a confronto delle curve di T° elaborate dai due modelli di Energy plus ottimizzati



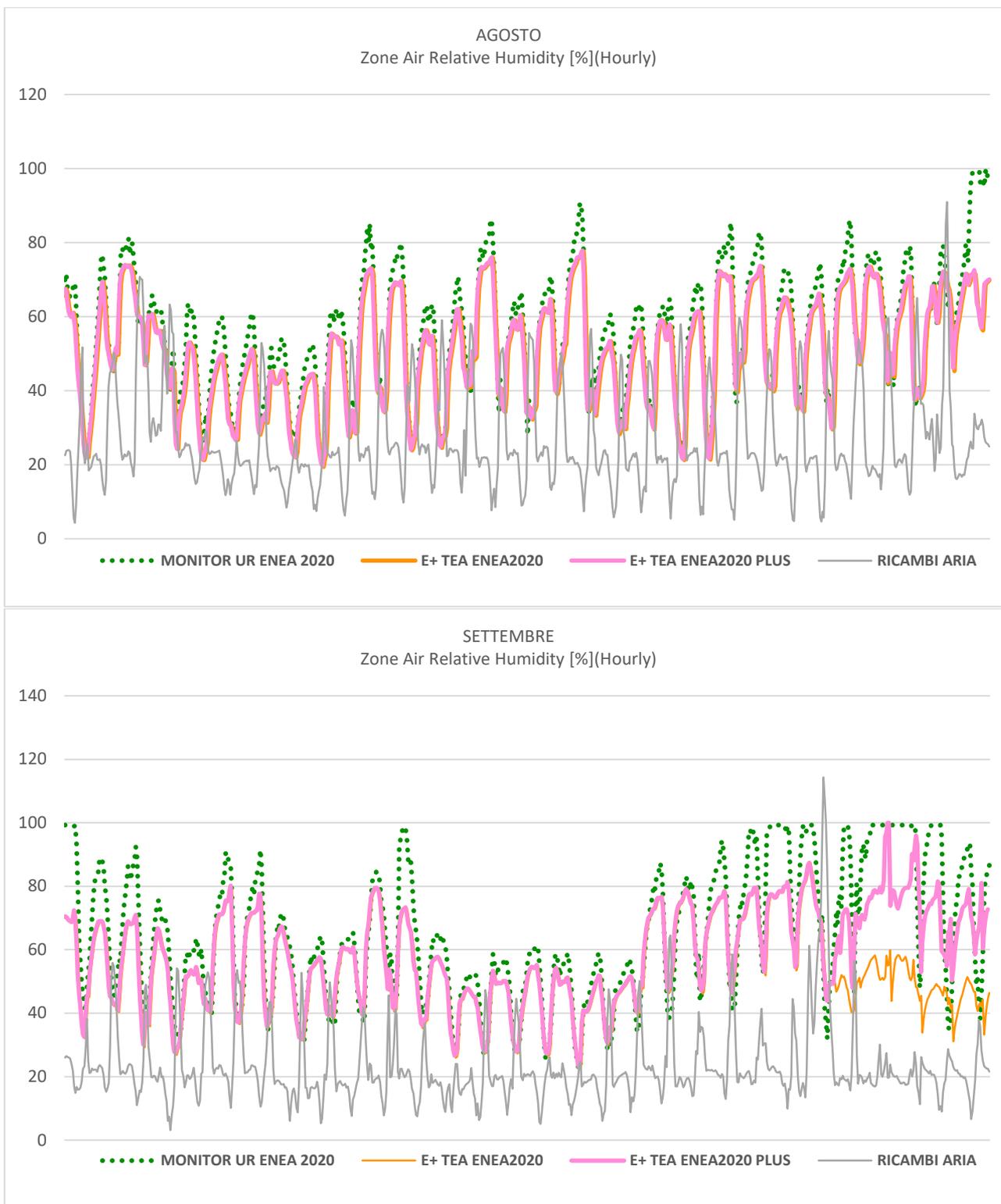


Figura 14 analisi a confronto delle curve di UR elaborate dai due modelli di Energy plus ottimizzati

2.6. Analisi critica del nuovo modello EnergyPlus

Il nuovo modello di EnergyPlus, aganciato al file climatico 2021 generato come sopra descritto (2.3), è stato definito tenendo quindi conto delle configurazioni relative alla apertura/chiusura delle finestre, alla apertura/chiusura delle schermature così come dettagliate in 2.1 per verificare la congruenza con i dati di

monitoraggio ricavati dalla piattaforma OLINDO e confermare quindi, la sensibilità del modello nel tracciare il comportamento di una serra.

Purtroppo per l'annualità 2021, le centraline di monitoraggio hanno subito, come precedentemente evidenziato, numerosi stop e i rilevamenti nel periodo di Giugno-Luglio-Agosto-Settembre sono ampiamente incompleti.

Dati completi sono disponibili solo per pochi giorni consecutivi, al termine del mese di Giugno e al termine del mese di Luglio.

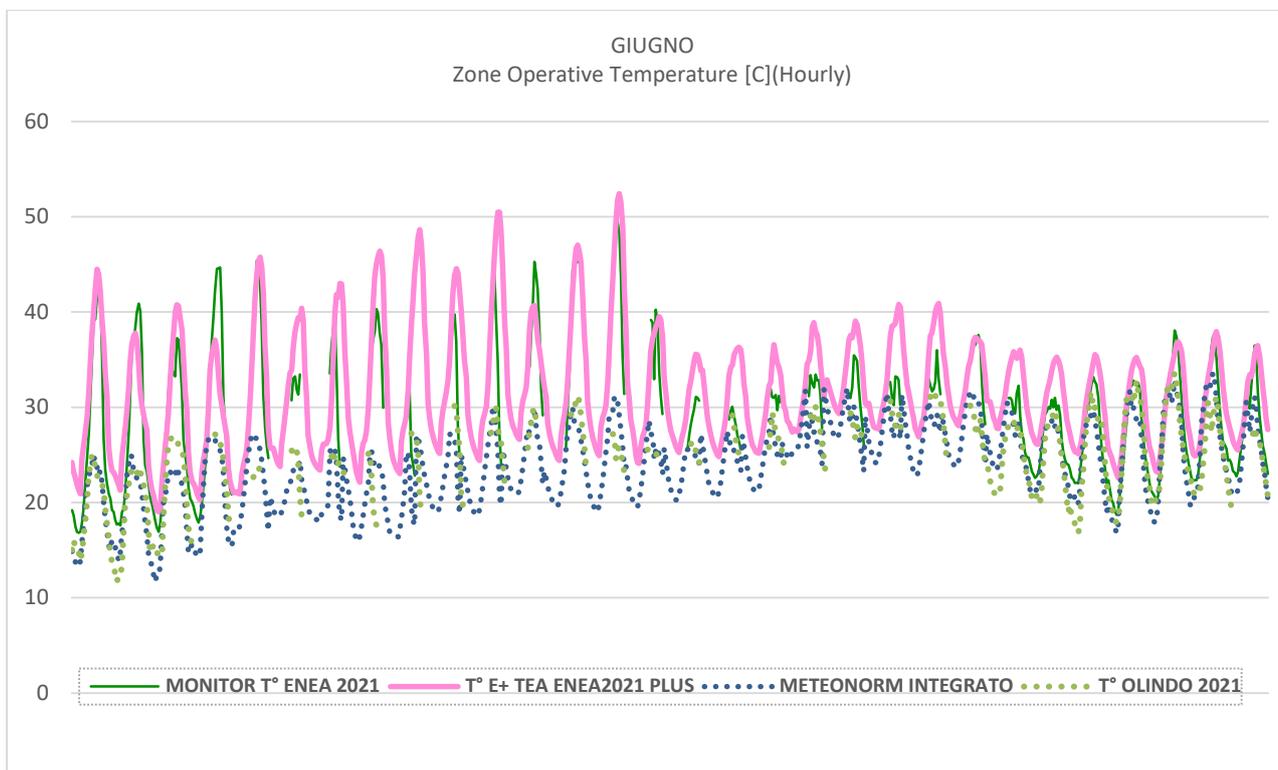
Questo compromette ogni ulteriore verifica del modello dal momento che, in un calcolo dinamico, la congruità e completezza dei dati per un periodo prolungato è condizione essenziale per un corretto calcolo dei parametri termodinamici.

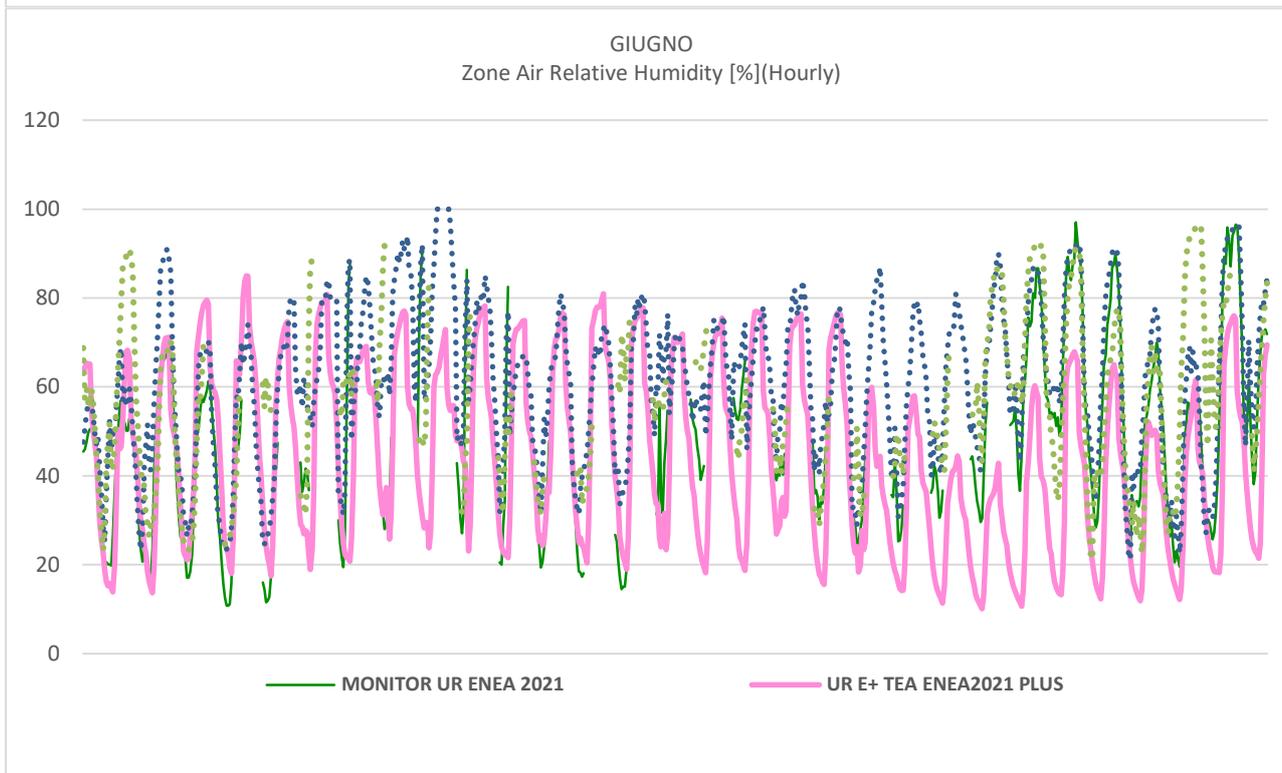
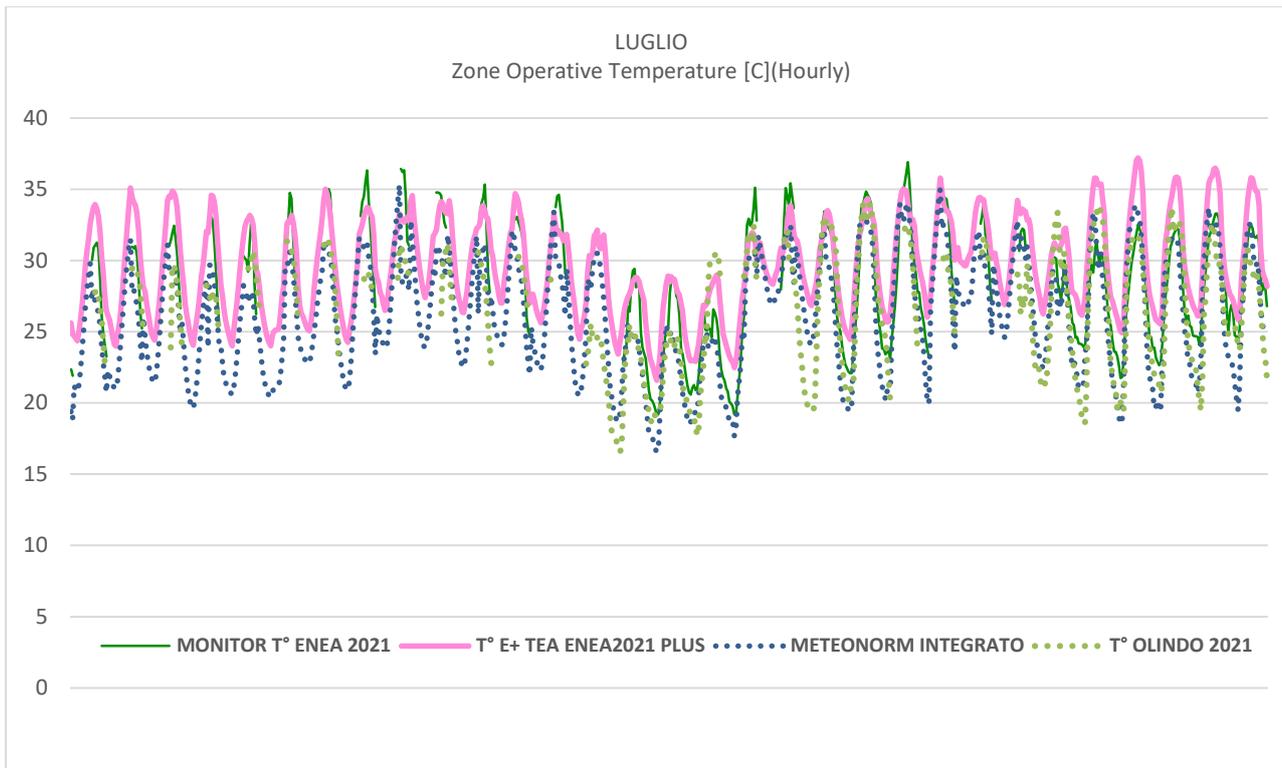
Il file climatico ricostruito come descritto in 2.3 consente di avere a disposizione una serie completa di dati, relativamente ai parametri impiegati dal motore di Energy Plus e nello specifico dal modulo *Greenhouse* ma l'integrazione con i dati generici di Meteonorm ha compromesso la congruenza rispetto ad una simulazione condotta con un file climatico interamente generato a partire dai dati di monitoraggio, come per l'annualità 2020.

Conseguentemente, le variazioni apprezzabili nelle sinusoidi di T° e UR di cui alla Figura 15, si ritiene possano essere ampiamente riconducibili a queste discordanze che non consentono quindi ulteriori riflessioni sul modello stesso.

Inoltre alla data del 27 di Luglio, sono state installate lampade LED, abbassati gli oscuranti e trasferite parte delle piante in copertura.

Questa modifica sostanziale dello scenario compromette il corretto funzionamento del modulo *Greenhouse* dal momento che non è possibile definire il livello di radiazione fotosinteticamente attiva attribuibile alle lampade LED e, conseguentemente, non è più possibile simulare, attraverso EnergyPlus, il comportamento della serra.





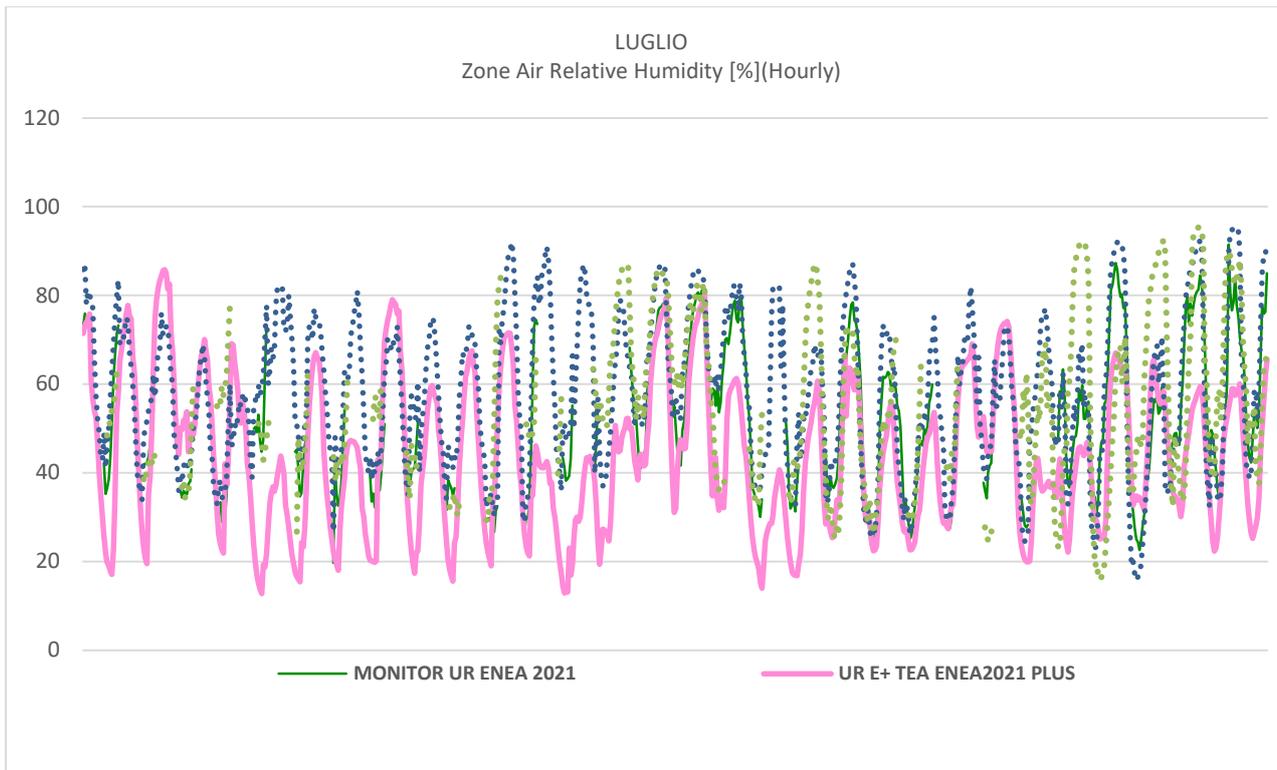


Figura 15 analisi a confronto delle curve di monitoraggio e di simulazione per l'anno 2021

L'analisi si è quindi concentrata non tanto sulla valutazione della coerenza tra i risultati della simulazione e i dati sperimentali, data per scontata l'affidabilità del modulo *Greenhouse* così come dimostrata in 2.2 , quanto piuttosto sulla verifica del contributo effettivo offerto dalle diverse specie vegetali al mantenimento del microclima interno.

Una prima simulazione è stata condotta quindi in totale assenza di piante, per verificare il contributo netto.



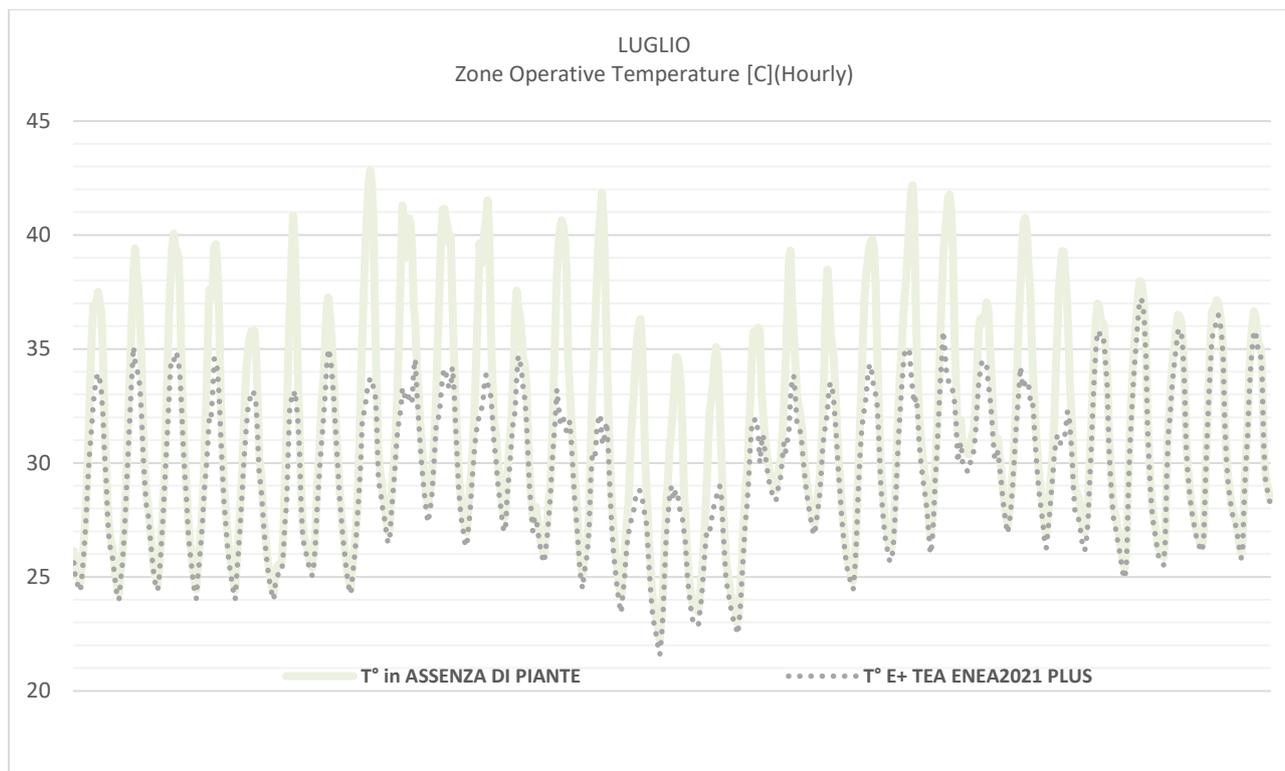


Figura 16 Analisi a confronto dei valori di T° operativa in presenza o in assenza di elementi vegetali

Lo scenario di default, ossia quello utilizzato per la costruzione del modello di Energy Plus sulla base dei dati forniti da ENEA, prevede una superficie fogliare fotosinteticamente attiva pari a 5 m², un LAI iniziale pari a 1 (dalle immagini del giorno 23/06 si evince che sono state installate piante già sviluppate) e un periodo di accrescimento massimo, in cui la funzione fotosintetica produce uno sviluppo della pianta, di 90 giorni. Nello scenario in assenza di piante, le T° operative interne alla serra, nel periodo compreso tra il 23 Giugno (giorno di ingresso delle piante) e il 27/07 giorno di trasferimento delle piante in copertura, presentano valori superiori allo scenario di default con punte anche maggiori a 5°C nei mesi di Giugno e Luglio, a dimostrazione dell’effettivo contributo dell’apparato vegetale al mantenimento di adeguati livelli di comfort.

L’area della superficie fogliare sinteticamente attiva è il parametro che più influenza l’oscillazione della T° operativa. Come evidenziato nei grafici di Figura 17, un incremento della superficie verde di soli 2,5m² (dai 5mq dello scenario di default ai 7,5m² corrispondenti all’intera superficie della serra) comporta una diminuzione massima delle T° di 2,7°C nel mese di Giugno, ossia quando lo sviluppo della pianta non è ancora completo, e di 3,5°C nel mese di luglio, quanto il valore di LAI ha raggiunto il valore di 4,25. Mediamente quindi, l’incremento di 1 m² dell’area fotosinteticamente attiva, produce nella serra una diminuzione di circa 1,3°C della T° operativa.

Un ulteriore parametro in grado di influenzare positivamente l’oscillazione della T° interna è il valore di LAI al momento dell’ingresso delle piante nella serra, ossia la capacità che gli elementi vegetali hanno di agire immediatamente sul processo evapotraspirativo grazie ad uno sviluppo fogliare già avviato. Sono state quindi poste a confronto con lo scenario di default LAI = 1, due scenari alternativi: LAI = 0 corrispondente a piante in vaso appena seminate o comunque prive di germogli significativi, LAI =2 ossia piante con uno sviluppo fogliare già avanzato.

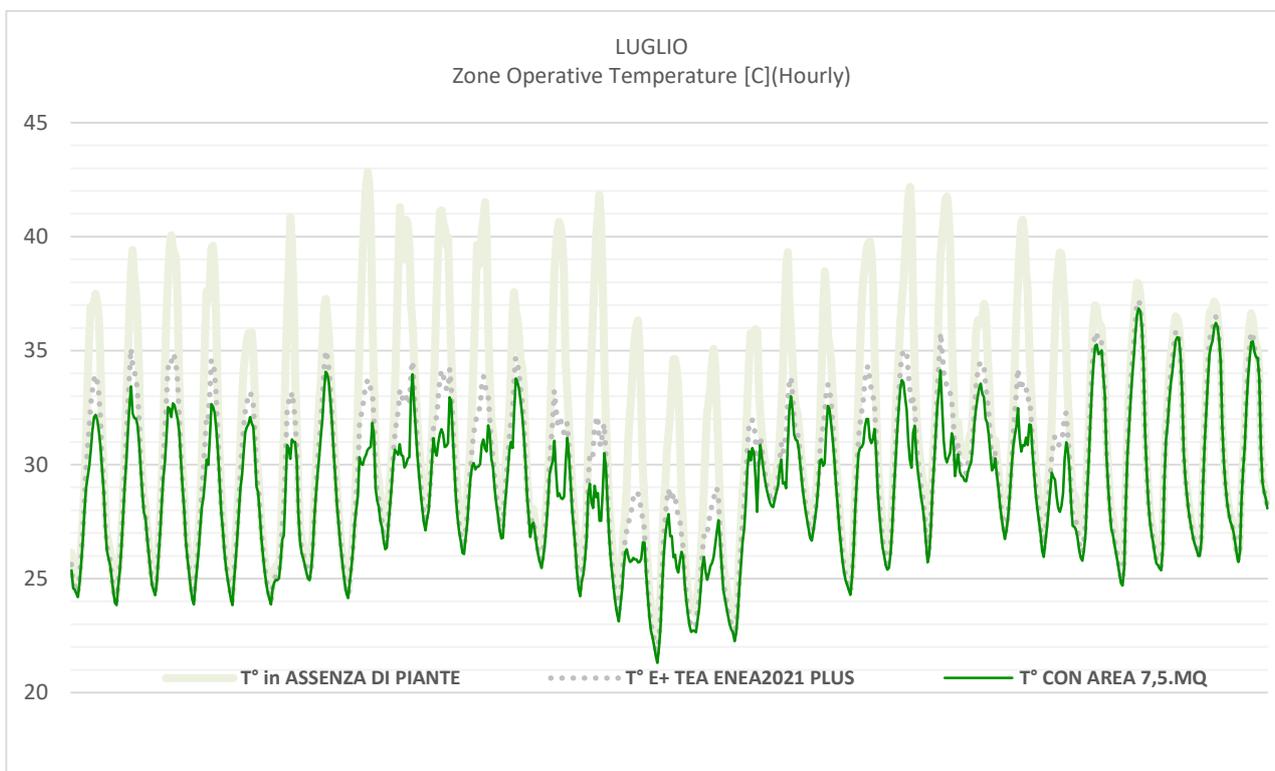
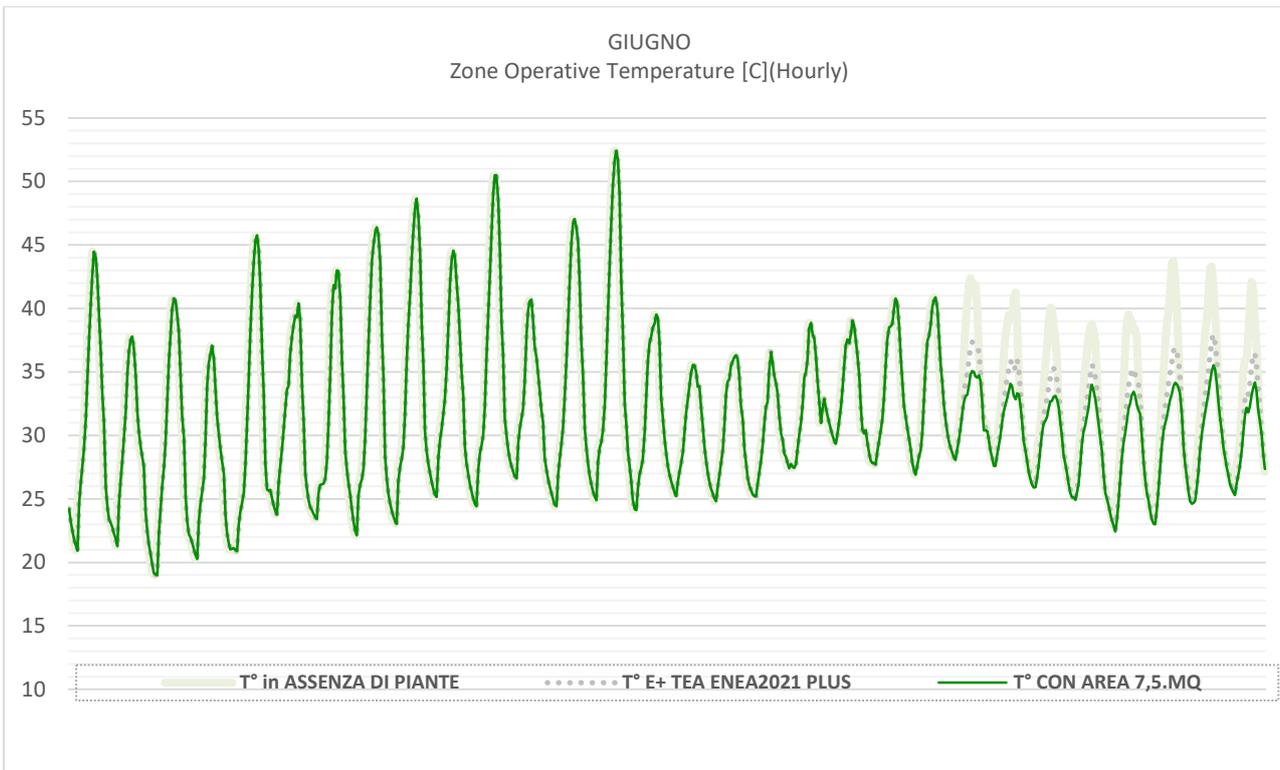


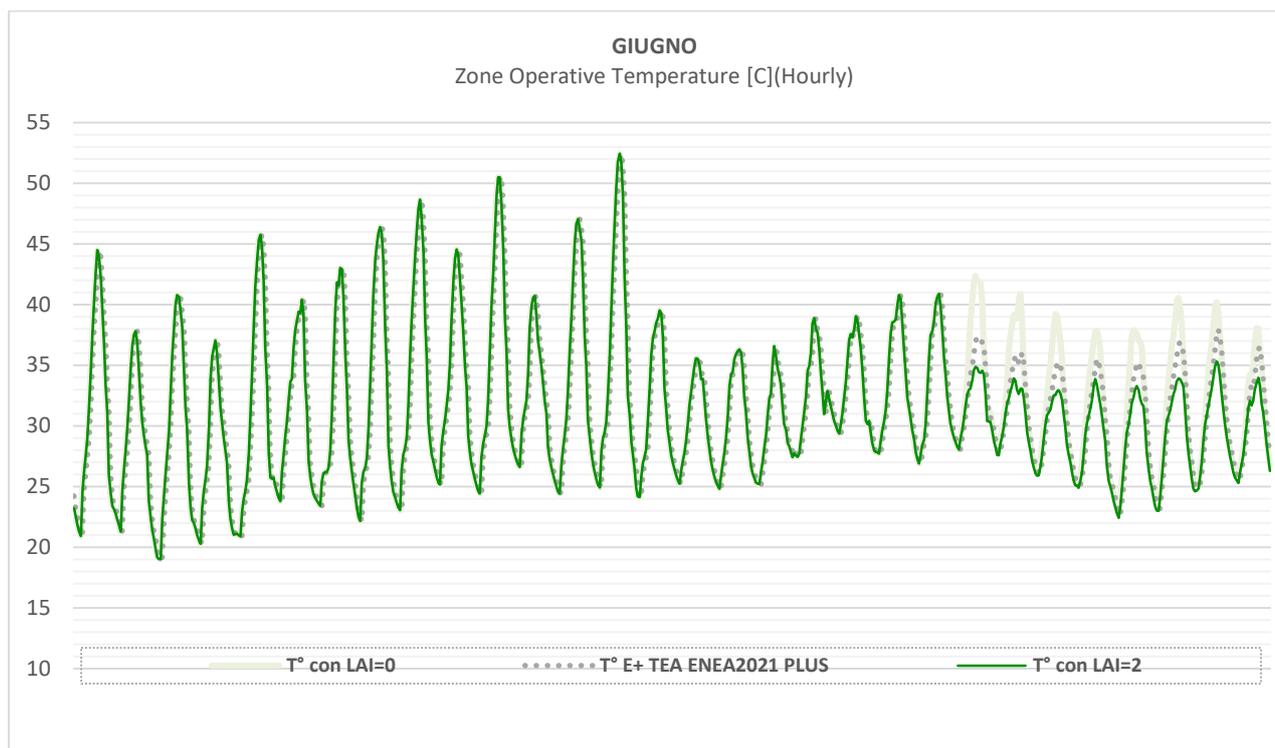
Figura 17 Analisi a confronto dei valori di T° operativa al variare della superficie fotosinteticamente attiva

Dai grafici di Figura 18 emerge come, nella primissima fase di accrescimento, la variazione unitaria del valore di LAI da 0 a 1 incida in misura maggiore rispetto al successivo accrescimento da LAI 1 a LAI 2. In particolare, la prima fase di crescita da LAI = 0 a LAI = 1 comporta una riduzione immediata di 5°C ma, con il successivo sviluppo della pianta, l'incidenza del valore di LAI sulla variazione della T° si riduce progressivamente.

La scelta di posizionare al giorno zero piante con un valore di LAI pari a 2 produce infatti un decremento della T° che non varia in maniera lineare rispetto alla variazione positiva del LAI e che deve essere valutata in relazione all'incidenza del valore economico di piante già sviluppate rispetto a piante a sviluppo appena iniziato.

Nel breve ciclo di sviluppo delle piante all'interno della serra ENEA, sono necessari 11 giorni affinché le piante con LAI 0 producano effetti tali da eguagliare i valori di T° dello scenario di default, generati da piante con LAI 1 al momento del loro posizionamento.

Per contro, inserire nella serra piante con un valore di LAI già significativo (LAI=2) consente di ottenere immediatamente una drastica riduzione dei valori della T° che si mantiene inferiore ai livelli di default per circa 17 giorni: successivamente i livelli di LAI raggiungono il valore soglia massimo per la specie vegetale in esame e le variazioni della temperatura nei tre casi ovviamente si azzerano.



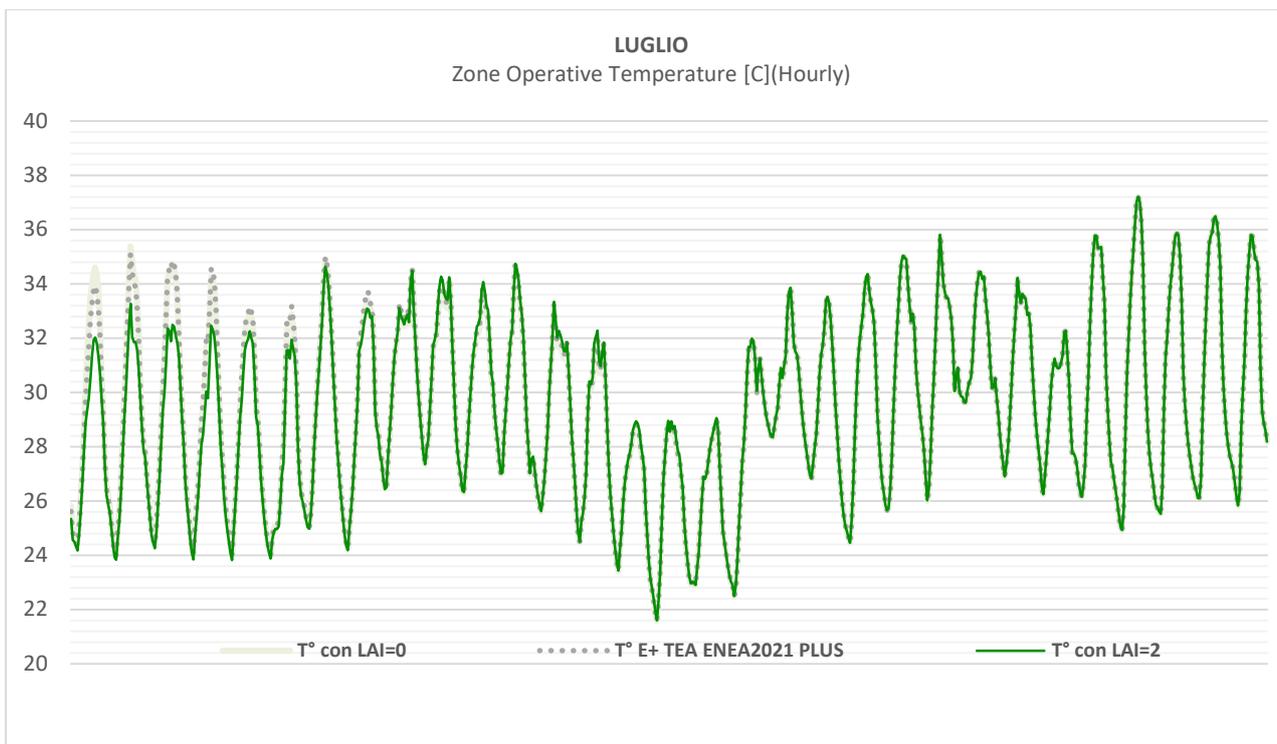


Figura 18 Analisi a confronto dei valori di T° operativa al variare del LAI (T° E+ TEA ENEA2021 PLUS corrisponde a LAI = 1)

3 Conclusioni

La ricerca ha portato alla progettazione, implementazione e validazione di un nuovo modulo per EnergyPlus denominato *Greenhouse* che è stato sviluppato per le esigenze specifiche del programma di ricerca ENEA e che ha consentito di condurre, attraverso l'uso del software, simulazioni in regime dinamico che tengano conto dell'apporto del processo evapotraspirativo naturale delle piante al controllo del microclima interno.

Il nuovo modulo *Greenhouse*, di fatto, va ad implementare nuove funzionalità specifiche all'interno del software EnergyPlus nell'ambito dei sistemi verdi, aggiungendo la possibilità di simulare le interazioni tra gli elementi di verde e la zona termica in ambiente confinato quali ad esempio una serra bioclimatica. Esso è stato sviluppato progettando ed integrando uno script specifico di Python nel modulo EMS di EnergyPlus.

Il modulo *Greenhouse* consente di calcolare, a partire dai dati climatici esterni, calcolando dinamicamente i dati di Temperatura Operativa della serra e Irradianza su superficie orizzontale, la potenza sottratta all'ambiente per evapotraspirazione integrando nel calcolo dinamico i dati vegetali relativi alla superficie occupata dalle piante, al valore di LAI e alle caratteristiche specifiche della specie vegetale presente descritta dal parametro T_{base} .

In particolare, il suddetto modulo è in grado di calcolare anche la variazione esponenziale di LAI in funzione dei GDD specifici per località e specie vegetali sulla base dei timesteps impostati per il calcolo dinamico di EnergyPlus e aggiungere quindi la dimensione temporale al calcolo della evapotraspirazione risultante dall'applicazione della formula di Baillie.

L'ottimizzazione del modello raggiunta, verificata anche nel confronto con i risultati dei monitoraggi sperimentali nell'anno 2020, ha consentito quindi di indagare l'incidenza che le variabili proprie del sistema verde (tipologia di pianta, stato di crescita, LAI) possono avere sull'andamento di Temperatura T° e Umidità

Relativa UR nell'ambiente confinato, offrendo uno spunto per la ricerca futura nell'individuazione di quelle specie vegetali che, con maggiore efficacia e tempestività, possano ricondurre il microclima interno di un ambiente entro parametri stabiliti.

Appare inoltre molto stimolante, in una prospettiva di implementazione futura, la possibilità di sfruttare la flessibilità ed espandibilità del modulo *Greenhouse* per l'aggiunta di nuove funzioni che consentano di parametrizzare altri elementi dell'equazione e rendere quindi il modulo estremamente performante rispetto alle esigenze di progettazione di una serra bioclimatica.

Tra le implementazioni possibili, si elencano ad esempio: lo sviluppo di moduli specifici e differenziati per piante da frutto e piante da foglia e la combinazione di più moduli per la simulazione di serre con la presenza di diverse specie vegetali.

Il modulo *Greenhouse*, consentirà inoltre di verificare, in regime dinamico, l'efficacia della presenza di una serra bioclimatica con essenze vegetali per la mitigazione del microclima e la riduzione del fabbisogno per la climatizzazione estiva. Se da un lato, l'efficacia delle serre bioclimatiche (intese come vano tecnico) nella riduzione del fabbisogno di riscaldamento dell'edificio è già ampiamente descritta e documentata, la possibilità di "progettare" la presenza di elementi vegetali all'interno di una serra bioclimatica per ridurre ulteriormente il carico termico estivo costituisce un ambito di ricerca ancora poco esplorato.

Il suddetto modulo crea quindi un collegamento diretto tra la progettazione architettonica ed energetica dell'edificio e la progettazione degli elementi verdi, istituendo una relazione diretta tra il microclima esterno, la prestazione dell'involucro e la presenza di elementi vegetali nello spazio confinato.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] F. Fantozzi, C. Gargari, C. Bibbiani, «Analisi del Comportamento energetico di una serra bioclimatica con sistema vegetale interno per migliorare l'efficienza energetica dell'edificio,» ENEA, Roma, RdS/PTR2019/2.1.
- [2] M. Baille, A. Baille and J. Laury, "A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs climate factors and leaf area," *Scientia Horticulturae*, vol. 59, p. 217–232, 1994.
- [3] M. Baille, A. Baille and J. Laury, "Canopy surface resistances to water vapour transfer for nine greenhouse pot plant crops," *Scientia Horticulturae*, vol. 57, p. 143–155, 1994.
- [4] C. Jiunyuanyuan, C. Chiachung, C. Ling-Hsi, «Effect of Environmental Measurement Uncertainty on Prediction of Evapotranspiration,» *Atmosphere*, vol. 9, n. 400, p. DOI:10.3390/atmos9100400, 2018.
- [5] F.H.Andrade, S.A.Uhart, G.G.Arguissain, R.A Ruiz, «Radiation use efficiency of maize grown in a cool area,» *Field Crops Research*, n. 28, pp. 345-354, 1992.
- [6] R. Muchow, T.R.Sinclair, «Radiation use efficiency,» *Advances in Agronomy*, vol. 65, pp. 1215-265, 1999.
- [7] L. Incrocci, R. Maggini, C. Bibbiani, G. Carmassi, F. Malorgio, A. Pardossi, D. Massa, «Simulation of crop water and mineral relations in greenhouse soilless culture,» *Environmental Modelling & Software*, vol. 26, pp. 711-722, 2011.
- [8] F. Fantozzi, C. Gargari, C. Bibbiani, «Studio di un prototipo di serra bioclimatica per l'efficienza e la sostenibilità energetica,» ENEA, Roma, RdS/PAR2017/095.
- [9] O. Bortolotto, G. Lopez da Luz, «Growth and yield of lettuce plants under salinity,» *Horticultura Brasileira*, n. 23, pp. DOI: 10.1590/S0102-05362005000400014, December 2005.

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

Prof. Ing. Fabio Fantozzi Curriculum Vitae

Fabio Fantozzi, nato a Pontedera (Pi) nel 1954, laureato in Ingegneria Meccanica con tesi sperimentale dal titolo "Progetto di un corpo nero sul principio del tubo di calore per applicazioni termometriche" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, Dottore di Ricerca in Fisica Tecnica (1° ciclo- Curriculum: Termofluidodinamica, è attualmente Professore Associato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC).

Oltre ad un'intensa attività didattica, ha partecipato, in qualità di relatore, a circa 100 tesi di laurea nell'ambito dei Corsi di Laurea in Ing. Meccanica, Chimica, Civile ed Edile. Questa attività, in qualche caso, lo ha portato non solo a fare da correlatore di studenti di altre Facoltà (Architettura di Firenze e C.L. in Conservazione e Beni Culturali dell'Università di Parma) ma anche ad intraprendere importanti collaborazioni di ricerca con Enti e Università straniere.

L'attività scientifica si è svolta inizialmente su diverse applicazioni di tubi di calore, su cui aveva lavorato anche durante la tesi (Titolo: "Progetto di un corpo nero sul principio del tubo di calore per applicazioni termometriche").

In particolare, i tubi di calore erano costituiti da termosifoni bifase con applicazioni previste nei campi:

- a) della geotermia
- b) del raffreddamento dell'elettronica, soprattutto di potenza.

Tale attività è stata a lungo svolta in collaborazione con il Moscow Power Engineering Institute di Mosca.

Successivamente, ha cominciato ad interessarsi all'influenza che i parametri termoigrometrici e l'inquinamento esterno hanno sugli ambienti in cui si voglia garantire una corretta conservazione dei manufatti di interesse storico ed artistico, facendo anche parte di gruppi di lavoro, nell'ambito del CTI (Comitato Termotecnico Italiano) per la stesura di progetti di norme sull'argomento

Attualmente, con riferimento alle Direttive Europee sul rendimento energetico in edilizia, svolge la sua attività, principalmente su tematiche di diagnosi energetica, risparmio energetico e riqualificazione di edifici esistenti, tema sul quale è stato chiamato a fare da relatore in diverse occasioni.

Ha lavorato sul tema della "Certificazione Energetica degli edifici", anche nell'ambito del Comitato Termotecnico Italiano (CTI) in cui ha fatto parte di due specifici Gruppi di Lavoro del SottoComitato 1 riguardanti: a) Norme tecniche a supporto della legislazione energetica degli edifici, b) Caratteristiche termiche dei materiali.

L'attività si è poi definitivamente spostata su temi più tipici della Fisica Tecnica Ambientale, in particolare sullo studio di pareti multistrato e ventilate in edilizia, tema con cui ha fatto parte anche di diversi PRIN di ricerca a livello nazionale.

Ha lavorato su tematiche acustiche, con particolare riferimento a barriere acustiche autostradali.

Ha condotto, in qualità di Responsabile, diversi contratti di ricerca con aziende, su tematiche energetiche e ha partecipato come relatore a diversi Convegni e Corsi, sempre in materia energetica, sia in Italia che all'estero.

L'attività di ricerca svolta è documentata dalla produzione da circa 170 lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali e italiane e su atti di convegni.

Prof. Carlo Bibbiani Curriculum Vitae

Carlo Bibbiani, nato a Pisa nel 1962, consegue la Laurea in Ingegneria Civile, Sezione Idraulica, presso la Università degli Studi di Pisa. Successivamente consegue il titolo di Dottore di Ricerca in "Genio rurale" (IX° Ciclo, 1996) presso l'Università di Pisa. Dal 2001 è Ricercatore universitario presso il Dipartimento di Scienze Veterinarie (DSV) dell'Università di Pisa. Ha svolto ricerche nei seguenti settori: Energia rinnovabile applicata ai sistemi serra; Compilazione di software volto alla simulazione climatica nelle serre; Studio delle proprietà fisiche ed idrauliche dei substrati per le colture fuori suolo; Simulazione della relazione suolo-acqua nelle colture fuori suolo.

Ha partecipato come relatore a diversi Convegni, in materia energia rinnovabili applicate alla agricoltura, sia in Italia che all'estero.

L'attività di ricerca svolta è documentata dalla produzione circa 100 lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali e italiane e su atti di convegni.

Arch. Caterina Gargari Curriculum Vitae

Caterina Gargari, Laureata in Architettura presso la facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze, dottore di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura, svolge attività di ricerca presso il Dipartimento DESTEC dell'Università di Pisa sulle tematiche della progettazione sostenibile con particolare riguardo alla qualificazione energetica e alla valutazione di impatto ambientale di materiali e edifici. Ha iniziato la sua attività di ricerca partecipando a numerosi progetti europei sulla progettazione ambientale, il risparmio e l'efficienza energetica, l'utilizzo di energie rinnovabili, con particolare riferimento alla progettazione in clima mediterraneo. Dal 2004 si occupa nello specifico di Valutazione delle prestazioni ambientali dei materiali da costruzione secondo la metodologia LCA e dal 2006 è membro stabile, nominato da UNI, del tavolo di lavoro CEN TC 350 "Sustainability of Construction Works".