



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi di tecniche di raffrescamento sostenibili applicabili in edifici civili e in edifici serra

Giuliano Vox, Fabiana Convertino, Ileana Blanco, Evelia Schettini

ANALISI DI TECNICHE DI RAFFRESCAMENTO SOSTENIBILI APPLICABILI IN EDIFICI CIVILI E IN EDIFICI SERRA

Giuliano Vox, Fabiana Convertino, Ileana Blanco, Evelia Schettini

Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" - Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto D.1: Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: C. Tecnologie "green" per gli edifici

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi di tecniche di raffrescamento sostenibili applicabili in edifici civili e in edifici serra"

Responsabile scientifico ENEA: Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Università di Bari: Giuliano Vox



SOMMARIO	4
1. INTRODUZIONE	5
2. APPLICAZIONE DI PARETI VERDI AGLI EDIFICI: STUDIO DEL FLUSSO ENERGETICO TRA LA PARTE VERDE E LA SUPERFICIE DELL'EDIFICIO, CON PARTICOLARE ATTENZIONE AI PARAMETRI RELATIVI ALL'EVAPOTRASPIRAZIONE	9
2.1 I SISTEMI DI VERDE VERTICALE E LA MODELLAZIONE	9
2.1.1 <i>Una review degli approcci analitici</i>	10
2.1.2 <i>Modello analitico</i>	23
2.1.3 <i>Modello statistico</i>	29
3. TECNICHE SOSTENIBILI DI RAFFRESCAMENTO IN SERRA IN PRESENZA DI SOLAR COOLING	35
3.1 GLI ASPETTI ENERGETICI	35
3.2 IL CONSUMO DI ACQUA	43
4 PUBBLICAZIONI	44
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	45
6 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	48

Sommario

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 dell'accordo di collaborazione con l'ENEA riguardano l'analisi di tecniche di raffrescamento sostenibili applicabili in edifici civili e in edifici serra.

Nell'ambito delle attività "Applicazione di pareti verdi agli edifici: studio del flusso energetico tra la parte verde e la superficie dell'edificio, con particolare attenzione ai parametri relativi all'evapotraspirazione", il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha indagato il comportamento energetico dei sistemi di pareti verdi. L'applicazione delle pareti verdi richiede, infatti, la conoscenza del funzionamento energetico del sistema verde. Ciò implica la necessità di seguire una duplice linea di ricerca, quella sperimentale-osservativa e quella analitica. Quest'ultima, in particolare, comporta la definizione di un approccio utile ad affrontare il problema della modellazione energetica dei sistemi di verde verticale. Il gruppo di ricerca ha, quindi, passato in rassegna gli approcci presenti in letteratura ed ha proposto un proprio modello. Il sistema di parete verde è stato, infatti, schematizzato attraverso differenti layer e, per ognuno di essi, sono stati definiti i principali meccanismi di trasferimento di calore (convezione, conduzione, irraggiamento, evapotraspirazione). Questi ultimi sono stati, quindi, descritti per mezzo di formule matematiche e, per ogni strato, è stata definita una equazione di bilancio energetico. L'equazione di bilancio relativa allo strato di vegetazione è stata validata utilizzando i dati sperimentali raccolti presso il centro sperimentale dell'Università di Bari. Sono stati messi in evidenza i principali contributi di calore sensibile al bilancio energetico ed è emerso che la radiazione solare ad onde corte rappresenta quello più influente. Inoltre, sono state confrontate le quantità di input (energia in ingresso, calore sensibile) e quelle di output (energia in uscita, calore latente dovuto all'evapotraspirazione) ed è stata notata la simmetria delle due curve, suggerendo una buona congruenza tra i dati sperimentali e quelli simulati.

Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha inoltre modellato la differenza di temperatura superficiale esterna tra la parete di controllo e le pareti verdi durante luglio 2015 utilizzando il metodo di regressione lineare multipla. È stato sviluppato un modello statistico per ciascuna delle due facciate verdi. I modelli sono stati validati utilizzando i dati di luglio 2016. I modelli mostrano una buona capacità predittiva e possono essere utili nella previsione dell'efficacia della soluzione tecnica specifica in altri contesti climatici mediterranei.

Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha continuato le attività di sperimentazione relative all'applicazione di una tecnologia per il raffrescamento di una serra basata sul sistema di solar cooling. L'applicazione del sistema di raffrescamento localizzato ha consentito di ridurre la temperatura dell'aria nella zona di coltivazione in maniera efficace nei periodi di più elevata radiazione solare, al di sopra di 800 Wm^{-2} , quando la richiesta di energia di raffrescamento è più elevata e quando il sistema di solar cooling è attivo.

1. Introduzione

Nel passato la popolazione mondiale è stata prevalentemente rurale. Nel 1800 solo il 2% della popolazione mondiale viveva nelle città mentre nel 1900 il 14%. Fino a trentacinque anni fa la popolazione rurale era intorno al 60%. In seguito, l'equilibrio urbano-rurale è mutato notevolmente. Attualmente il 54% della popolazione, ovvero poco più della metà della popolazione globale, è urbana. L'urbanizzazione è diventata una tendenza globale importante, con livelli sempre crescenti di urbanizzazione che raggiungono il 70% e più in vari paesi sudamericani, africani e asiatici. Le proiezioni indicano che, entro il 2020, il 55% della popolazione mondiale vivrà nei centri urbani e questa percentuale salirà al 60% e al 70% rispettivamente nel 2030 e nel 2050 (Figura 1). Si stima che nel 2050 più di due terzi della popolazione potrebbe vivere in zone urbane (UN, 2015). Tale urbanizzazione crescente potrebbe portare, nel 2050, circa 2,4 miliardi di persone in più nelle città (FAO, 2017).

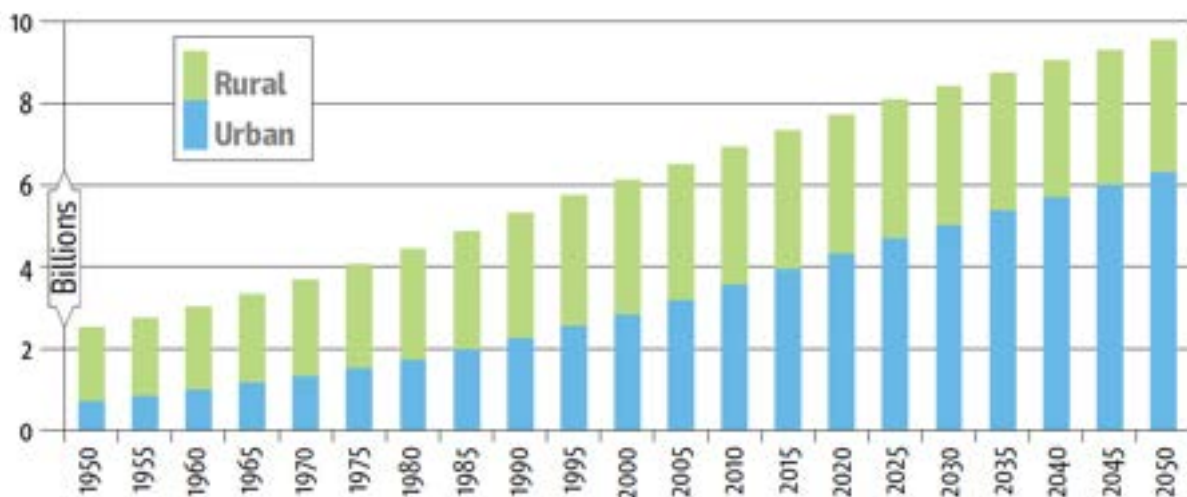


Figura 1: Crescita della popolazione mondiale urbana e rurale al 2050 (Fonte: UN, 2015, rielaborazione di FAO, 2017)

Il numero di agglomerati urbani con oltre 5 milioni di abitanti è in crescita in tutto il mondo e le megalopoli, agglomerati in cui la popolazione supera i 10 milioni di abitanti, sono attualmente oltre 30 (Saaroni *et al.*, 2018). Nel 2030, si prevede che ci saranno almeno 43 megalopoli, la maggior parte delle quali in regioni in via di sviluppo (Figure 2a-2b).

L'aumento dell'urbanizzazione è accompagnato dalla necessità di sistemi di supporto, di reti di infrastrutture, reti di trasporto e logistica, una maggiore domanda di cibo e di trasporto degli alimenti, lunghe catene di approvvigionamento, trasporto e commercio del cibo.

Il processo di urbanizzazione ha una vasta gamma di conseguenze indesiderate, che vanno dalla riduzione delle terre fertili alla deforestazione, all'inquinamento atmosferico e idrico, al drenaggio ridotto delle precipitazioni e alla creazione di aree periurbane dove problematiche socio-economiche sono concentrate con un aumento della povertà nelle fasce più deboli della popolazione. Il consumo di risorse e di energia da parte delle metropoli è in costante aumento per poter mantenere lo stile di vita dei residenti di queste aree urbane, e rappresenta una seria minaccia per l'ambiente.

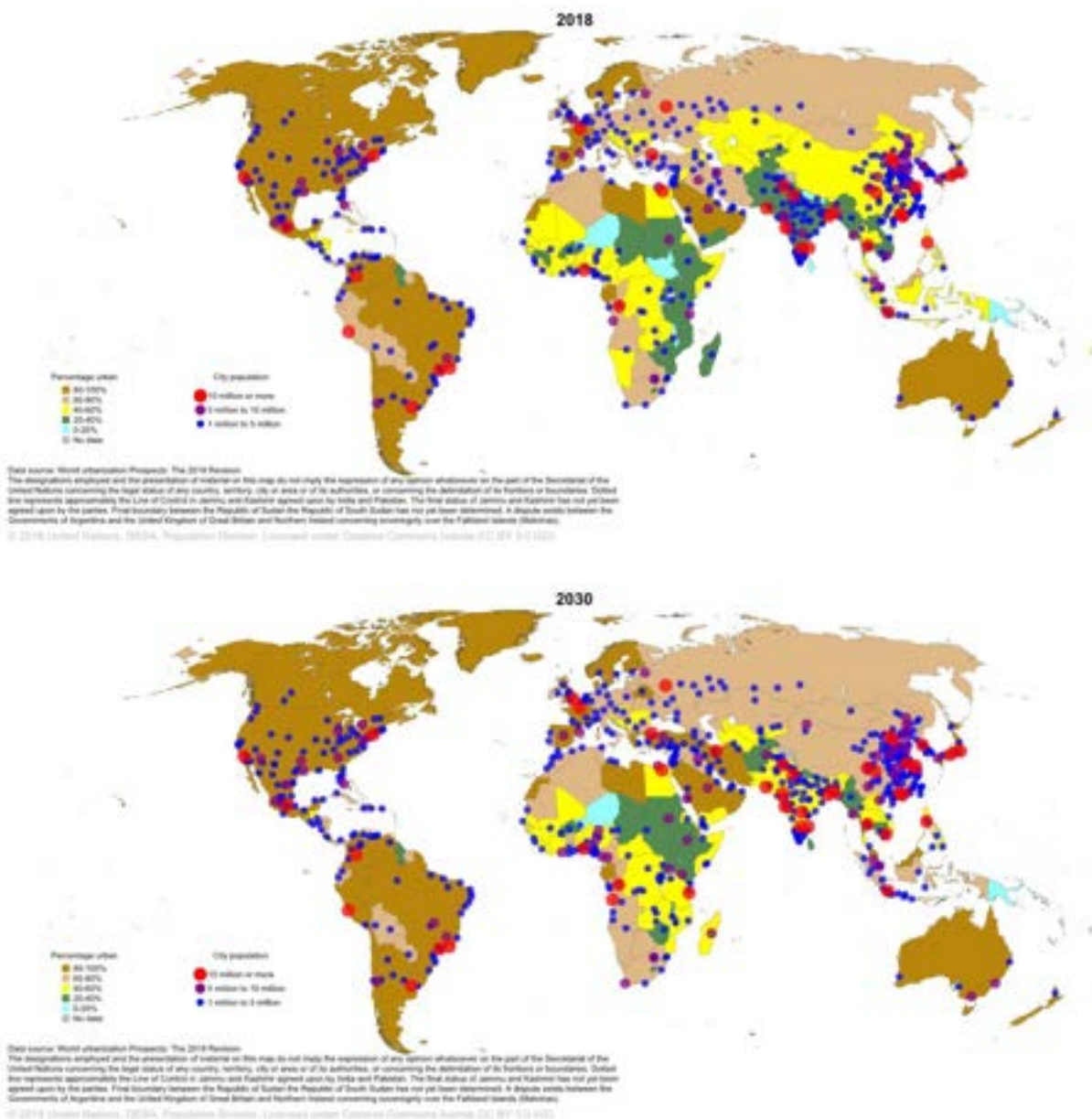


Figure 2a – 2b: Percentuali di agglomerati urbani e città per classi di dimensioni della popolazione, nel 2018 (2a) e nel 2030 (2b) (UN, 2015).

In tale contesto di crescente urbanizzazione, specialmente nei paesi a reddito basso e medio-basso in cui è prevista un’urbanizzazione più rapida da qui al 2050, lo sviluppo sostenibile dipende sempre più da una gestione efficace della crescita urbana (UN, 2015).

Tra le caratteristiche delle aree densamente popolate, riveste particolare importanza l’effetto Isola di Calore Urbana (Urban Heat Island - UHI). L’isola di calore urbana è un fenomeno climatico che consiste in temperature più elevate, fino a 12 °C, all’interno dell’area urbana rispetto alle circostanti aree rurali (Saaroni *et al.*, 2018). L’UHI ha influenze negative sul comfort esterno e sulla concentrazione di inquinanti. Inoltre, causa un maggiore utilizzo dei sistemi di climatizzazione e quindi un maggiore consumo di energia per il raffrescamento (Karlessi *et al.*, 2011; Jaffal *et al.*, 2012; Kalkstein and Davis, 1989; Petralli *et al.*, 2006). L’entità di questa differenza di temperatura dipende non solo dalle dimensioni della popolazione della città, ma anche dalla densità di area edificata, dai materiali che costituiscono i suoi edifici e le sue superfici e dalla distribuzione ed intensità delle attività antropogeniche. Si prevede che l’effetto combinato del fenomeno UHI e dei fenomeni di riscaldamento globale e l’aumento di intensità, frequenza e durata delle ondate di calore

amplificheranno lo stress termico e il disagio nell'ambiente urbano (Saaroni *et al.*, 2018).

L'adattamento all'effetto UHI è una risposta immediata al disagio termico, incrementando ad esempio l'utilizzo dell'aria condizionata. Tuttavia, l'adattamento al fenomeno UHI dovrebbe essere associato a una pianificazione a lungo termine per uno sviluppo sostenibile (Saaroni *et al.*, 2018). Le azioni di mitigazione dell'effetto UHI sono invece state definite come trasformazioni del microclima urbano attraverso modifiche dell'ambiente fisico, da realizzare mediante l'uso della vegetazione come strumento principale (Solecki *et al.*, 2005; Gago *et al.*, 2013).

Le infrastrutture verdi urbane (Urban Green Infrastructures, UGI) sono elementi di vegetazione localizzati all'interno dell'area urbana che possono mitigare gli impatti dell'urbanizzazione (Mekala e Hatton MacDonald, 2018). Le UGI sono state recentemente identificate come insiemi di elementi artificiali che possono fornire una serie di benefici ambientali a edifici e aree a scala urbana (Pérez *et al.*, 2014). Col termine UGI si fa riferimento a spazi verdi pubblici e privati, pianificati e non pianificati, come vegetazione nativa residua, parchi, giardini privati, alberi da strada, campi sportivi, campi da golf, e opzioni più ingegnerizzate, quali pareti e tetti verdi, ovvero sistemi di verde in un edificio (Norton *et al.*, 2015; Raji *et al.*, 2015; Cameron *et al.*, 2014). La scelta di quale tipo di UGI applicare è influenzata dal clima della regione, dalle caratteristiche delle specie vegetali e del suolo, dalla disponibilità di acqua, ma anche dalle norme comunitarie e dai valori culturali (Norton *et al.*, 2015).

L'aumento delle UGI in una città può essere una strategia sostenibile per contribuire a migliorare il clima urbano, ridurre la temperatura dell'aria urbana, la massima temperatura superficiale e le estreme escursioni termiche della temperatura superficiale, in particolare nelle regioni caratterizzate dal clima mediterraneo (Norton *et al.*, 2015; Pérez *et al.*, 2014; Tan *et al.*, 2014; Vox *et al.*, 2015; Vox *et al.*, 2017). Le UGI giocano un ruolo importante nel contribuire a una serie di servizi ecosistemici come il miglioramento estetico dell'ambiente per vivere e lavorare, la rimozione di inquinanti atmosferici, il miglioramento della qualità dell'aria, immagazzinando e sequestrando carbonio e liberando polline e spore di funghi, il miglioramento dell'habitat per invertebrati, uccelli, erbe e piante, la promozione della biodiversità, il miglioramento delle capacità di isolamento acustico e assorbimento del rumore dell'ambiente urbano, il miglioramento della gestione dell'acqua piovana e della qualità del deflusso dell'acqua (Cameron *et al.*, 2014; Kohler e Poll, 2010; Rowe, 2011; Fernandez-Cañero *et al.*, 2013). In aggiunta ai benefici culturali e di regolazione delle qualità ambientali, le UGI possono anche essere progettate per costituire reti pianificate di componenti e strutture alimentari commestibili all'interno dell'ecosistema urbano, gestite e progettate per fornire principalmente approvvigionamento alimentare. Al fine di produrre cibo in maniera sostenibile, proteggere l'ambiente e le comunità urbane, possono far parte delle UGI gli orti sociali, gli orti comunitari, gli orti realizzati sui tetti degli edifici, i paesaggi edibili e le foreste in zone periurbane non gestite e residuali (Russo *et al.*, 2017).

L'adozione di strategie di inverdimento urbano risulta interessante anche per la possibilità di migliorare l'efficienza energetica degli edifici: riducendo il ricorso all'impiego di sistemi di raffrescamento degli edifici e pertanto riducendone il consumo energetico in estate; aumentando l'isolamento termico in inverno; migliorando il microclima interno e la temperatura dell'aria interna degli edifici (Vox *et al.*, 2018, Gago *et al.*, 2013; Jim e Tsang, 2011; Köhler e Poll, 2010; Cheng *et al.*, 2010; Perini *et al.*, 2011; Pérez *et al.*, 2011).

Tra le forme di inverdimento urbano, particolarmente utili ai fini sopra elencati, risultano essere i sistemi di inverdimento verticale (VGS).

I VGS comprendono svariate tipologie di chiusure verticali verdi. I VGS possono essere classificati in base al metodo di crescita e alla struttura di supporto utilizzata. Altre classificazioni più elaborate si basano sui componenti chiave e sulle caratteristiche delle varianti dei sistemi di verde verticale. Esistono numerose tipologie, che vanno dalla forma più semplice al layout più sofisticato e high-tech. Sulla base delle strutture di supporto utilizzate e delle diverse piante selezionate, questi sistemi possono essere suddivisi in due gruppi principali: facciate verdi (*green façades*) e muri verdi (*green wall*).

Le facciate verdi o schermi verdi sono sistemi più tradizionali in cui la copertura vegetale

verticale è formata da piante rampicanti o appese. Queste possono essere radicate alla base direttamente nel terreno o coltivate in vasi, che, a loro volta, possono essere attaccati alle pareti o integrati su balconi a diverse altezze dell'edificio. Nelle facciate verdi, le piante possono essere attaccate direttamente al muro o possono essere previste strutture leggere per permettere loro di arrampicarsi ed espandersi sulla superficie della parete. Al giorno d'oggi, i sistemi di facciata verde comprendono, di solito, anche una struttura di supporto che si trova separata dalla facciata, consentendo così la formazione di una intercapedine di aria che permette di incrementare i benefici energetici derivanti dall'applicazione del sistema verde. Inoltre, questo tipo di soluzione riduce il danneggiamento delle pareti, che spesso si manifesta quando la vegetazione rampicante è, invece, attaccata direttamente alle pareti.

I muri verdi o giardini verticali sono una tipologia di VGS più recente. Generalmente più complessa rispetto alle facciate verdi, originariamente questa tipologia è stata inventata dal botanico francese Patrick Blanc, che si ispirò alla crescita epifita di diverse piante. Questi VGS prevedono una struttura di supporto adatta a ciascun sistema di coltivazione. Tali strutture possono essere realizzate con materiali diversi e possono supportare un'ampia varietà di specie vegetali. I sistemi di muri verdi possono essere installati in diverso modo. In base alle loro caratteristiche, si possono distinguere due tipologie: quelli in tessuto o feltro e quelli a pannelli o scatole. I sistemi di stoffa o di feltro sono uno dei tipi più diffusi e possono essere costituiti da colture idroponiche o avere un substrato. A loro volta, i sistemi tessili che contengono substrati organici possono utilizzare il muschio di sfagno o il terriccio. D'altra parte, ci possono essere sistemi puramente idroponici. Quest'ultimo sistema è uno di quelli più diffusi al giorno d'oggi. In questo sistema, le radici ricevono una soluzione nutriente bilanciata con tutti gli elementi chimici essenziali per il corretto sviluppo delle piante. Hanno una larghezza ridotta e sono costituiti da una combinazione di strati, solitamente appoggiati a uno strato impermeabile posteriore fatto di materiali che variano a seconda del sistema commerciale. Le specie vegetali vengono piantate tagliando il feltro sul posto o utilizzando moduli con tasche già preparati. Il sistema di irrigazione può essere distribuito per settore e ha rami orizzontali, in modo da consentire la copertura dell'intera superficie. Oltre a questa tipologia di muri verdi, esistono diversi tipi di sistemi che impiegano pannelli modulari. La loro classificazione può variare a seconda del tipo di terreno di coltura utilizzato (idroponica o substrati) e del materiale di cui è costituita la loro struttura: acciaio zincato, polietilene o pannelli di plastica riciclata. Il terreno di coltura all'interno del pannello o del modulo può essere substrato organico o composti inorganici. Le fibre organiche (torba di cocco) o il muschio di sfagno sono le soluzioni più comuni.

Un altro aspetto da considerare nei VGS, come sistemi di risparmio energetico passivo, è la specie vegetale utilizzata, poiché ogni sistema costruttivo utilizza diversi tipi di piante. In particolare, vengono utilizzate piante rampicanti per facciate verdi, mentre nelle pareti viventi gli arbusti e piante erbacee sono più comuni. Le piante utilizzate per le facciate verdi possono essere specie decidue o sempreverdi, ma nelle pareti viventi le piante sono, generalmente, sempreverdi. Questo fatto ha una forte influenza sulle prestazioni termiche di ogni sistema, perché quando si usano piante perenni sia i periodi di raffrescamento sia quelli di riscaldamento sono influenzati dallo strato di copertura di vegetazione, mentre quando si usano piante decidue solo il periodo di raffrescamento è interessato, dal momento che la radiazione solare riesce, invece, a penetrare durante il periodo di riscaldamento. Per scopi di ricerca, il numero di specie utilizzate negli ultimi anni per le facciate verdi è molto limitato. In generale, mancano studi relativi alla possibilità di utilizzare un numero maggiore di specie in climi diversi al fine di creare cataloghi in funzione del clima, per facilitare la selezione per ogni singolo progetto. A tal proposito, il rischio di eccessive assunzioni relative al comportamento delle specie è preoccupante, specialmente negli studi di simulazione.

Attualmente, si sta osservando una sempre maggiore diffusione dei sistemi di inverdimento verticale appena descritti. Proprio per questo e per poter ottenere più benefici possibili dalla loro installazione, è necessario che la loro progettazione tenga conto di tutti i principali aspetti fisico-tecnici del sistema, biologici della vegetazione e climatico-ambientali del contesto di installazione.

2. Applicazione di pareti verdi agli edifici: studio del flusso energetico tra la parte verde e la superficie dell'edificio, con particolare attenzione ai parametri relativi all'evapotraspirazione

Nell'ambito dell'attività "Applicazione di pareti verdi agli edifici: studio del flusso energetico tra la parete verde e la superficie dell'edificio, con particolare attenzione ai parametri relativi all'evapotraspirazione", il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha indagato i meccanismi di scambio energetico che si instaurano in presenza di pareti verdi.

Il principale obiettivo della ricerca è stato la definizione corretta dei singoli termini che interessano gli scambi energetici della parete verde in quanto la letteratura scientifica è al riguardo molto limitata e presenta una grande variabilità nella definizione di formule e parametri.

2.1 I sistemi di verde verticale e la modellazione

I sistemi di verde verticale, come le altre infrastrutture verdi, offrono benefici in termini di comfort termico all'interno e all'esterno degli edifici e di risparmio energetico nelle città. A tal proposito, i loro maggiori contributi riguardano il raffrescamento delle pareti dell'edificio, ottenuto intercettando, assorbendo e riflettendo la radiazione solare (funzione di ombreggiamento e aumento di albedo), il raffrescamento evapotraspirativo, la creazione di una intercapedine d'aria termicamente isolata e la riduzione della velocità del vento sulle pareti (Hunter *et al.*, 2014).

Al fine di quantificare correttamente i benefici associati a questi sistemi verdi, è necessario descrivere il loro comportamento energetico nel modo più realistico possibile. Tuttavia, bisogna sottolineare che, a differenza delle altre tecnologie dell'involucro, questa, associata all'uso della vegetazione, è caratterizzata da una maggiore complessità proprio perché si tratta di un sistema "vivente". Una certa analogia può essere trovata con i sistemi di tetto verde e, in effetti, la maggior parte delle ricerche sui sistemi di verde verticale è ispirata, appunto, a quelle sui tetti verdi. Tuttavia, le soluzioni di involucro caratterizzate dall'applicazione verticale del verde sono diverse dai sistemi di copertura orizzontale verde, i.e. tetto verde. Nel caso dei tetti verdi, inoltre, un modello matematico è già stato sviluppato e implementato nel software di simulazione Energy Plus (<https://energyplus.net/>). La differenza tra le due tecnologie è legata, principalmente, all'assenza dello strato di terreno (nelle facciate verdi) e alla differenza nei processi di scambio termico (Susorova *et al.*, 2013). Pertanto, alla luce di ciò, emerge il problema della modellazione dei sistemi di verde verticale. In particolare, Hunter *et al.* (2014) hanno individuato, per quanto riguarda lo studio analitico delle facciate verdi, tre punti deboli:

- la scarsa attenzione della ricerca prestata all'influenza sulle performance termiche degli aspetti di progettazione degli elementi che compongono il sistema di verde verticale (geometria e posizione delle strutture di supporto, contenitori, substrati e sistema di irrigazione);
- l'analisi insoddisfacente, negli studi compiuti finora, dell'interazione tra le caratteristiche morfologico-fisiologiche della pianta e il bilancio energetico dell'involucro;
- la difficoltà di identificare e misurare i parametri microclimatici utili a comprendere il comportamento termico delle facciate verdi.

Analizzando la letteratura pubblicata fino ad ora, è possibile scoprire che, rispetto all'approccio analitico, incentrato sulla modellazione, la linea di ricerca prevalente è quella sperimentale-osservativa. Quest'ultima si propone di leggere alcuni parametri che descrivono il comportamento di diversi tipi di

soluzioni di verde verticale, in diverse condizioni climatiche e geografiche, nelle varie stagioni e considerando i diversi possibili orientamenti. In generale, però, gli studi sperimentali non sono replicabili, proprio perché vi è una notevole quantità di aspetti specifici che li caratterizzano. Pertanto, per quanto riguarda gli studi sperimentali, appare difficile e poco significativo fare confronti tra i diversi casi studiati. La definizione di un modello è, dunque, necessaria per descrivere in modo inequivocabile i benefici associati alle soluzioni di verde verticale applicate all'involucro degli edifici.

Dallo studio della letteratura disponibile, si evince, inoltre, che, quando si segue la via analitica, gli approcci proposti per affrontare il problema della modellazione dei sistemi di vegetazione verticale sono diversi. La presente ricerca mira, tra l'altro, a definire un modello che possa descrivere realisticamente il comportamento energetico degli inverdimenti verticali.

2.1.1 Una review degli approcci analitici

Tra gli approcci di modellazione utilizzati per descrivere il comportamento delle soluzioni di verde verticale associate agli involucri degli edifici, è possibile incontrarne alcuni ricorrenti:

- il sistema di verde verticale è trattato alla stregua delle comuni installazioni sugli involucri edilizi, come sistemi di schermatura, facciate ventilate o finestre con doppi vetri;
- l'analogia elettrica viene utilizzata per descrivere il funzionamento energetico dei sistemi di verde verticale e viene definita una specifica "plant resistance" (resistenza della pianta);
- il modello FASST (Fast All-season Soil Strength), ideato da US Army Corps of Engineers, già utilizzato nel caso dei tetti verdi e implementato nel software di simulazione Energy Plus (<https://energyplus.net/>), è adattato al caso del verde verticale;
- sono proposte diverse formulazioni del bilancio energetico, in cui ogni singolo termine è definito scegliendo una delle formule (qualcuna abbastanza controversa), disponibili in letteratura. In particolare, uno dei più discussi parametri da determinare (ma non l'unico!), è il trasferimento di calore correlato all'evapotraspirazione.

Tuttavia, come si può chiaramente evincere da quanto riportato in seguito, non vi è sempre una differenza netta tra gli approcci seguiti e, spesso, accade che gli autori considerino, contemporaneamente, più di una singola strada.

Quando gli inverdimenti verticali vengono considerati come "sunscreen" (schermature solari), l'unico effetto preso in considerazione nell'analisi dei sistemi verdi verticali è quello di ombreggiatura (modello "only-shading"), cioè la riduzione della radiazione solare incidente sulle chiusure verticali dell'edificio. Lo svantaggio principale, derivante da questo approccio, è che l'evapotraspirazione, gli scambi radiativi e convettivi sono, generalmente, trascurati.

Un modello termico è stato sviluppato da Ip *et al.* (2010), che hanno identificato i parametri chiave necessari per definire i "Bioshading Coefficients" (coefficienti di bio-ombreggiatura). Il loro studio si è incentrato sulle prestazioni di ombreggiamento di una copertura ("canopy") verticale di piante (Figura 3). La ricerca ha evidenziato che, a differenza di altri dispositivi "non viventi", in questo caso, devono essere prese in considerazione le caratteristiche biologiche e orticole delle specie vegetali e le condizioni ambientali in cui crescono. Pertanto, hanno proposto una funzione del *bioshading coefficient* dipendente dal tempo per descrivere le prestazioni connesse all'ombreggiatura sulla base di un ciclo di crescita annuale.

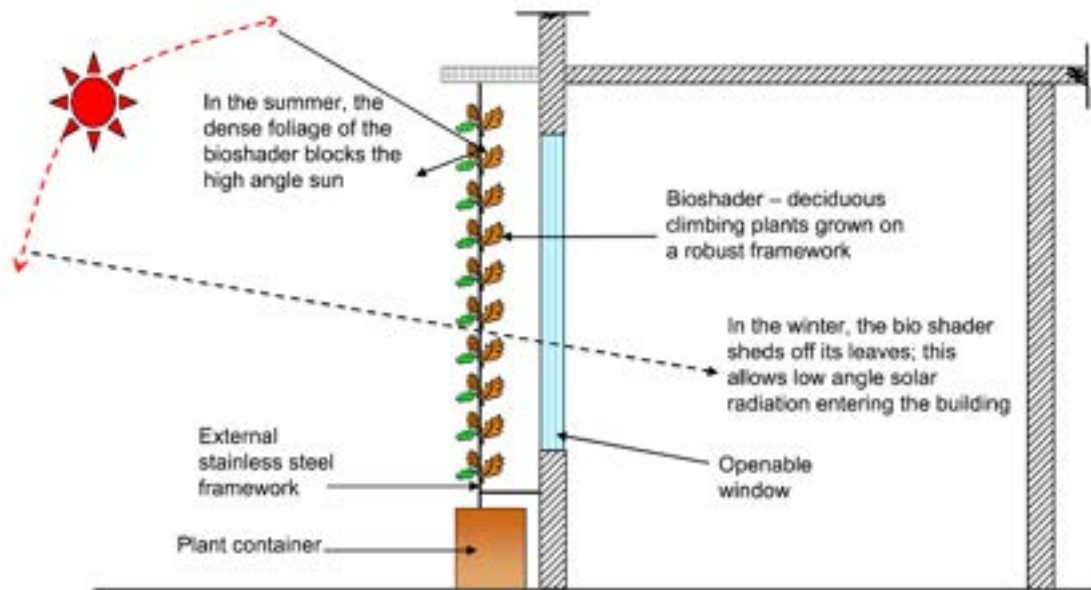


Figura 3: Vista in sezione della bio-schermatura. (Fonte: Ip. *et al.*, 2010)

Il coefficiente di ombreggiamento è generalmente definito come un valore costante, che rappresenta la porzione di radiazione solare incidente su una superficie dietro un sistema di ombreggiamento statico; tale definizione non è applicabile nel caso di un “bio-ombreggiamento”. Infatti, l’efficacia dell’ombreggiatura di quest’ultimo cambia nel corso dell’anno e può essere meglio identificata come un coefficiente di ombreggiamento dinamico. Il “*Bioshading Coefficient*” (BSC) è stato, pertanto, definito come (Ip *et al.*, 2010):

$$BSC = \frac{\text{Solar gain behind bioshader at direct normal solar incidence}}{\text{Solar radiation in front of bioshader at direct normal solar incidence}} \quad (1)$$

Considerando che una copertura (“*canopy*”) vegetale verticale ha un numero “*k*” di strati fogliari diversi, aventi superfici A_k corrispondenti nel piano della copertura, il “*Bioshading Coefficient*” $BSC_{(d)}$ in un particolare giorno “*d*” è espresso come:

$$BSC_{(d)} = \frac{A_0 T_0 + \sum_{k=1}^n A_{k(d)} T_k}{A_f + A_0 + \sum_{k=1}^n A_{k(d)}} \quad (2)$$

dove: A_0 è la superficie degli spazi vuoti nella copertura vegetale; A_f , la superficie dello strato rampicante; A_k , la superficie della copertura verde con “*k*” strati di foglie; T_0 , la trasmittività solare normale degli spazi vuoti; T_k la trasmittività solare per uno strato di vegetazione con “*k*” foglie.

Un simile coefficiente di ombreggiamento è stato proposto anche da Jim e He (2011), che hanno studiato le prestazioni di ombreggiamento dei sistemi di vegetazione verticale attraverso un modello di radiazione solare.

Kontoleon ed Eumorfopoulou (2010) hanno modellato lo strato verde come una superficie esterna caratterizzata da una banda di assorbimento simile a quella di una copertura fogliare completa. Esso agisce come un filtro ottico che regola la proporzione della radiazione solare che penetra, che viene riflessa e assorbita. Hanno, inoltre, assunto che, in generale, circa l’80-90% della radiazione ad onde corte incidente sulla copertura vegetata viene assorbita dalle piante per le loro funzioni biologiche, quali la fotosintesi, la traspirazione e la respirazione.

A differenza della ricerca sopra citata, Hoelscher *et al.* (2016) hanno cercato di distinguere tre diversi effetti legati all’applicazione dello strato di vegetazione, cioè l’ombreggiatura, la traspirazione e

l'isolamento (Figura 4). Tuttavia, hanno affermato che il contributo principale all'effetto di raffrescamento è correlato all'ombreggiatura.

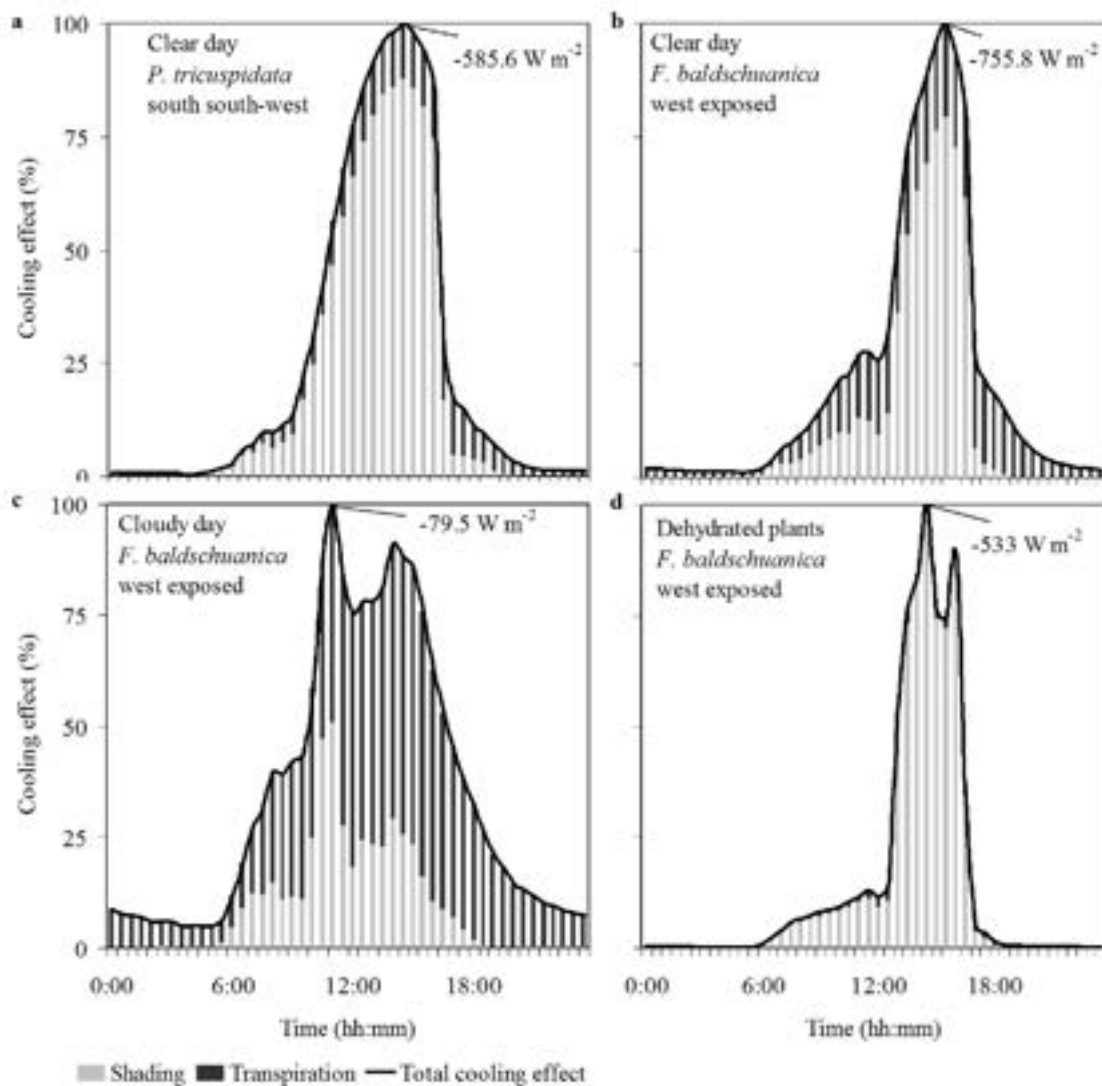


Figura 4: Effetto di raffrescamento totale (traspirazione + ombreggiamento) nonché individuazione delle quote parte di traspirazione e ombreggiamento rispetto all'effetto di raffrescamento, ciascuna in relazione al raffrescamento massimo del giorno, per (a) una facciata esposta sud sud-ovest verde con *Parthenocissus tricuspidata* in una limpida giornata estiva (2 agosto 2013), (b) una facciata esposta ad ovest ricoperta di *Fallopia baldschuanica* in una limpida giornata di fine estate (3 settembre 2014), (c) una giornata nuvolosa (*F. baldschuanica*) (12 settembre 2014) e (d) le piante sottoposte a stress idrico (*F. baldschuanica*) (18 settembre 2014). (Fonte: Hoelscher *et al.*, 2016)

L'effetto di ombreggiamento (S) è stato, dunque, calcolato come differenza tra la radiazione ad onde corte in arrivo davanti alla vegetazione $K \downarrow_f$ e dietro la copertura verde $K \downarrow_b$ (Hoelscher *et al.*, 2016):

$$S = K \downarrow_f - K \downarrow_b \quad (3)$$

La funzione di ombreggiamento della copertura verde è, principalmente, quella considerata anche da Wong *et al.* (2009). Essi hanno studiato le prestazioni termiche dei sistemi di vegetazione

verticale valutando le loro influenze sul valore di trasferimento termico dell'involucro ("*envelope thermal transfer value*", ETTV) degli edifici. Quest'ultimo è stato determinato attraverso il coefficiente di ombreggiamento e la sua relazione con l'indice dell'area fogliare ("*leaf area index*", LAI) delle piante (Figura 5).

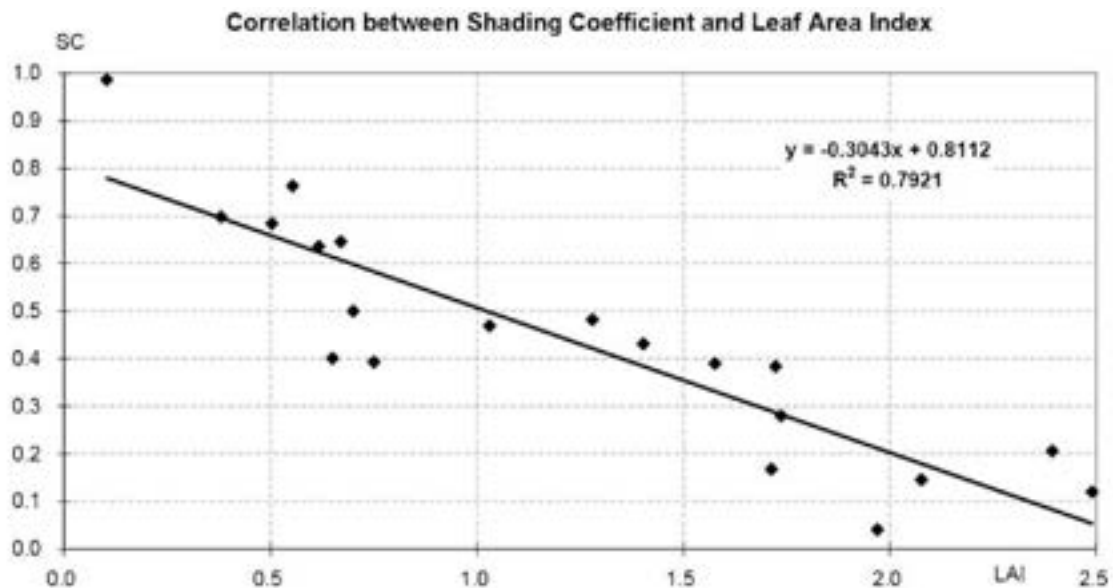


Figura 5: Equazione di correlazione tra coefficiente di ombreggiamento (SC) e indice di area fogliare (LAI). (Fonte: Wong *et al.*, 2009)

È stata, quindi, ricavata una correlazione tra coefficiente di ombreggiamento e LAI. Ciò ha permesso loro di predire il coefficiente di ombreggiamento della pianta, noto il LAI, e viceversa (Wong *et al.*, 2009):

$$\text{Shading coefficient}(y) = -0.3043 \text{ LAI}(x) + 0.8112 \quad (4)$$

Pertanto, è stata proposta una relazione lineare tra i due parametri.

L'effetto di ombreggiatura è stato anche considerato da Stec *et al.* (2005), che hanno studiato il ruolo delle piante come dispositivo di ombreggiamento all'interno di una facciata a doppia pelle, in luogo di altri sistemi di schermatura. Essi hanno sviluppato un "*network model*" (Figura 6), sostituendo il blocco delle schermature con un modello di piante e lo hanno realizzato con l'uso del software Simulink™ (<https://it.mathworks.com/products/simulink.html>).

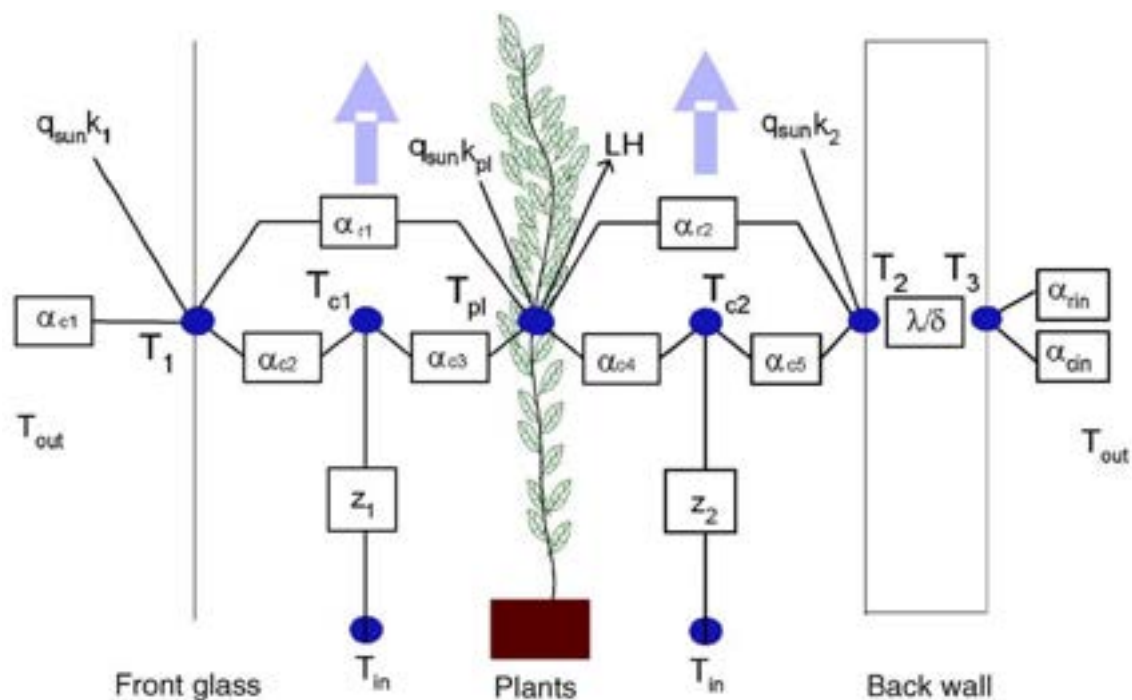


Figura 6: “Network model” di scambio termico nella facciata a doppia pelle con piante. (Fonte: Stec et al., 2005)

L’assunto alla base del modello è quello di una proporzionalità tra il calore latente espulso dalla pianta e la radiazione assorbita; è stata, infatti, introdotta una variabile “x”, che è il rapporto tra questi due termini.

I “network model” e, quindi, l’analogia elettrica sono spesso usati per descrivere il funzionamento degli inverdimenti verticali e hanno anche portato alla definizione di una resistenza della pianta.

Un “thermal-network model”, basato su resistenze e capacità termiche (Figura 7), realizzato seguendo le ben note analogie termico-elettriche, è stato proposto da Kontoleon ed Eumorfopoulou (2010). Essi hanno adottato un modello di parete con copertura vegetale (modello PCW) caratterizzato da due sotto-divisioni: il modello di parete (modello WM) e il modello della copertura vegetale (modello CM). È stato, quindi, calcolato un fattore di conduttanza termica equivalente per lo strato di copertura della pianta.

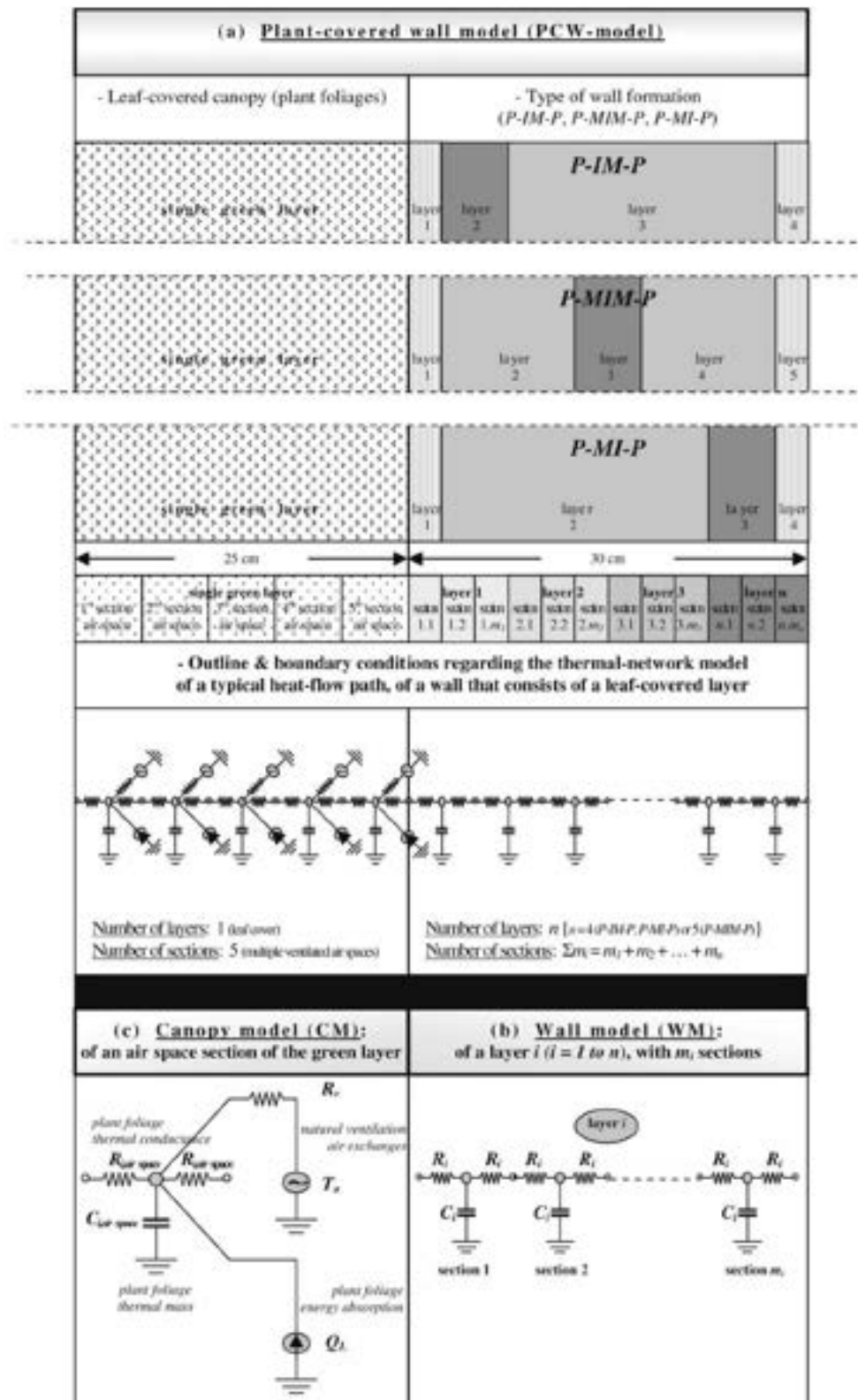


Figura 7: (a) Modello PCW per un percorso rappresentativo del flusso di calore, (b) Modello WM. (c) Modello CM. (Fonte: Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010)

Susorova *et al.* (2013) hanno sviluppato un modello monodimensionale per una parete verde, basato su ipotesi comuni negli studi di modellizzazione della vegetazione:

- Il modello considera le piante solo durante la stagione di crescita.

- Le foglie all'interno dello strato di vegetazione sono uniformemente distribuite e orientate. Le angolazioni delle singole foglie non sono considerate.
- I parametri della pianta, tra cui l'assorbanza delle foglie, la dimensione della foglia, l'indice dell'area fogliare, il coefficiente di attenuazione della radiazione e la conduttanza stomatica della pianta sono costanti e non cambiano con la stagione.
- Per calcolare la radiazione emessa dalla superficie della pianta, si assume che la temperatura delle foglie sia la stessa dell'aria.
- Il flusso di calore attraverso lo strato di vegetazione avviene solo orizzontalmente; il flusso di calore verticale è trascurato.
- I fattori esterni che possono variare in base all'altezza, come la velocità del vento, sono assunti costanti per le facciate basse considerate.
- Il livello di umidità del suolo alle radici delle piante è costante; non sono considerate le precipitazioni.
- L'aria sotto i pori stomatici è satura di acqua.

In questo studio, è stata anche ricavata una "resistenza termica efficace" dello strato vegetale, utile per confrontare la copertura verde con altri materiali isolanti. Essa rappresenta la diminuzione del trasferimento di calore conduttivo dovuto alla vegetazione.

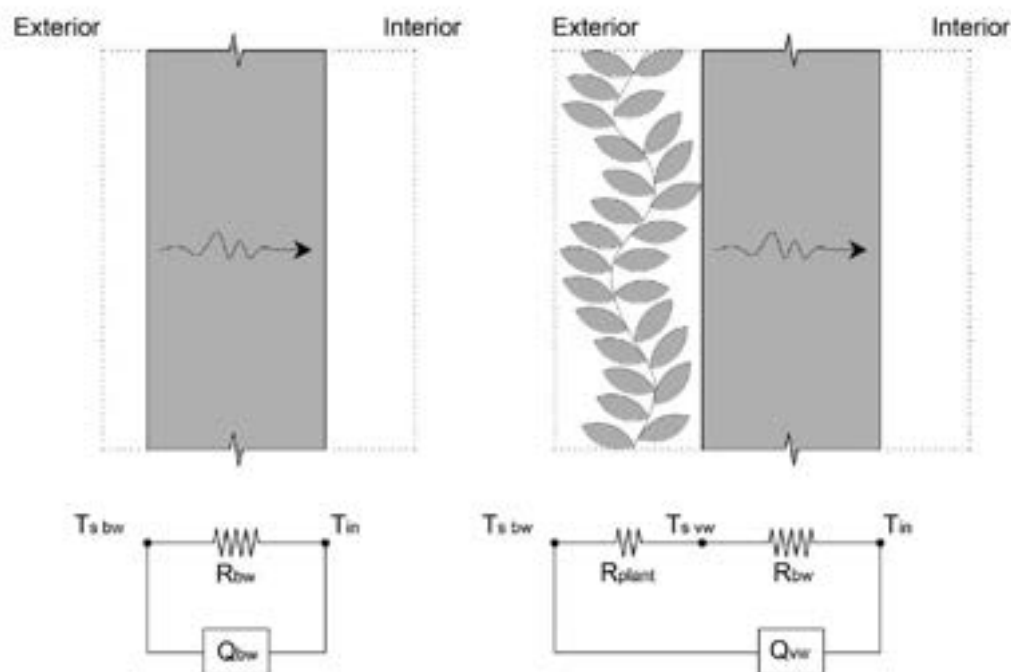


Figura 8: Flusso di calore attraverso la facciata nuda (a sinistra) e la facciata verde (a destra) rappresentato attraverso lo schema elettrico. (Fonte: Susorova *et al.*, 2013)

Così, attraverso l'analogia con un circuito elettrico, questa resistenza termica viene aggiunta, in serie agli altri resistori, che rappresentano gli altri componenti dell'involucro edilizio (Figura 8). La resistenza termica istantanea per la facciata verde è stata definita come (Susorova *et al.*, 2013):

$$R_{vw} = R_{bw} \frac{Q_{bw}}{Q_{vw}} = \frac{T_{sbw} - T_{in}}{Q_{vw}} \quad (5)$$

dove: R_{bw} è la resistenza termica della parete nuda (i.e. senza applicazione dello strato di vegetazione); Q_{bw} , il flusso di calore attraverso il muro esterno; Q_{vw} , il flusso di calore attraverso la parete verde; T_{sbw} , la temperatura superficiale della parete nuda e T_{in} , la temperatura della superficie interna. Pertanto, è stata calcolata la resistenza effettiva istantanea dello strato vegetale, come:

$$R_{plant} = R_{vw} - R_{bw} \quad (6)$$

Gli autori hanno, inoltre, evidenziato che, in condizioni meteorologiche miti, la resistenza efficace della pianta è trascurabile.

La resistenza della pianta è stata calcolata anche da Vox *et al.* (2017), per un intero anno, sia in caso di presenza di climatizzazione dell'aria dell'ambiente interno che in assenza di essa.

L'analogia termoelettrica ha ispirato il modello matematico, basato sull'approccio al volume finito, proposto da Scarpa *et al.* (2014). In questo caso, il comportamento termico delle pareti verdi è stato descritto attraverso una serie di nodi termici, ciascuno caratterizzato da una propria equazione di bilancio (Figura 9).

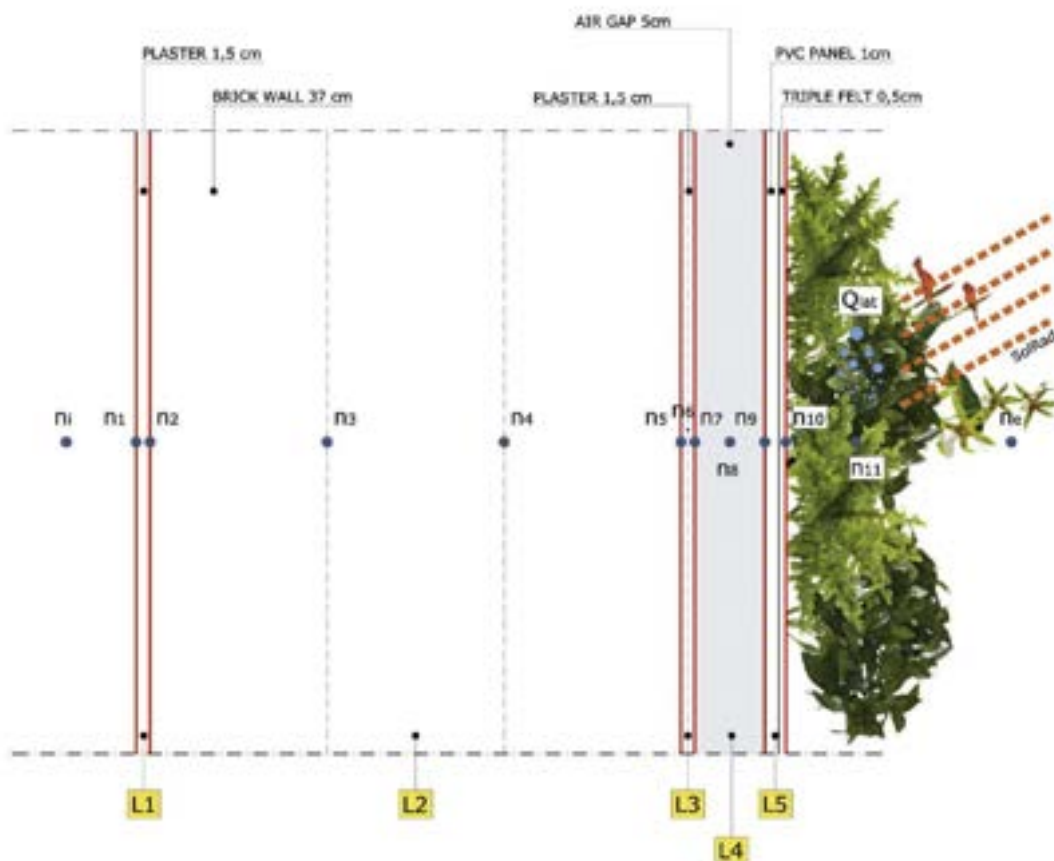


Figura 9: Discretizzazione del modello (n = nodo termico; L = strato termico). (Fonte: Scarpa *et al.*, 2014)

Il modello FASST è un modello dello stato di terreno, dinamico e monodimensionale, sviluppato da Frankenstein e Koenig (2004b). Il modello FASST calcola il contenuto di umidità del terreno, il contenuto di ghiaccio, la temperatura e i profili di congelamento-scongelo, nonché la resistenza del suolo e l'accumulo o esaurimento di neve e ghiaccio superficiali. L'operazione fondamentale del

modello FASST è il calcolo di un bilancio energetico e idrico che quantifica sia il flusso di calore e umidità all'interno del suolo, sia lo scambio di calore e umidità a tutte le interfacce (terra-aria o terra-neve, neve-aria) utilizzando sia i dati meteorologici che quelli del terreno. La vegetazione ha il potenziale per alterare le proprietà della superficie del suolo. Nella sua forma originale, gli unici effetti che la vegetazione aveva sul modello FASST erano di cambiare l'albedo e l'emissività della superficie (Frankenstein e Koenig, 2004a). Recentemente, è stato aggiunto un algoritmo di vegetazione multistrato, a due livelli. Questi ultimi possono essere implementati separatamente o insieme. Entrambi modificano i bilanci di energia e di umidità della superficie del suolo. Il modello di vegetazione è stato sviluppato sia per la vegetazione bassa (ad esempio arbusti, colture, erba) che per la vegetazione alta (alberi / coperture vegetali). Il budget energetico di uno strato di vegetazione sulla superficie del suolo viene modellato utilizzando un modello parallelo a piano semi-infinito e stato stazionario.

Il modello di vegetazione FASST, che deriva evidentemente da altri due utilizzati nelle comunità di modellizzazione atmosferica (ad es. "Biosphere Atmosphere Transfer Scheme", BATS (Dickinson *et al.*, 1986) e "Simple Biosphere model", SiB (Sellers *et al.*, 1986)), è stato seguito da Sailor (2008) per l'analisi del bilancio energetico dei tetti verdi (Figura 10) e la sua implementazione nel programma di simulazione di edifici Energy Plus (<https://energyplus.net/>).

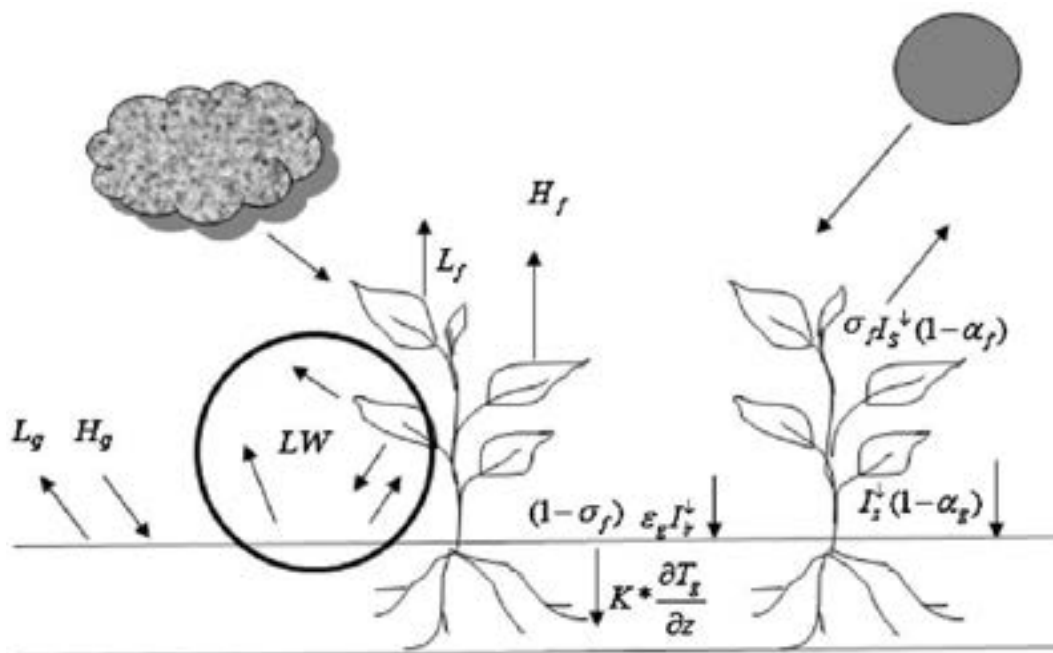


Figura 10: Il bilancio energetico per un tetto verde: flusso di calore latente (L), flusso di calore sensibile (H), radiazione a onde corte (I_s) e radiazione in entrata ad onde lunghe (I_{ir}). Vengono inoltre mostrati la condvezione nel terreno e il complesso scambio di radiazioni ad onde lunghe (LW) all'interno della copertura verde. (Fonte: Sailor *et al.*, 2008)

Basandosi sul modello di Sailor *et al.* (2008), Djedjig *et al.* (2015) hanno proposto un modello modificato di involucro verde (Figura 11), sviluppato e confrontato con gli studi sperimentali condotti presso l'Università di La Rochelle (Djedjig *et al.*, 2012), e adattato al software di simulazione degli edifici TRNSYS (<http://www.trnsys.com/>).

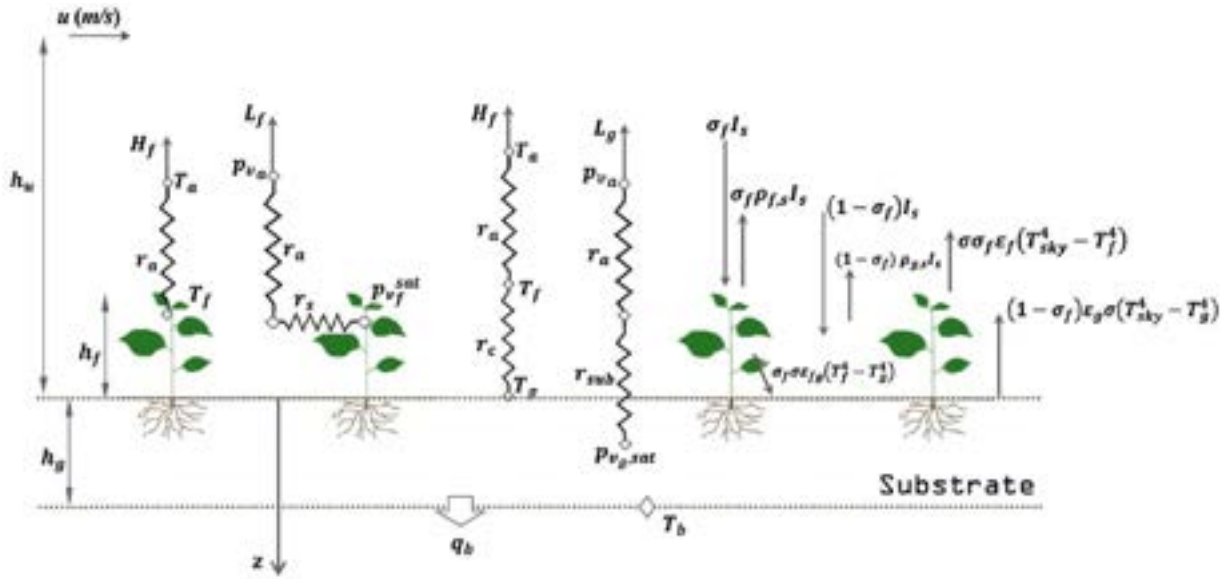


Figura 11: Principali flussi di calore modellati su un modulo di involucro verde e relative resistenze al trasferimento di calore e vapore. (Fonte: Djedjig *et al.*, 2015)

Il modello sviluppato prende in considerazione i fenomeni termici, aerulici e idrici e supera alcuni limiti e assunzioni di precedenti approcci di modellazione che assumono il trasferimento di calore quasi stazionario e trascurano l'effetto del trasferimento di acqua rispetto al trasferimento di calore. Questo nuovo modulo di TRNSYS può essere applicato sia a tetti verdi che a modelli di pareti verdi inserendo gli opportuni input meteorologici e adattando il modello a ciascuna tecnologia e alla loro specifica implementazione. Questo modello considera sia il trasferimento di calore che quello di massa attraverso lo strato verde e suggerisce la seguente espressione per il bilancio termico dello strato vegetale, per unità di superficie (Djedjig *et al.*, 2015):

$$(\rho c_p)_f d_f F \frac{dT_f}{dt} = \sigma_f [(1 - \tau_s - \rho_s)(1 + \tau_s \rho_g) I_s + F_{sky,f} \varepsilon_f \sigma (T_{sky}^4 - T_f^4) + \varepsilon_{fg} \sigma (T_g^4 - T_f^4)] - H_f - L_f \quad (7)$$

dove: $(\rho c_p)_f$ è la capacità termica specifica del fogliame; d_f , lo spessore medio delle foglie; F , l'indice dell'area fogliare; T_f , T_{sky} , T_g , rispettivamente, la temperatura del fogliame, del cielo e del substrato; σ_f , il rapporto di copertura fogliare; $F_{sky,f}$, il fattore di vista del cielo; τ_s , ρ_s , ε_f sono, rispettivamente, la trasmittanza a onda corta del fogliame, la riflettanza a onda corta e l'emissività; ρ_g , è la riflettanza del suolo; σ , la costante di Stefan-Boltzmann; ε_{fg} è definita come $1/\varepsilon_{fg} = 1/\varepsilon_f + 1/\varepsilon_g - 1$; I_s , l'irraggiamento solare; H_f , il flusso di calore sensibile e L_f , il flusso di calore latente attraverso la vegetazione.

In particolare, il flusso di calore sensibile (H_f) e il flusso di calore latente (L_f), per lo strato di vegetazione, sono stati calcolati come segue:

$$H_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{r_a} (T_f - T_a) \quad (8)$$

$$L_f = F \frac{(\rho c_p)_a}{\gamma(r_a + r_s)} (p_{vf,sat} - p_{va}) \quad (9)$$

dove: F , è l'indice dell'area fogliare; $(\rho c_p)_a$ è la capacità termica specifica dell'aria; T_a la temperatura ambiente; γ , la costante psicodinamica termodinamica; $p_{vf,sat}$ e p_{va} , il valore di saturazione della pressione del vapore alla temperatura fogliare e la pressione parziale del vapore

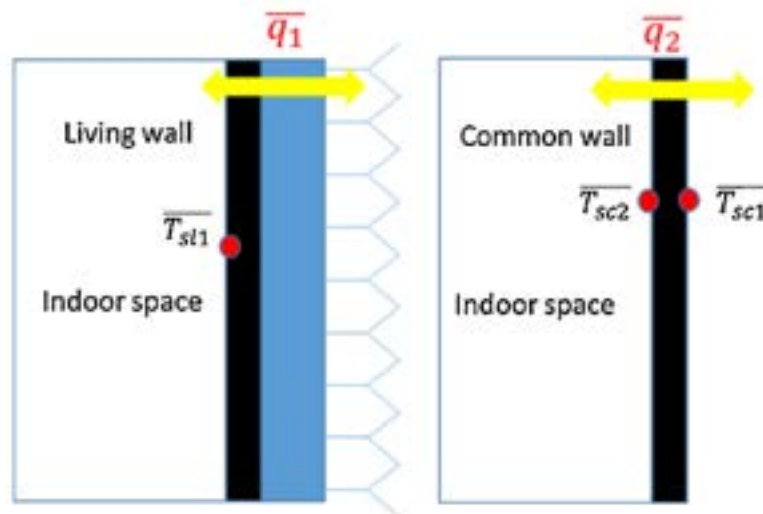


Figura 13: Schema di resistenza termica equivalente aggiuntiva. (Fonte: He *et al.*, 2017)

Essa è stata calcolata come:

$$\bar{R} = \frac{\overline{T_{sc1}} - \overline{T_{sl1}}}{\bar{q}_1} - \frac{\overline{T_{sc1}} - \overline{T_{sc2}}}{\bar{q}_2} \quad (11)$$

dove: $\overline{T_{sc1}}$ è la temperatura superficiale esterna di una parete comune; $\overline{T_{sc2}}$, la temperatura superficiale interna di una comune parete; $\overline{T_{sl1}}$, la temperatura superficiale interna della parete verde; \bar{q}_1 , il flusso di calore attraverso la parete verde e \bar{q}_2 , il flusso di calore attraverso la parete comune.

Hanno anche scoperto che, chiaramente, la resistenza termica equivalente aggiuntiva del muro verde in estate era superiore a quella in inverno.

Quello appena citato può essere considerato un modello idrotermico (sia il trasferimento di calore che il trasferimento di massa sono presi in considerazione), caratterizzato da una struttura a circuito con nodi rappresentanti le capacità e resistenze. Un modello idrotermico è stato sviluppato anche da Malys *et al.* (2014), che hanno ripreso molte delle equazioni proposte nello studio sui tetti verdi di Palomo Del Barrio (1998) e scomposto il nodo che identificava la superficie in tre: la vegetazione, l'aria all'interno della vegetazione e la superficie esterna del substrato o del muro (Figura 14).

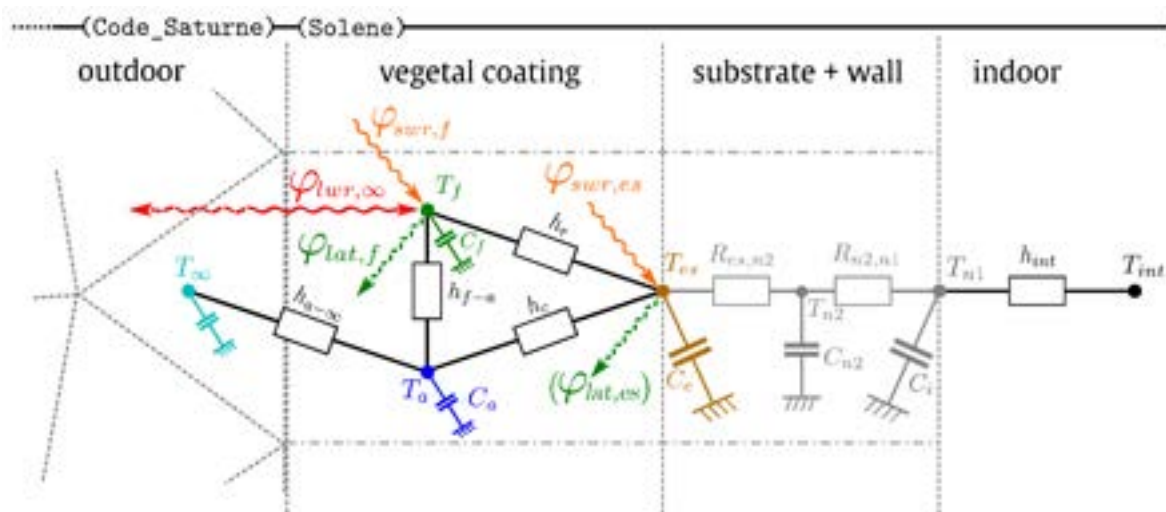


Figura 14: "Thermal-network model" della parete verde. (Fonte: Malys *et al.*, 2014)

Ciascuno di questi nodi è coinvolto in uno o più tipi di trasferimento di calore: il primo scambia radiazioni ad onde corte e ad onde lunghe con l'ambiente e il cielo; il secondo è interessato dai trasferimenti di calore di tipo convettivo con l'aria esterna e la superficie esterna del substrato o della parete; il terzo scambia calore per mezzo della radiazione con il primo, per convezione con il secondo e per conduzione con il nodo interno del muro. Inoltre, Malys *et al.* (2014) hanno implementato il modello in SOLENE-Microclimate (<https://aau.archi.fr/crenau/solene/>), un software di simulazione del microclima urbano, con l'obiettivo di valutare le prestazioni microclimatiche ed energetiche delle soluzioni di verde verticale a scala urbana, considerando che una delle differenze più significative, rispetto ai tetti verdi, è l'interazione con l'ambiente urbano e, soprattutto, gli scambi di radiazione ad onda lunga.

Questi modelli, così come quelli proposti da Alexandri e Jones (2007), che hanno utilizzato, inoltre, tre nodi termici per rappresentare la vegetazione (Figura 15), mostrano un approccio più avanzato rispetto a quello del passato.

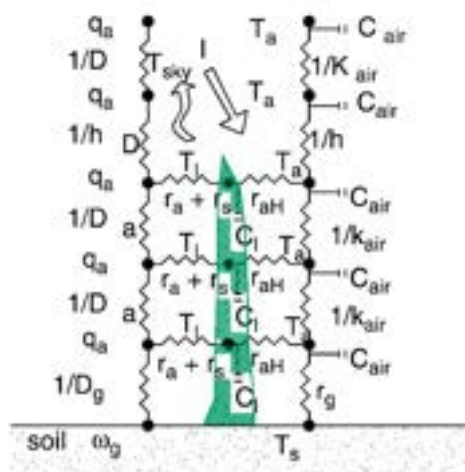


Figura 15: Trasferimento di calore e di massa nello strato della vegetazione, per i diversi nodi, rappresentanti le foglie e l'aria all'interno dello strato verde. (Fonte: Alexandri & Jones, 2007)

Infatti, gli autori più recenti propongono un modello pianta-aria, che tiene conto degli scambi tra le foglie della copertura verde e l'aria presente all'interno dello strato di vegetazione. I modelli precedenti, invece, avevano alcune semplificazioni. Ad esempio, Holm (1989) ha rappresentato la copertura verde attraverso l'analogia con uno strato di legno poroso e uno strato di acqua (Figura 16).

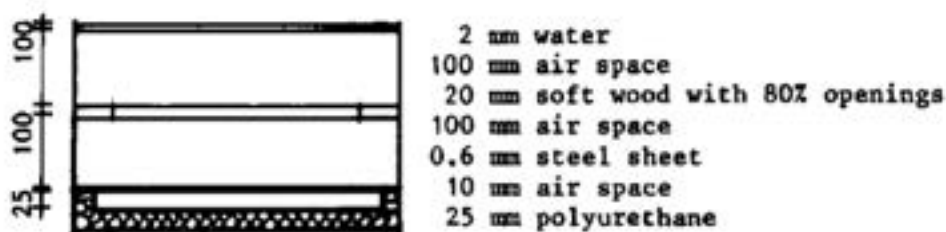


Figura 16: Modello per simulare l'effetto di una copertura fogliare di 200 mm sulle pareti esterne. (Fonte: Holm, 1989)

Altri ricercatori hanno considerato lo strato di copertura come un materiale uniforme, combinando le proprietà di aria (un gas) e fogliame (un solido), riducendo, in questo modo, la precisione del modello.

Inoltre, anche se è chiaro che, negli studi sulla modellazione, è necessario un certo grado di approssimazione, data la complessità delle caratteristiche di tale sistema “vivente”, tuttavia, se lo scopo è descrivere meglio il suo comportamento, alcune ipotesi sembrano non essere più accettabili. Ad esempio, a volte, viene trascurato il fatto che le piante, e quindi le loro caratteristiche, si evolvono e cambiano nel tempo, insieme al contesto esterno e i loro adattamenti non sono semplici da prevedere (Susorova *et al.*, 2013). Accade anche che le specie vegetali non siano nemmeno identificate (Alexandri e Jones, 2007; Stec *et al.*, 2005) e che i loro parametri siano correlati a quelli delle specie diffuse in agricoltura (Stec *et al.*, 2005).

Infine, ci sono anche modelli convalidati attraverso dati empirici, raccolti da apparati sperimentali ben progettati, e quelli che sono solo un’astrazione, senza alcun riscontro pratico.

È stato verificato che il comportamento termico di una parete verde è molto sensibile alla propria configurazione, nonché alle caratteristiche del suo rivestimento verde e al suo contesto climatico. Questa verifica è valida per gli impatti sia sull’edificio che sul suo ambiente prossimo, il che porta alla conclusione che la parete verde deve essere modellata in dettaglio per consentire una rappresentazione accurata dei tre fenomeni che svolgono ruoli importanti nel comportamento termico dell’involucro verde: evapotraspirazione, radiazione solare e scambio di calore convettivo. Inoltre, per confrontare diverse soluzioni tecniche, il modello deve anche consentire di rappresentare le tre categorie di scambi e tenere conto del comportamento di un substrato bagnato (Malys *et al.*, 2014).

Il problema della modellazione delle soluzioni di involucro dotate di verde verticale deve essere anche approfondito, concentrandosi non solo sull’approccio generale da seguire, ma, in dettaglio, sui singoli termini delle equazioni di bilancio. In particolare, le principali criticità riguardano la definizione e la valutazione del parametro LAI, le proprietà ottiche delle piante, l’evapotraspirazione, la resistenza stomatica e quella aerodinamica, i coefficienti di trasmissione del calore convettivo, e i fattori di vista.

2.1.2 Modello analitico

Il sistema di parete verde è stato studiato attraverso l’applicazione di un modello monodimensionale, considerando solo i flussi energetici normali alla parete. Esso è stato descritto ricorrendo ad equazioni di bilancio energetico (Kimball, 1973; Kindelan, 1980). Gli scambi energetici, nel sistema, si manifestano per convezione, conduzione e irraggiamento; inoltre, l’evapotraspirazione delle piante costituisce un contributo significativo del bilancio. In Figura 17 sono schematizzati i flussi di calore che si generano tra i differenti layer individuati:

- aria esterna (ea),
- strato di vegetazione (gl),
- intercapedine d’aria tra parete verde e parete esterna dell’edificio (ag),
- superficie esterna della parete dell’edificio (ew),
- superficie interna dell’edificio (iw)
- aria all’interno dell’edificio (ia).

Per ciascun elemento è stata scritta una equazione di bilancio e, tra queste, l’attenzione è stata focalizzata, in particolar modo, su quella relativa allo strato di vegetazione.

Il bilancio energetico per lo strato di vegetazione è descritto dalla seguente equazione:

$$E_1 - E_4 - E_2 + E_3 + \varepsilon_{gl} \cdot (R_1 + R_3) - (R_4 + R_2) + CV_{ea,gl} + CV_{ag,gl} + S_{gl} - \Phi = 0 \quad (12)$$

I termini E_i ($i=1, \dots, 4$; Figura 17) rappresentano la radiazione solare, caratterizzata da lunghezze d’onda nel range 300-3000 nm; R_i ($i=1, \dots, 4$; Figura 17) rappresentano la radiazione (LWIR) scambiata

nel campo dell'infrarosso lungo ($>3\mu\text{m}$); ε_{gl} esprime l'emissività dello strato verde; CV sono gli scambi di calore associati alla convezione; S_{gl} l'accumulo termico all'interno dell'elemento. Uno specifico contributo di questa equazione è il termine Φ , l'evapotraspirazione, peculiarità della vegetazione e, quindi, della parete verde.

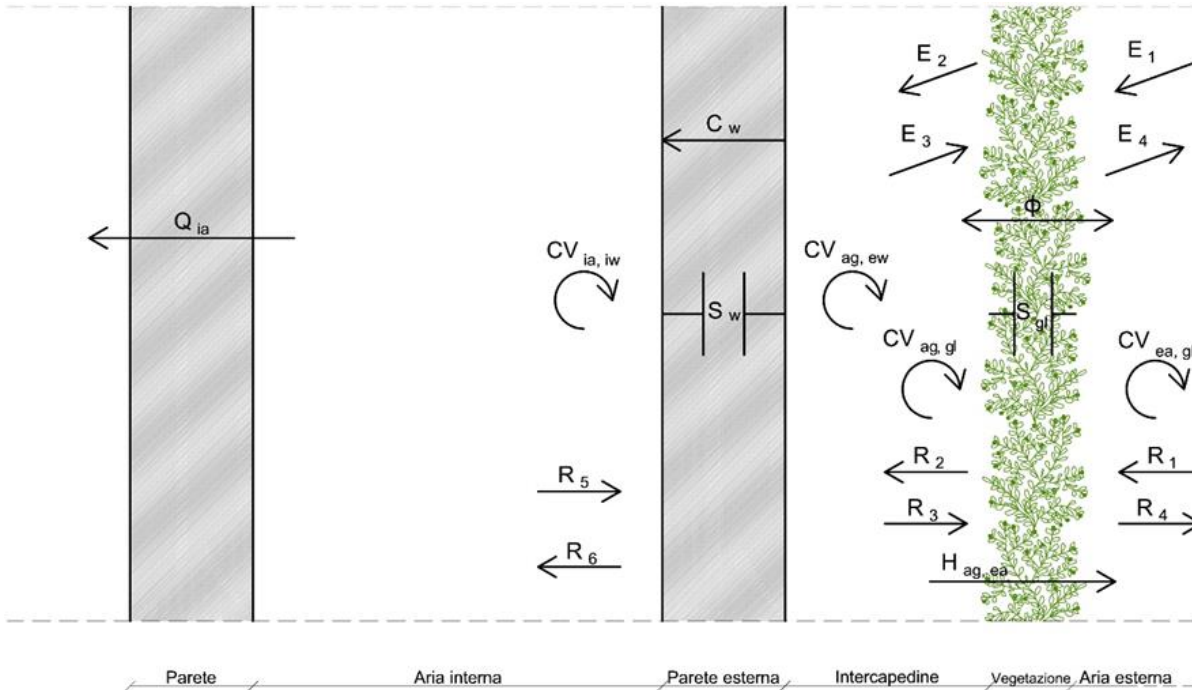


Figura 17: Rappresentazione schematica degli scambi energetici nel sistema di parete verde.

Le equazioni di bilancio energetico

I diversi strati individuati (Figura 17) scambiano energia per irraggiamento nell'intervallo di lunghezza d'onda solare tra 300 e 3000 nm (E) e nell'intervallo infrarosso ad onda lunga (LWIR; $> 3\mu\text{m}$) (R), per convezione (CV), per conduzione (C) ed evapotraspirazione (Φ); una parte di energia è anche immagazzinata negli strati (S).

Per ognuno degli strati (Figura 17) è stata, quindi, scritta un'equazione di bilancio energetico. Il bilancio termico per l'aria all'interno dell'edificio è:

$$CV_{ia,iw} - Q_{ia} = 0 \quad (13)$$

Il bilancio termico per la superficie interna del muro dell'edificio è:

$$\varepsilon_{iw}R_5 - R_6 - CV_{ia,iw} = 0 \quad (14)$$

con:

$$R_5 = \varepsilon_{ir}\sigma T_{ir}^4 \quad (15)$$

e

$$R_6 = \varepsilon_{iw}\sigma T_{iw}^4 \quad (16)$$

entrambi calcolati secondo la legge di Stefan-Boltzmann.

Il bilancio termico per la superficie esterna del muro dell'edificio è:

$$E_2 - E_3 + \varepsilon_{ew}R_2 - R_3 - CV_{ag,ew} - C_w - S_w = 0 \quad (17)$$

I termini C_w e S_w esprimono, rispettivamente, il contributo della conduzione del calore e dell'accumulo nel primo strato del muro esterno dell'edificio. L'accumulo di calore e la conduzione nella parete dell'edificio sono stati valutati usando l'equazione del calore di Fourier:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (18)$$

Il bilancio termico per l'aria nell'intercapedine è:

$$CV_{ag,ew} - CV_{ag,gl} - H_{ag,ea} = 0 \quad (19)$$

Il termine H rappresenta il calore scambiato per ventilazione tra l'aria nell'intercapedine e l'aria esterna.

Il bilancio termico per lo strato verde è descritto da:

$$E_1 - E_4 - E_2 + E_3 + \varepsilon_{gl}(R_1 + R_3) - (R_4 + R_2) + CV_{ea,gl} + CV_{ag,gl} + S_{gl} - \Phi = 0 \quad (20)$$

Il termine di evapotraspirazione (Φ) è specifico della vegetazione.

Scambi energetici nello strato verde

L'attenzione è focalizzata su ciascun termine del bilancio energetico dell'eq (12).

- *Accumulo termico*

L'accumulo di calore nello strato verde (S_{gl}) non è stato considerato, poiché la capacità termica dello strato di vegetazione è trascurabile rispetto agli altri flussi esistenti.

- *Scambi radiativi ad onde corte*

E_1 è la radiazione solare su una superficie verticale, i termini E_2 , E_3 , E_4 possono essere calcolati per mezzo di E_1 e della riflettività solare (ρ_{gl}), trasmissività (τ_{gl}) e assorbività (α_{gl}) dello strato verde e della riflettività solare della superficie esterna della parete (ρ_{ew}):

$$E_2 = \tau_{gl} \cdot E_1 \quad (21)$$

$$E_3 = \rho_{ew} \cdot \tau_{gl} \cdot E_1 \quad (22)$$

$$E_4 = \rho_{gl} \cdot E_1 \quad (23)$$

La somma algebrica dei termini E_i dà la radiazione solare netta assorbita dallo strato verde.

- *Scambi radiativi ad onde lunghe*

Gli scambi di calore LWIR sono:

$$R_1 = R_{sky} + R_{ground} \quad (24)$$

R_1 include il flusso della radiazione LWIR proveniente dalla volta celeste (R_{sky}) e dal terreno (R_{ground}) in relazione all'angolo solido del cielo e del suolo osservati dallo strato verde, rispettivamente:

$$R_{ground} = \sigma \cdot F_{ground} \cdot T_{ground}^4 \quad (25)$$

$$R_{sky} = \sigma \cdot F_{sky} \cdot T_{sky}^4 \quad (26)$$

R_{ground} e R_{sky} sono calcolati secondo la legge Stefan-Boltzmann; ponendo:

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_{ea}^{1.5} \quad (27)$$

calcolato come suggerito da Kindelan (1980), in condizioni di cielo sereno.

Gli altri termini R tengono conto dell'emissione LWIR dallo strato verde (R_2 e R_4) e dalla superficie esterna dell'edificio (R_3):

$$R_2 = R_4 = \sigma \cdot \varepsilon_{gl} \cdot T_{gl}^4 \quad (28)$$

$$R_3 = \sigma \cdot \varepsilon_{ew} \cdot T_{ew}^4 \quad (29)$$

- *Scambi convettivi*

Gli scambi di calore convettivo tra l'aria esterna e lo strato verde sono stati calcolati secondo quanto proposto da Papadakis *et al.* (1994), utilizzando il numero di Nusselt per la convezione forzata:

$$CV_{ea,gl} = \rho_a \cdot C_{pa} \cdot (T_{ea} - T_{gl}) \cdot r_e^{-1} \quad (30)$$

Il flusso di calore convettivo tra l'aria nell'intercapedine e lo strato verde è:

$$CV_{ag,gl} = h_{ag} \cdot (T_{ag} - T_{gl}) \quad (31)$$

- *Scambi di calore latente associati all'evapotraspirazione*

Il trasferimento di calore latente dovuto al processo di evapotraspirazione è calcolato secondo Monteith & Unsworth (1973) e Papadakis *et al.* (1994):

$$\Phi = \rho_a \cdot C_{pa} \cdot (e_{s,gl} - e_a) \cdot \gamma^{-1} \cdot (r_s + r_e)^{-1} \quad (32)$$

Applicazione a dati sperimentali

Il modello di bilancio energetico è stato, quindi, applicato utilizzando i dati raccolti nel 2015 e nel 2016 presso il centro sperimentale dell'Università di Bari, dove sono state realizzate due facciate verdi. Il muro è stato realizzato come prototipo di una chiusura verticale comunemente usata nelle costruzioni civili in ambiente mediterraneo. La parete, esposta a sud, è stata costruita utilizzando mattoni forati tenuti insieme dalla malta. La *Pandorea jasminoides variegated* e il *Rhynchospermum jasminoides*, piante rampicanti sempreverdi, sono state scelte come componenti del sistema di verde verticale. La struttura portante, costituita da una rete di ferro, è posta ad una distanza di 15 cm dalla parete verticale. I dati sperimentali sono stati raccolti per mezzo di una stazione meteorologica costituita da un data logger (CR10X, Campbell, Logan, USA) e diversi sensori al fine di misurare i diversi parametri climatici. I dati sono stati misurati con una frequenza di 60 s, in media ogni 15 minuti e memorizzati nel data logger. La radiazione solare normale al muro è stata misurata utilizzando un piranometro (modello 8-48, Eppley Laboratory, Newport, RI, USA) nella gamma di lunghezze d'onda 0,3-3 mm. La temperatura dell'aria esterna è stata misurata da un sensore HygroclipS3 (Rotronic, Zurigo, Svizzera). La temperatura delle superfici esterne dell'intonaco esposte alla radiazione solare è stata misurata mediante termistori (Tecno.el s.r.l. Formello, Roma, Italia).

La validazione è stata effettuata sulla parete avente come strato verde la *Pandorea jasminoides variegated*.

I parametri misurati, utilizzati per la validazione, sono:

- temperatura dell'aria esterna e umidità relativa,
- velocità del vento vicino alla parete verde,
- radiazione solare,
- temperatura dello strato verde,
- temperatura superficiale esterna del muro dietro la vegetazione.

La Figura 18 mostra i parametri misurati in un giorno estivo significativo. Il funzionamento della parete verde è descritto attraverso la radiazione solare incidente su una superficie verticale, la temperatura dell'aria esterna e la temperatura della superficie esterna della parete dell'edificio. Vi è un certo sfasamento tra le ultime due curve e la temperatura della superficie esterna della parete è, generalmente, inferiore a quella dell'aria, durante il giorno; ciò è significativo per comprendere i benefici della parete verde in estate.

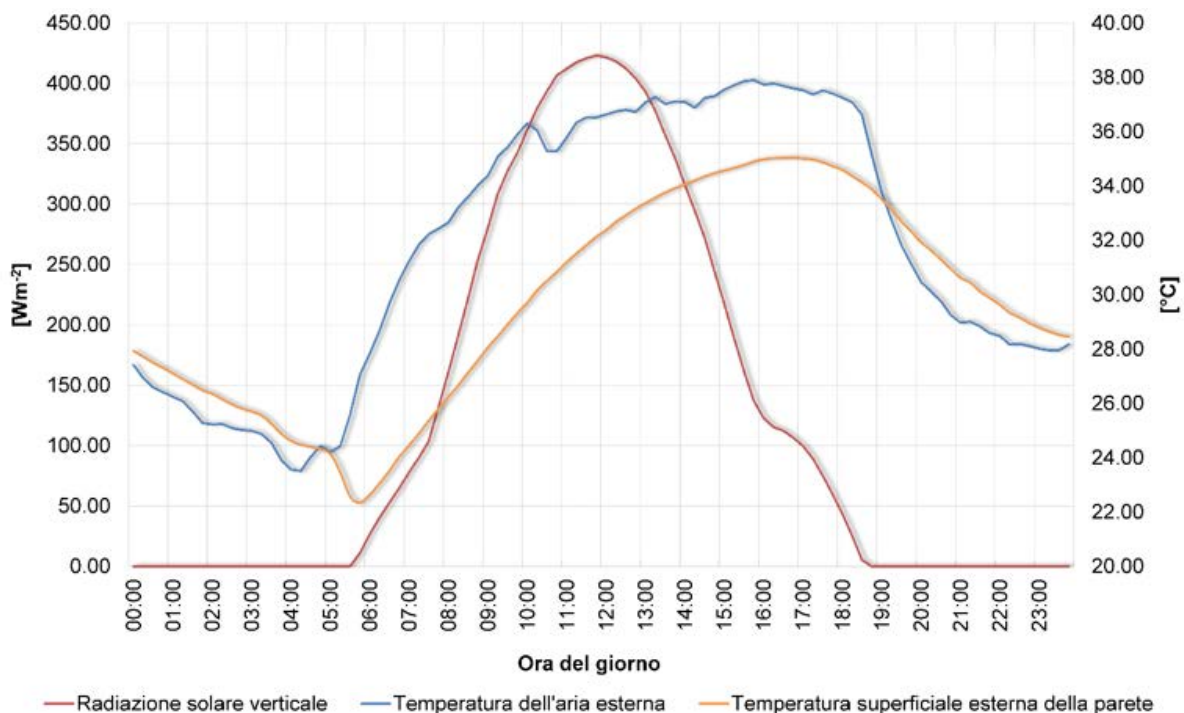


Figura 18: Valori misurati relativi a: componente verticale della radiazione solare, temperatura dell'aria esterna, temperatura superficiale della parete esterna, 30 luglio 2015.

I diversi contributi sensibili del bilancio energetico della vegetazione sono riportati in Figura 19. Si evince il ruolo maggiormente significativo della radiazione solare, che è sempre assorbita dall'elemento. La componente LWIR appare, invece, quasi sempre negativa, quindi, rappresenta energia persa dalla vegetazione. Infine, gli scambi convettivi mostrano un andamento fortemente

influenzato dalla velocità del vento e sono quantitativamente confrontabili con gli scambi termici dovuti alla LWIR.

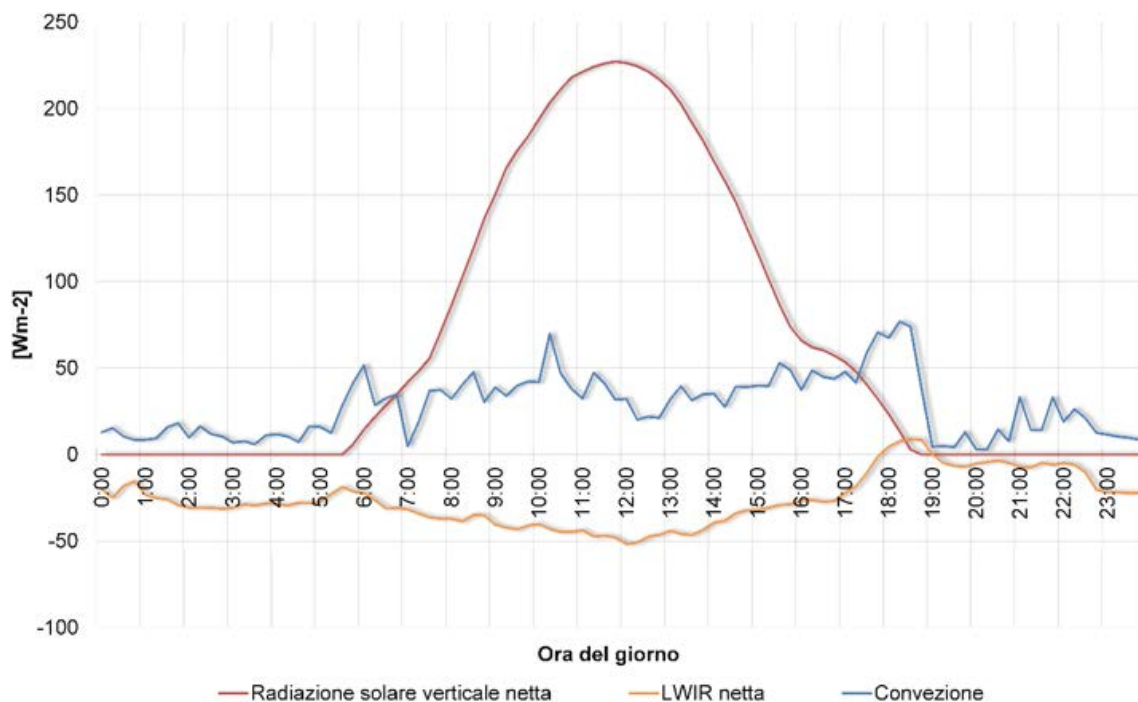


Figura 19: Valori calcolati di: radiazione solare verticale netta, LWIR netta, scambi convettivi relativi allo strato di vegetazione, 30 luglio 2015.

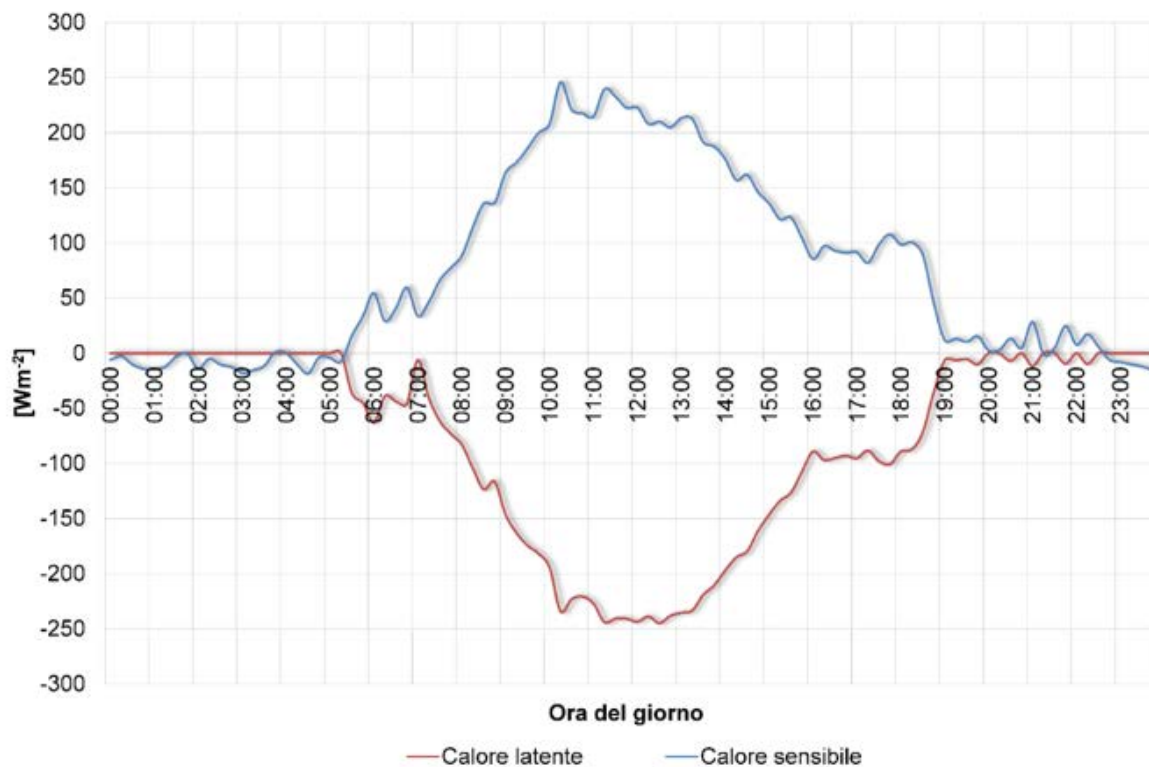


Figura 20: Valori calcolati di calore latente e sensibile scambiati dallo strato di vegetazione, 30 luglio 2015.

In Figura 20 sono riportati la somma algebrica dei contributi legati agli scambi di calore sensibile, generalmente assorbito dalla vegetazione, e il calore latente, cioè l'energia persa attraverso il meccanismo dell'evapotraspirazione. La corretta definizione dei termini energetici richiede che la somma di tutti i flussi energetici che riguardano lo strato vegetale sia nulla. Dal grafico si possono leggere la presenza di una certa simmetria tra le due curve ed il fatto che loro somma algebrica è quasi nulla. Pertanto, il bilancio energetico, per la parete verde, può ritenersi verificato.

Tale confronto, tra modello analitico e dati empirici, mostra l'affidabilità e la validità dell'approccio seguito. I risultati ottenuti potrebbero, dunque, essere utilizzati per la definizione di strumenti, *ad hoc* per le pareti verdi, applicabili in modelli di simulazione del microclima degli edifici.

NOMENCLATURA			
C	trasferimento di calore per conduzione [Wm^{-2}]	r	resistenza [sm^{-1}]
C_{pa}	calore specifico dell'aria a pressione costante [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]	S	accumulo termico [Wm^{-2}]
CV	trasferimento di calore per convezione [Wm^{-2}]	T	temperatura [K]
D	diffusività termica [m^2s^{-1}]	t	tempo [s]
E	radiazione solare [Wm^{-2}]	γ	costante psicrometrica = 66.7 [PaK^{-1}]
e	pressione di vapore dell'aria [Pa]	ϵ	emissività [%]
e_s	pressione di vapore dell'aria a saturazione [Pa]	ρ	riflettività solare [%]
F	fattore di vista	ρ_a	densità dell'aria [kgm^{-3}]
H	trasferimento di calore per ventilazione [Wm^{-2}]	σ	costante di Stefan-Boltzmann = 5.6697×10^{-8} [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$]
h	coefficiente convettivo [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]	τ	trasmissività solare [%]
Q	scambi di calore associate ai sistemi di condizionamento dell'aria [Wm^{-2}]	Φ	evapotraspirazione [Wm^{-2}]
R	trasferimento di calore per LWIR [Wm^{-2}]		
Pedici			
a	aria	ir	ambiente interno
ag	Intercapedine d'aria	ew	superficie esterna del muro
e	aerodinamica o esterna	iw	superficie interna del muro
ea	aria esterna	s	stomatica o interna
gl	strato di vegetazione	w	parete esterna dell'edificio
ia	aria interna		

2.1.3 Modello statistico

Questa sezione descrive, utilizzando un modello statistico, le prestazioni termiche delle due pareti verdi sperimentali nel periodo estivo. Gli approcci statistici richiedono notevoli quantità di dati misurati sperimentalmente ma nessuna informazione fisica sull'edificio; possono essere facilmente sviluppati e possono avere un'abilità di predizione soddisfacente (Yildiz *et al.*, 2017; Fumo *et al.*, 2015).

La temperatura superficiale esterna delle pareti è il parametro più comunemente riportato e confrontato negli studi che mirano a valutare l'efficacia delle facciate verdi sull'edificio o su un prototipo sperimentale. Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha sviluppato un modello lineare auto-regressivo per prevedere la riduzione della temperatura superficiale esterna quale effetto

dell'apposizione dello strato di piante, rispetto alla parete di controllo. In dettaglio la temperatura della superficie esterna della parete è stata modellata mediante una tecnica di regressione lineare multipla.

Il software CoStat (CoHort Software, Monterey, CA, USA) è stato utilizzato per lo sviluppo di un'analisi della varianza (ANOVA) finalizzata a identificare differenze significative tra i dati di temperatura osservati sulle pareti e quelli calcolati tramite la modellazione statistica. Sono stati utilizzati i dati raccolti sperimentalmente da gennaio 2015 a dicembre 2016 presso il campo sperimentale dell'Università di Bari a Valenzano (Bari). Nelle Figure 21-22 sono riportati i principali valori climatici raccolti durante le prove sperimentali.

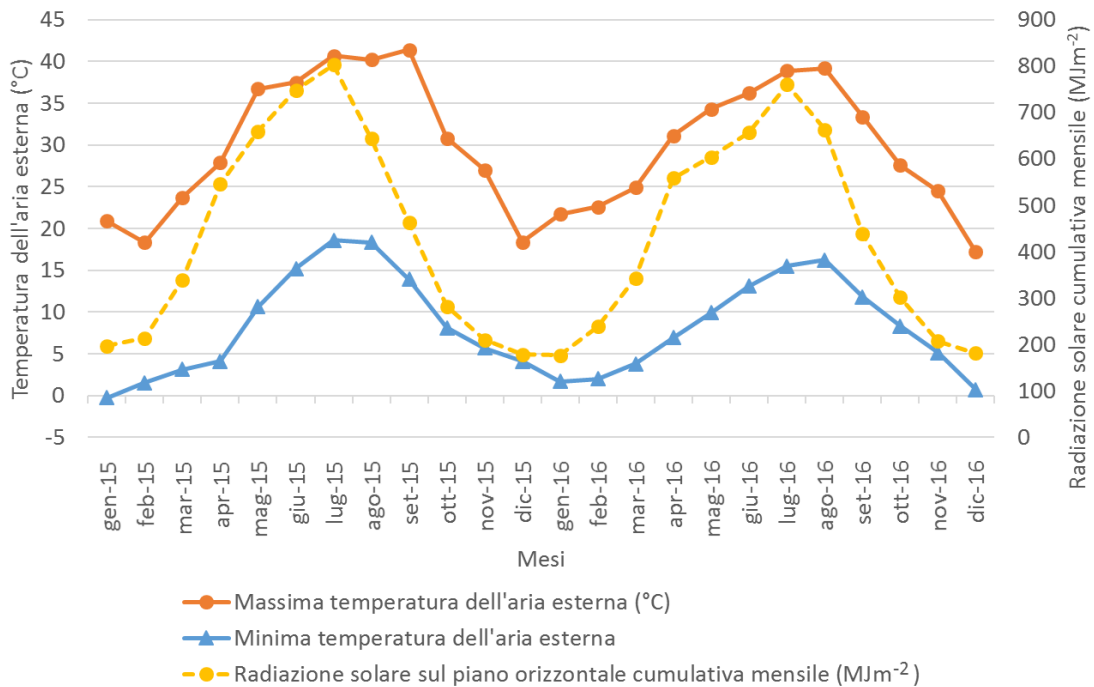


Figura 21: Massime e minime temperature mensili dell'aria esterna e radiazione solare sul piano orizzontale cumulativa mensile; 2015-2016.

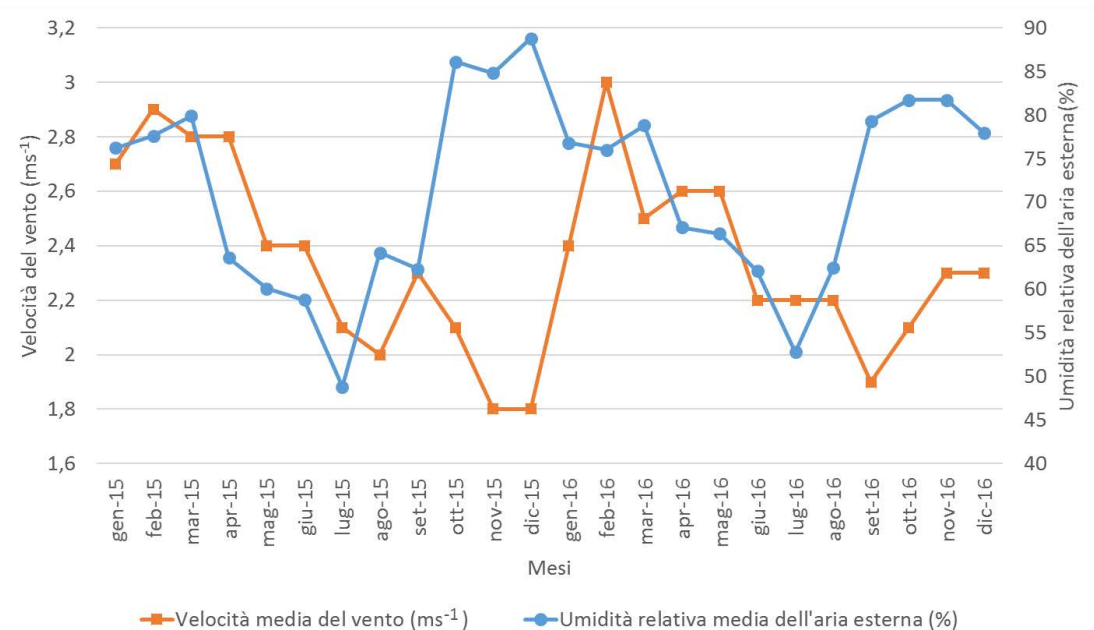


Figura 22: Velocità media del vento e umidità relativa media dell'aria esterna misurati nel campo sperimentale a Valenzano, 2015-2016.

Nel corso del 2015 il sito sperimentale è stato caratterizzato da valori della temperatura dell'aria esterna compresi tra $-0,3\text{ °C}$ e $41,4\text{ °C}$. Nel corso del 2016 il campo è stato caratterizzato da valori della temperatura dell'aria esterna compresa tra $0,7\text{ °C}$ e $39,2\text{ °C}$. Nel 2015 il valore mensile della radiazione solare cumulativa su un piano orizzontale variava da 179 MJm^{-2} a 802 MJm^{-2} e la radiazione solare cumulativa annuale era pari a 5282 MJm^{-2} . Nel 2016 il valore mensile della radiazione solare cumulativa su un piano orizzontale variava da 177 MJm^{-2} a 760 MJm^{-2} e la radiazione solare cumulativa annuale era pari a 5129 MJm^{-2} .

In questo studio l'analisi di regressione viene applicata per studiare la relazione funzionale tra la differenza di temperatura superficiale esterna tra parete di controllo e facciata verde (la variabile dipendente) e i parametri (le variabili indipendenti) che hanno influenza su questa differenza. Il modello di regressione lineare multipla è stato delineato utilizzando i dati raccolti durante il mese di luglio 2015 nel campo sperimentale descritto nel paragrafo precedente. Il modello è stato poi validato utilizzandolo per prevedere il comportamento della facciata verde nel mese di luglio 2016.

Le variabili indipendenti utilizzate nel modello sono anche dette "predittori". In qualità di predittori sono stati utilizzati i parametri climatici esterni come temperatura dell'aria esterna e umidità relativa, radiazione solare orizzontale e verticale, velocità e direzione del vento. L'equazione rappresentante il modello statistico definito è la seguente:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 Y_{t-1} + \beta_2 X_{1,t} + \beta_3 X_{1,t-1} + \beta_4 X_{2,t} + \beta_5 X_{2,t-1} + \beta_6 X_{3,t} + \beta_7 X_{3,t-1} + \beta_8 X_{4,t} + \beta_9 X_{4,t-1} + \beta_{10} X_{5,t} + \beta_{11} X_{5,t-1} + \beta_{12} X_{6,t} + \beta_{13} X_{6,t-1} + \varepsilon_t \quad (33)$$

La variabile dipendente Y_t è la differenza della temperatura superficiale esterna tra la parete di controllo e la parete verde al tempo t , che corrisponde ai quarti d'ora analizzati a luglio 2015. La variabile Y_{t-1} è la differenza della temperatura superficiale esterna tra la parete di controllo e la parete verde al tempo $t-1$, ed è stata utilizzata come predittore. Gli altri predittori sono $X_{i,t}$ e $X_{i,t-1}$, rispettivamente all'istante t e all'istante $t-1$, con $i = 1, \dots, 13$. $X_{1,t}$ e $X_{1,t-1}$ sono la temperatura dell'aria esterna, $X_{2,t}$ e $X_{2,t-1}$ sono la radiazione solare su un piano orizzontale, $X_{3,t}$ e $X_{3,t-1}$ sono l'umidità relativa dell'aria esterna, $X_{4,t}$ e $X_{4,t-1}$ sono la velocità del vento, $X_{5,t}$ e $X_{5,t-1}$ sono la direzione del vento, e $X_{6,t}$ e $X_{6,t-1}$ sono la radiazione solare su un piano verticale. β_0 è l'intercetta; β_i , con $i = 1, \dots, 13$, sono i coefficienti di regressione del modello; ε_t è un errore che rappresenta la differenza tra i dati previsti e i dati osservati.

L'equazione (33) è stata applicata per modellare i valori della differenza di temperatura di luglio 2015. Il modello stimato è stato sviluppato utilizzando lo strumento di regressione nel componente aggiuntivo Data Analysis di Excel il metodo dei minimi quadrati.

Nel mese di luglio 2015 il campo è stato caratterizzato da valori della temperatura dell'aria esterna compresa tra $18,6\text{ °C}$ e $40,7\text{ °C}$. Il valore mensile della radiazione solare cumulativa su un piano orizzontale era 802 MJm^{-2} e il valore mensile della radiazione solare cumulativa su un piano verticale era 304 MJm^{-2} . L'umidità relativa dell'aria esterna media era del 48,8% e la velocità media del vento era di $2,1\text{ ms}^{-1}$.

I dati raccolti sperimentalmente relativi a luglio 2015 sono stati raggruppati in cinque intervalli di tempo. Tali intervalli di tempo sono caratterizzati dall'aver simili valori di radiazione solare incidente su una superficie orizzontale (I_{hor}). Gli intervalli di tempo sono stati definiti come segue:

- ♦ $I_{hor\ 200}$: dalle 00:00 alle 06:30 e dalle 17:45 alle 23:45, $I_{hor} < 200\text{ W m}^{-2}$;
- ♦ $I_{hor\ 200-400}$: dalle 06:45 alle 07:30 e dalle 16:45 alle 17:30, $200 \leq I_{hor} < 400\text{ W m}^{-2}$;
- ♦ $I_{hor\ 400-600}$: dalle 07:45 alle 08:45 e dalle 15:45 alle 16:30, $400 \leq I_{hor} < 600\text{ W m}^{-2}$;

- ♦ $I_{\text{hor } 600-800}$: dalle 09:00 alle 10:15 e dalle 14:00 alle 15:30, $600 \leq I_{\text{hor}} < 800 \text{ W m}^{-2}$;
- ♦ $I_{\text{hor } 800}$: dalle 10:30 alle 13:45, $I_{\text{hor}} \geq 800 \text{ W m}^{-2}$.

Le fasce orarie sono state pertanto scelte in relazione alle specificità dell'area climatica dello studio. Successivamente, è stato sviluppato un modello statistico per ciascuna delle due facciate verdi e per ciascun intervallo di tempo. Pertanto, ogni modello di regressione è stato stimato utilizzando dati sperimentali relativi a una prestazione termica quasi simile delle facciate verdi. Nel momento in cui si analizzano i coefficienti di regressione stimati, essi vengono indicati con $\hat{\beta}_i$.

Utilizzando i dati osservati nel mese di luglio 2015, nell'eq. (33) $t = 1, \dots, 2976$. I modelli regressivi, uno per ciascun intervallo di tempo, sono esposti in Tabella 1 per *Rhyncospermum jasminoides* e nella Tabella 2 per *Pandorea jasminoides variegated*. Le tabelle 1-2 riportano anche i parametri correlati dell'analisi di qualità: il coefficiente di determinazione R^2 , il coefficiente di determinazione aggiustato R_{adj}^2 e l'errore quadratico medio RMSE. R^2 e R_{adj}^2 spiegano, variando tra 0 e 1, la bontà di adattamento da parte dei modelli sviluppati ai dati sperimentali, tanto migliore quanto più si avvicinano ad 1. Essi risultano molto alti per ogni modello. I valori RMSE risultano bassi, quindi la dispersione dei dati attorno alla linea di regressione è piccola.

Ogni coefficiente di regressione è caratterizzato dalla propria unità di misura. I coefficienti di regressione non possono essere confrontati tra loro, a causa della diversa unità di misura. Un valore positivo per un coefficiente di regressione significa che maggiore è il valore del predittore, maggiore è la differenza di temperatura tra la parete di controllo senza vegetazione e la facciata verde.

I coefficienti di regressione $\hat{\beta}_2$ e $\hat{\beta}_3$, che sono correlati al predittore della temperatura dell'aria esterna, non sono significativi per l'intervallo di tempo $I_{\text{hor } 200-400}$. $\hat{\beta}_2$ è positivo mentre $\hat{\beta}_3$ è negativo. Pertanto, il contributo dei predittori ai tempi t e $t-1$ si compensano parzialmente l'un l'altro.

I coefficienti riferiti alla radiazione solare predittiva sono $\hat{\beta}_4$ e $\hat{\beta}_5$ (radiazione solare orizzontale) e $\hat{\beta}_{12}$ e $\hat{\beta}_{13}$ (radiazione solare verticale); $\hat{\beta}_{12}$ e $\hat{\beta}_{13}$ sono caratterizzati da valori assoluti superiori a $\hat{\beta}_4$ e $\hat{\beta}_5$. Ciò spiega una maggiore influenza della radiazione solare verticale sulla differenza della temperatura della superficie esterna tra il muro di controllo e le pareti verdi, rispetto al contributo orizzontale della radiazione solare.

I coefficienti di regressione $\hat{\beta}_6$ e $\hat{\beta}_7$, che sono correlati alla variabile umidità relativa dell'aria esterna, non sono significativi per $I_{\text{hor } 200-400}$ e per $I_{\text{hor } 800}$. La relazione con la variabile di velocità del vento è espressa da $\hat{\beta}_8$ e $\hat{\beta}_9$, mentre la dipendenza dalla direzione del vento con $\hat{\beta}_{10}$ e $\hat{\beta}_{11}$. Non risulta nessuna dipendenza dei risultati dalle caratteristiche del vento per $I_{\text{hor } 400-600}$.

Ogni modello predittivo, sviluppato a partire dai dati di luglio 2015, è stato poi applicato per prevedere le prestazioni delle facciate verdi nel mese di luglio 2016. Nel mese di luglio 2016 il campo è stato caratterizzato da valori della temperatura dell'aria esterna compresa tra 15,5 °C e 38,9 °C. Il valore mensile della radiazione solare cumulativa era 760 MJm⁻² e 278 MJm⁻² su un piano orizzontale e su un piano verticale, rispettivamente. L'umidità relativa dell'aria esterna media era del 52,8% e la velocità media del vento era di 2,2 ms⁻¹.

Predittori	Y_{t-1}	$X_{1,t}$	$X_{1,t-1}$	$X_{2,t}$	$X_{2,t-1}$	$X_{3,t}$	$X_{3,t-1}$	$X_{4,t}$	$X_{4,t-1}$	$X_{5,t}$	$X_{5,t-1}$	$X_{6,t}$	$X_{6,t-1}$	Parametri di qualità del modello			
		Temperatura aria esterna	Temperatura aria esterna	Radiazione solare orizzontale	Radiazione solare orizzontale	Umidità relativa aria esterna	Umidità relativa aria esterna	Velocità vento	Velocità vento	Direzione vento	Direzione vento	Radiazione solare verticale	Radiazione solare verticale				
Coefficienti della regressione stimati																	
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$	$\hat{\beta}_5$	$\hat{\beta}_6$	$\hat{\beta}_7$	$\hat{\beta}_8$	$\hat{\beta}_9$	$\hat{\beta}_{10}$	$\hat{\beta}_{11}$	$\hat{\beta}_{12}$	$\hat{\beta}_{13}$	R^2	R_{adj}^2	RMSE
Intervalli di tempo con simili valori di radiazione solare su una superficie	I_{hor}^{200}	-0.3168	0.9155	0.0705	-0.0670	-0.0008	-0.0006	0.0014		0.0096			0.0052		1.00	1.00	0.05
	$I_{hor}^{200-400}$	-0.1832	0.9304		-0.0011				0.0170		0.0003		0.0058	-0.0016	1.00	1.00	0.08
	$I_{hor}^{400-600}$	-0.9416	0.9316	0.1315	-0.1163	0.0011	-0.0006	0.0060							1.00	1.00	0.11
	$I_{hor}^{600-800}$	-0.3290	0.9277		-0.0009	0.0015	0.0029		-0.0682				0.0051	-0.0042	0.99	0.99	0.12
	I_{hor}^{800}	-0.3792	0.9092	0.0667	-0.0714						-0.0006		0.0030		0.99	0.99	0.09

Tabella 1: Coefficienti di regressione stimati e parametri di qualità del modello per la parete verde coperta con *Rhynchospermum jasminoides*, per luglio 2015.

Predittori	Y_{t-1}	$X_{1,t}$	$X_{1,t-1}$	$X_{2,t}$	$X_{2,t-1}$	$X_{3,t}$	$X_{3,t-1}$	$X_{4,t}$	$X_{4,t-1}$	$X_{5,t}$	$X_{5,t-1}$	$X_{6,t}$	$X_{6,t-1}$	Parametri di qualità del modello			
		Temperatura aria esterna	Temperatura aria esterna	Radiazione solare orizzontale	Radiazione solare orizzontale	Umidità relativa aria esterna	Umidità relativa aria esterna	Velocità vento	Velocità vento	Direzione vento	Direzione vento	Radiazione solare verticale	Radiazione solare verticale				
Coefficienti della regressione stimati																	
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$	$\hat{\beta}_5$	$\hat{\beta}_6$	$\hat{\beta}_7$	$\hat{\beta}_8$	$\hat{\beta}_9$	$\hat{\beta}_{10}$	$\hat{\beta}_{11}$	$\hat{\beta}_{12}$	$\hat{\beta}_{13}$	R^2	R_{adj}^2	RMSE
Intervalli di tempo con simili valori di radiazione solare su una superficie	I_{hor}^{200}	-0.1535	0.9552	0.0981	-0.0977	0.0014	-0.0016	0.0007			0.0002				0.98	0.98	0.09
	$I_{hor}^{200-400}$	-0.1004	0.8816		-0.0017				-0.0252		0.0002		0.0079	-0.0010	1.00	1.00	0.06
	$I_{hor}^{400-600}$	0.0000	0.9216	0.1182	-0.1234		-0.0006						0.0036		1.00	0.99	0.09
	$I_{hor}^{600-800}$	-0.8818	0.8512	0.0237	-0.0012	0.0015	-0.0176	0.0222	-0.0737		-0.0004		0.0057	-0.0041	0.99	0.99	0.11
	I_{hor}^{800}	0.0000	0.8866	0.1076	-0.1086	-0.0006				-0.0552	-0.0004	-0.0003	0.0044	-0.0006	1.00	1.00	0.07

Tabella 2: Coefficienti di regressione stimati e parametri di qualità del modello per la parete verde coperta con *Pandorea jasminoides variegated*, per luglio 2015.

Le Figure 23-24 mostrano le differenze tra la temperatura superficiale esterna sulla parete di controllo e sulle facciate verdi determinate con i valori osservati durante il test sperimentale e i valori calcolati con il modello predittivo globale. I dati sperimentali osservati sono stati registrati durante il periodo 29-30 luglio 2016.

La differenza massima tra la temperatura superficiale esterna della parete di controllo e la facciata verde coperta con *Rhynchospermum jasminoides* (Figura 23) è pari a 6.28 °C e 5.14 °C considerando rispettivamente i valori sperimentali e i valori calcolati con il modello predittivo. La differenza minima è di -1.87 °C e -1.50 °C per i valori sperimentali e i valori previsti, rispettivamente.

La differenza massima tra la temperatura superficiale esterna della parete di controllo e la facciata verde coperta da *Pandorea jasminoides variegata* (Figura 24) è di 5.84 °C e di 5.47 °C per i valori sperimentali e i valori previsti, rispettivamente. La differenza minima è -1.89 °C e -1.43 °C per i valori sperimentali e i valori previsti, rispettivamente.

I modelli mostrano una buona capacità predittiva. Un'analisi one-way ANOVA a un livello di probabilità del 95% è stata sviluppata per il periodo di test selezionato al fine di valutare i valori medi dei dati sperimentali e dei dati calcolati. Non sono state rilevate differenze statisticamente significative per entrambe le facciate verdi. Il modello potrebbe rivelarsi utile per fare previsioni sull'efficacia di impiego di una soluzione tecnica specifica e in contesti climatici mediterranei.

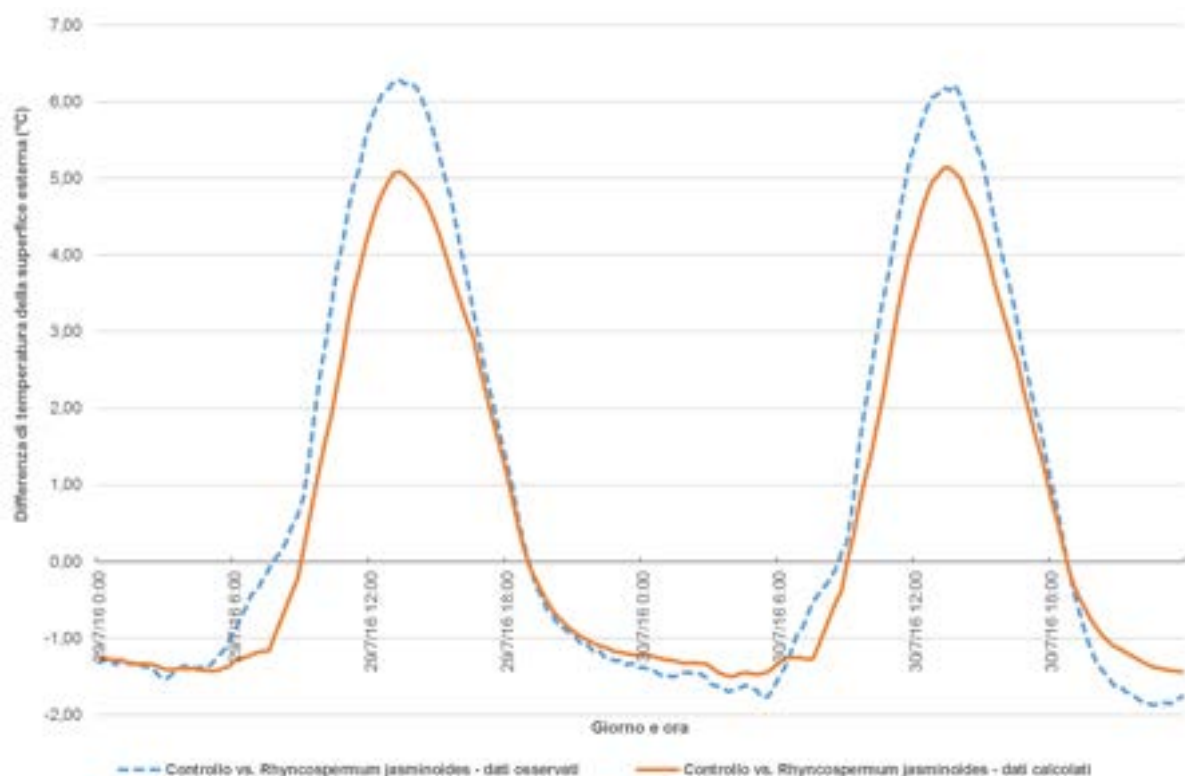


Figura 23: Differenza della temperatura superficiale esterna tra la parete di controllo e la parete verde coperta da *Rhynchospermum jasminoides*: dati osservati nel campo sperimentale e valori calcolati utilizzando i modelli predittivi; 29-30/07/2016.

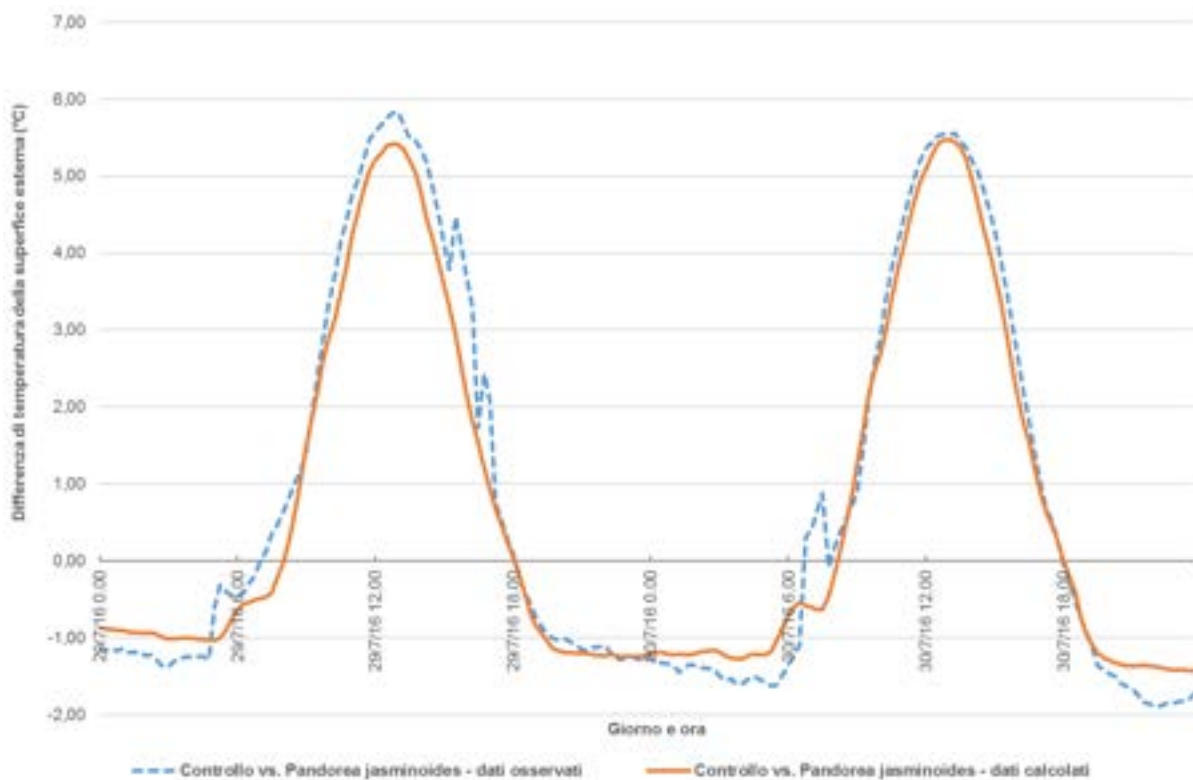


Figura 24: Differenza della temperatura superficiale esterna tra la parete di controllo e la parete verde coperta da *Pandorea jasminoides variegated*: dati osservati nel campo sperimentale e valori calcolati utilizzando i modelli predittivi; 29-30/07/2016.

3. Tecniche sostenibili di raffrescamento in serra in presenza di solar cooling

3.1 Gli aspetti energetici

Nell'ambito delle attività "Tecniche sostenibili di raffrescamento in serra in presenza di solar cooling", il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha continuato le attività di sperimentazione relative all'applicazione di una tecnologia per il raffrescamento di una serra basata sullo sfruttamento dell'energia solare. L'attività di ricerca è stata svolta presso il Centro sperimentale P. Martucci dell'Università di Bari A. Moro, in località Valenzano (BA), latitudine 41° 05' N, longitudine 16° 53' E, altitudine 85 m s.l.m. (Figura 25).



Figura 25: Centro sperimentale "P. Martucci" dell'Università di Bari, Valenzano (BA).



Figura 26: Impianto di solar cooling composto da campo solare, assorbitore, torre evaporativa, serbatoio di accumulo caldo e serbatoio di accumulo freddo, presso il Centro sperimentale "P. Martucci" dell'Università di Bari, Valenzano (BA).

Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha focalizzato la sua attenzione, in particolare, sulla metodologia di trasferimento alla zona di coltivazione in serra dell'energia di raffreddamento prodotta dall'impianto composto dall'assorbitore alimentato dal campo di collettori solari (Figura 26).

La sperimentazione è stata condotta all'interno di una serra con struttura in acciaio, copertura in film plastico e orientamento nord-sud dell'asse longitudinale; le dimensioni di base della serra sono pari a 30.00 m x 10.00 m con altezza di colmo pari a 4.45 m e altezza di gronda pari a 2.45 m.

La serra è stata coperta con un film in EVA con spessore di 0.20 mm (PATILUX, P.A.T.I., San Zenone degli Ezzelini, Treviso, Italia). Il film in EVA presenta i seguenti coefficienti radiometrici (Papadakis *et al.*, 2000): trasmissività totale solare pari al 90.9%, trasmissività diretta solare pari al 56,7%, trasmissività nell'IR lungo (LWIR) pari al 22.5%, quindi con effetto serra pari a 77.5 %.

La coltivazione delle piante in serra è stata realizzata su linee disposte trasversalmente all'asse longitudinale della serra, composte ciascuna da 6 vasi delle dimensioni di 1.00 m x 0.40 m x 0.40 m. L'irrigazione è stata fornita mediante un sistema di irrigazione puntuale a goccia.

I risultati ottenuti durante il PAR 2016 avevano dimostrato la necessità di confinare il freddo in prossimità della zona di coltivazione utilizzando una barriera fisica per evitare che l'energia termica di raffreddamento si disperdesse al di fuori della zona di coltivazione. Nell'ambito del PAR 2017 si è realizzato un ambiente confinato in prossimità dei vasi di coltivazione utilizzando un materiale plastico trasparente in EVA dello spessore di 0.200 mm (Figure 27 e 28). La chiusura con il film è stata realizzata in modo da lasciare un'apertura superiore (Figura 28), in grado di consentire la fuoriuscita dell'aria più calda dal volume confinato, trattenendo l'aria a temperatura più bassa nella zona inferiore del volume. La presenza fisica del materiale plastico trasparente consente la trasmissione della radiazione solare necessaria alle piante e il confinamento dell'aria fredda in prossimità della vegetazione, permettendo di realizzare un microclima ottimale per la crescita delle piante nel periodo estivo. Durante le prove è stata realizzata una coltivazione di basilico (Figura 29)



Figura 27: Sistema di tubi e piastre di raffreddamento con chiusura in film plastico della zona di coltivazione.



Figura 28: Sistema di tubi e piastre di raffreddamento con chiusura in film plastico della zona di coltivazione, vista laterale.



Figura 29: Vasi per la coltivazione in serra con presenza di piante e sistema di raffreddamento con tubi e piastra fredda.

L'impianto di solar cooling è stato realizzato al fine di sfruttare la contemporaneità fra radiazione solare disponibile ed esigenza di raffrescamento in serra. A tal fine sono stati studiati i dati relativi alla disponibilità di radiazione solare e al contemporaneo trasferimento di energia di raffreddamento alla zona di coltivazione delle piante.

I flussi energetici sono stati valutati sulla base delle misure effettuate presso l'impianto. Il sistema di acquisizione dati ha misurato, sulle varie sezioni d'impianto, le temperature di mandata e di ritorno dell'acqua, fredda e calda, e la portata in volume nelle tubazioni. Le potenze scambiate sono state calcolate mediante la formula:

$$P = m \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \quad [W] \quad (33)$$

ove m [$m^3 \cdot s^{-1}$] è la portata; C_p [$J \cdot kg^{-1} K^{-1}$] il calore specifico dell'acqua; ρ [$kg m^{-3}$] la densità dell'acqua; ΔT [K] è la differenza di temperatura fra il fluido in mandata e quello di ritorno.

Le temperature sono state misurate mediante sonde PT100, la portata volumetrica mediante misuratori ad impulsi (Figura 30).



Figura 30: Misuratore ad impulsi della portata volumetrica.

Valori positivi di potenza "P" nei successivi grafici indicano un'energia termica di riscaldamento, valori negativi energia di raffreddamento.

I sensori presenti presso l'impianto sono stati interfacciati con un data logger per l'acquisizione in continua e la memorizzazione dei dati. Nel complesso sono stati rilevati i seguenti parametri; radiazione solare; temperatura dell'aria esterna ed in serra; umidità relativa dell'aria esterna; temperatura di mandata e ritorno per il campo solare, il serbatoio caldo, l'assorbitore, il serbatoio freddo, la tubazione di raffreddamento in serra; portate volumetriche fra i vari componenti dell'impianto di solar cooling e verso la serra.

L'analisi dei flussi energetici parte dalla radiazione solare come sorgente primaria di energia, continua con la sorgente calda di energia termica che alimenta l'assorbitore, quindi con l'energia di raffreddamento prodotta dall'assorbitore e termina con l'energia di raffreddamento fornita all'area di coltivazione.

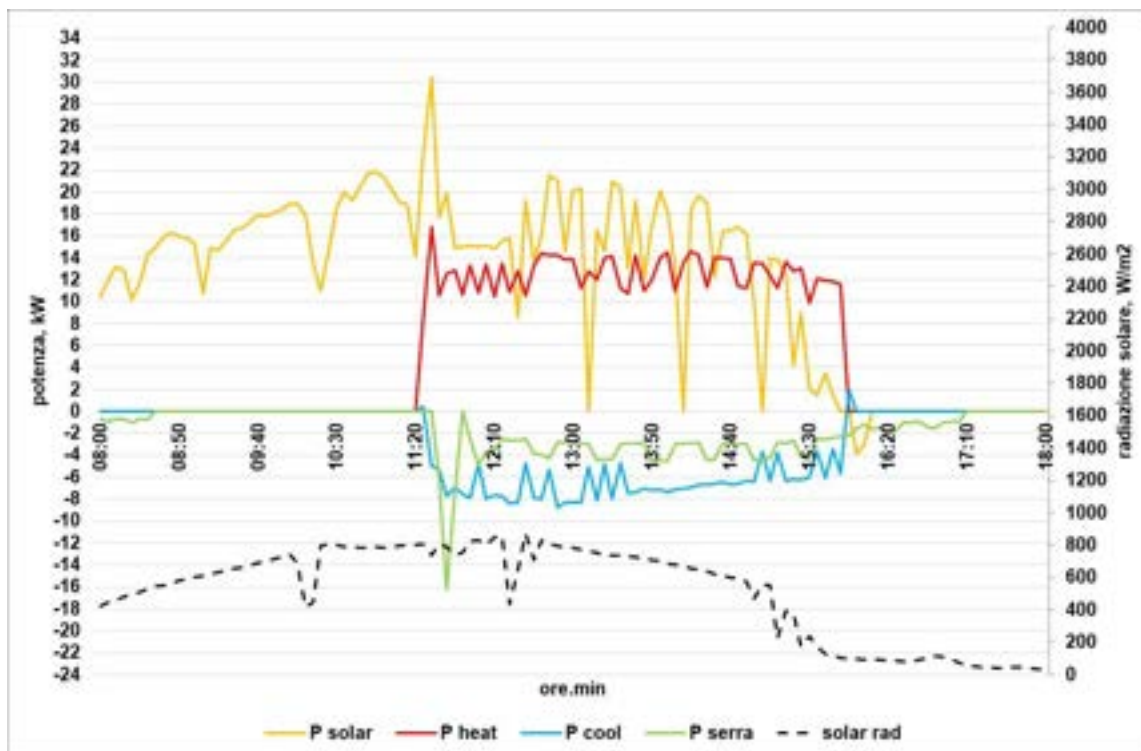


Figura 31: Andamento delle potenze trasferite nel sistema di raffreddamento in serra: potenza trasferita dal campo solare al serbatoio di accumulo caldo (P solar); potenza trasferita dal serbatoio caldo all’assorbitore (P heat); potenza trasferita dall’assorbitore al serbatoio freddo (P cool); potenza trasferita dall’accumulo freddo alla serra (P serra); radiazione solare (solar rad), asse dx; dati registrati in data 30/08/2018.

Le Figure 31-33 mostrano l’andamento dei flussi di energia per 3 giorni dell’estate 2018. Nelle figure è possibile osservare l’andamento dell’energia termica di riscaldamento (positiva) prodotta dal campo solare (P solar) e trasferita al serbatoio caldo insieme con quella, sempre di riscaldamento, trasferita dal serbatoio caldo all’assorbitore (P heat).

L’energia trasferita dal serbatoio di accumulo caldo all’assorbitore (P heat) si mantiene costante rispetto all’energia trasferita dal campo solare al serbatoio di accumulo caldo (P solar), in virtù della capacità di accumulo del serbatoio, con volume di 2000 litri, che compensa le oscillazioni proprie del sistema di captazione dell’energia radiativa del campo solare (Figure 31-33).

Per quanto riguarda la capacità di produrre energia di raffreddamento si nota come, a fronte di una fornitura di potenza termica di riscaldamento di 13.6 kW all’assorbitore, questo sia stato in grado di generare una potenza di raffreddamento (P cool, negativa) di 9.9 kW (Figura 33); il rendimento dell’assorbitore è quindi risultato in questo caso pari a 0.73, superiore al valore indicato per la macchina pari a 0.7. Tali valori sono stati registrati in presenza di una radiazione solare di poco inferiore a 800 Wm^{-2} .

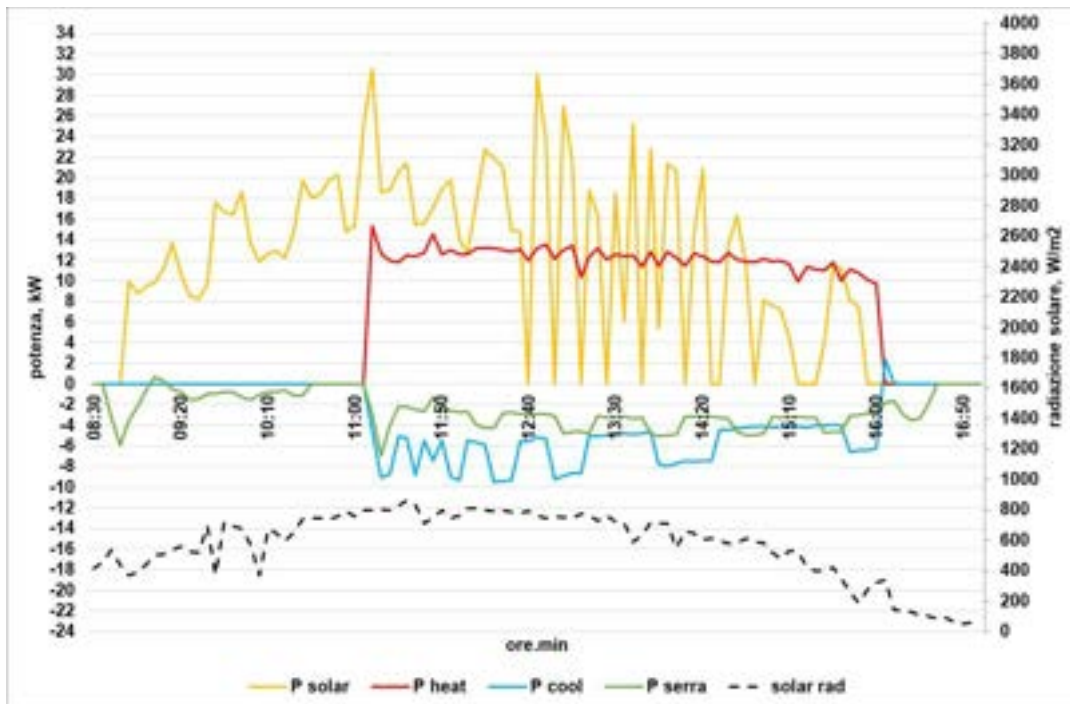


Figura 32: Andamento delle potenze trasferite nel sistema di raffreddamento in serra: potenza trasferita dal campo solare al serbatoio di accumulo caldo (P solar); potenza trasferita dal serbatoio caldo all'assorbitore (P heat); potenza trasferita dall'assorbitore al serbatoio freddo (P cool); potenza trasferita dall'accumulo freddo alla serra (P serra); radiazione solare (solar rad), asse dx; dati registrati in data 10/09/2018.

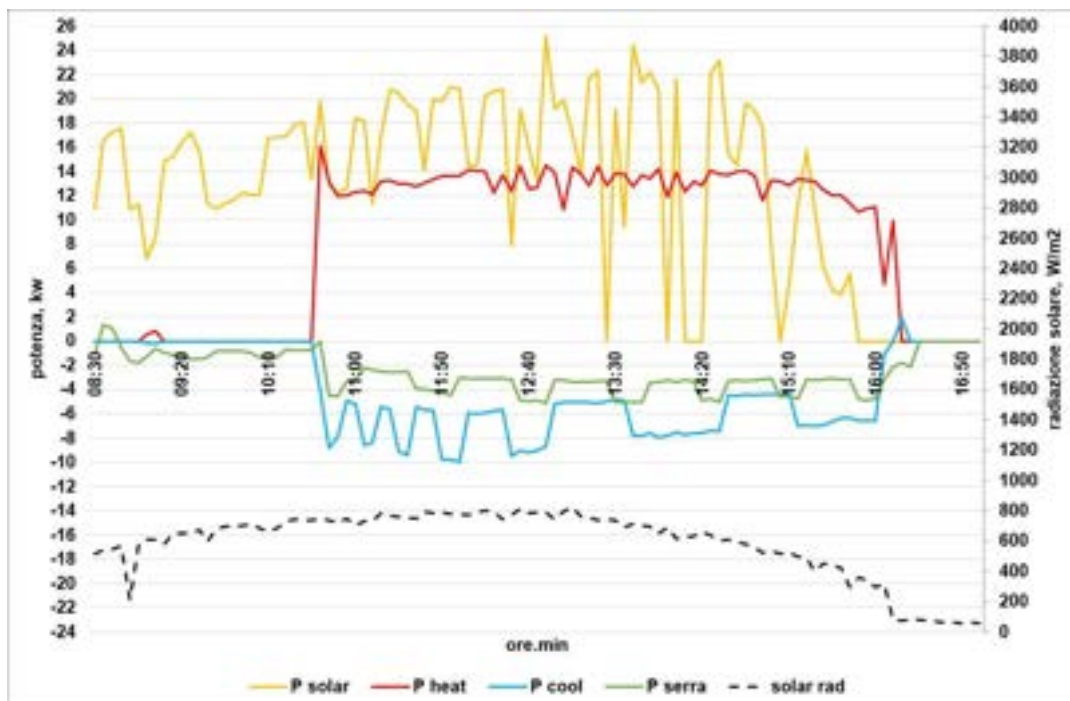


Figura 33: Andamento delle potenze trasferite nel sistema di raffreddamento in serra: potenza trasferita dal campo solare al serbatoio di accumulo caldo (P solar); potenza trasferita dal serbatoio caldo all'assorbitore (P heat); potenza trasferita dall'assorbitore al serbatoio freddo (P cool); potenza trasferita dall'accumulo freddo alla serra (P serra); radiazione solare (solar rad), asse dx; dati registrati in data 11/09/2018.

L'energia trasferita nella zona di coltivazione (P serra) ha raggiunto, nei periodi di funzionamento a regime, il valore massimo di 5 kW, quindi il sistema di trasferimento di energia di raffreddamento alle piante non ha sfruttato completamente l'energia di raffreddamento disponibile fornita dall'assorbitore (P cool), che ha registrato valori anche prossimi ai 10 kW. L'energia di raffreddamento fornita dall'assorbitore è risultata quasi sempre maggiore di quella fornita alla zona di coltivazione, indicando che la potenza del sistema di raffreddamento è tale da poter ampliare la superficie di coltivazione che utilizza il raffreddamento; questa è attualmente pari a 10 m².

La Figura 34 mostra la potenza di raffreddamento fornita a tutta la serra insieme con la potenza di raffreddamento fornita alla linea di coltivazione raffreddata con piastra e tubi e alla linea raffreddata solo con tubi. La linea con piastra e tubi fornisce una potenza leggermente più elevata in virtù della presenza delle piastre che incrementano la capacità di dissipare energia.

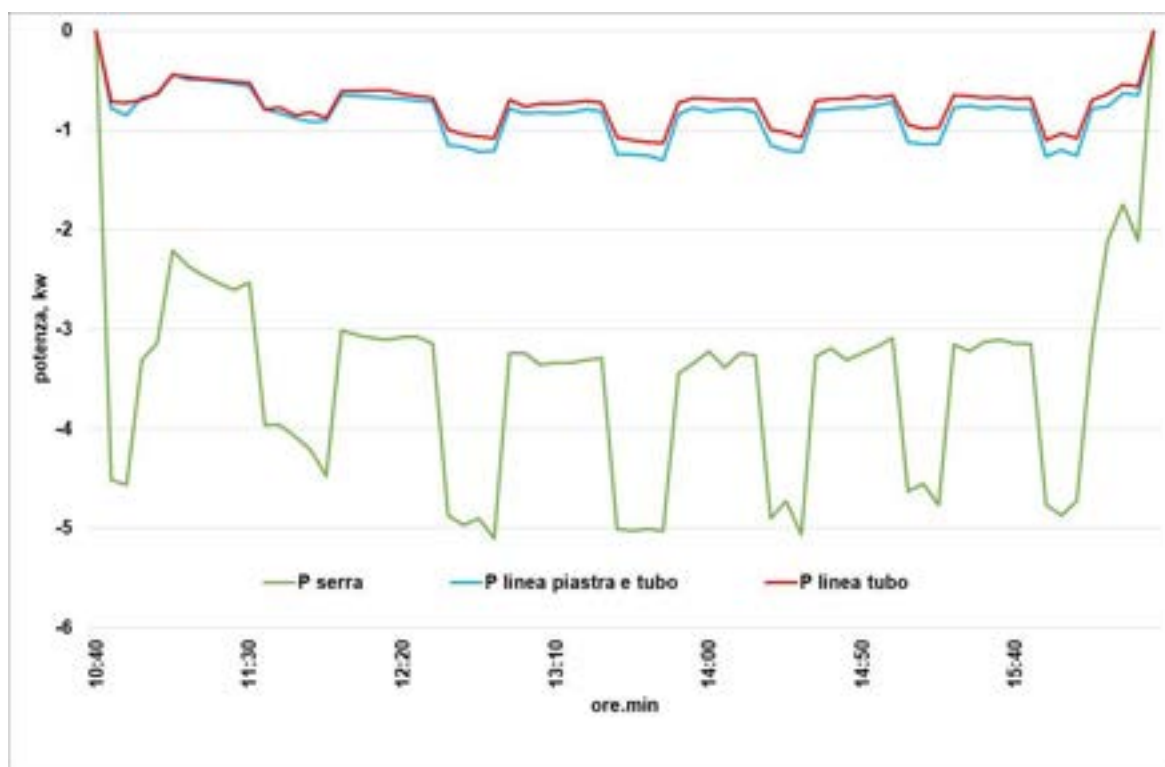


Figura 34: Potenza di raffreddamento fornita sulla linea di coltivazione raffreddata con piastra e tubi (P linea piastra e tubo) e solo con tubi (P linea tubo); potenza di raffreddamento fornita a tutta la serra (P serra).

L'applicazione del sistema di raffreddamento localizzato ha consentito di ridurre la temperatura dell'aria nella zona di coltivazione. La Figura 35 mostra l'andamento della temperatura dell'aria nelle zone di coltivazione caratterizzate dalle diverse tecniche di raffreddamento: tubi e piastre metalliche con presenza di film plastico, solo tubi, assenza di tubazione (riferimento).

La parte ombreggiata del grafico in figura 35 indica il periodo di funzionamento dell'impianto di raffreddamento. La temperatura nel caso dell'aria in prossimità dei tubi con piastra fredda e film plastico è risultata inferiore fino a 5.0 °C nei confronti della temperatura dell'aria nel caso di assenza di raffreddamento. La differenza massima nel caso di sola tubazione fredda è stata pari a 4.8 °C. Le misure effettuate a 5 cm dal sistema piastra con tubo e film plastico hanno mostrato una temperatura più bassa fino a 1.8 °C in confronto con la zona non raffreddata; tale differenza è stata pari a 1.2 °C nel caso del sistema con sola tubazione. Il confinamento dell'aria mediante film plastico ha consentito quindi di ottenere un sistema più efficace, anche se gli effetti di raffreddamento sull'aria non sono sensibili, in quanto parte del raffreddamento avviene per scambio radiativo nell'IR lungo, dove l'aria è trasparente, mentre la vegetazione è in grado di assorbire ed emettere energia radiativa con la superficie fredda. In

tal caso è consigliabile, per il confinamento dell'area di coltivazione, l'uso di film plastici termici, cioè opachi nel range di lunghezza d'onda della radiazione infrarossa, intorno alla lunghezza d'onda di 10000 nm, in modo da limitare gli scambi energetici radiativi con le superfici esterne all'area chiusa con film plastico.

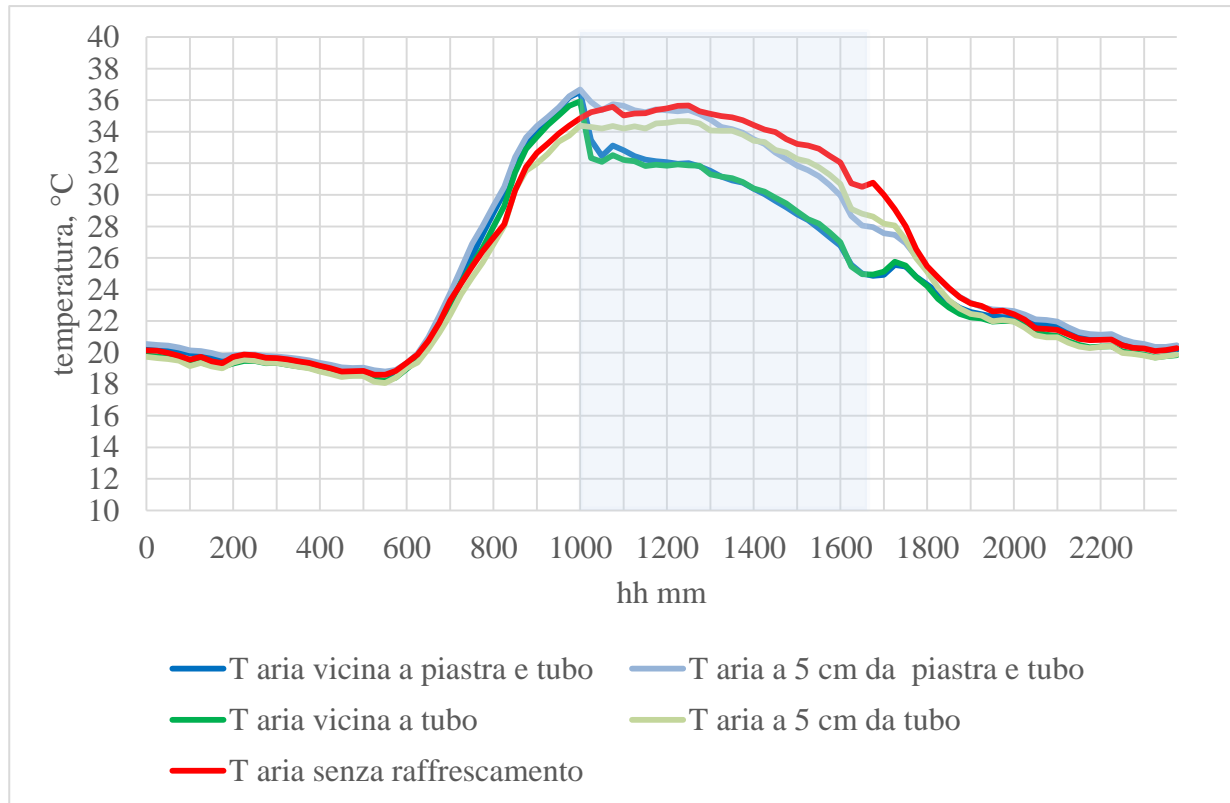


Figura 35: Temperature dell'aria rilevate nelle zone di coltivazione per le zone raffrescate con i 2 differenti sistemi di distribuzione del freddo e per la zona non raffrescata.

3.2 Il consumo di acqua

Il sistema ad assorbimento analizzato utilizza la torre evaporativa per il raffreddamento, questo comporta consumo di acqua, il che potrebbe rappresentare un fattore critico nella valutazione di questi sistemi di condizionamento. Un eccessivo consumo di acqua potrebbe entrare in competizione con l'attività agricola che necessita di questa risorsa.

La valutazione dei dati misurati ha consentito di valutare il consumo idrico per kWh di raffreddamento prodotto; nel periodo di funzionamento si sono registrati in media i seguenti valori: 6.4 litri di acqua per kWh di energia di raffreddamento prodotta dall'assorbitore, 11.5 L kWh⁻¹ relativamente all'energia apportata alla serra. Il valore più elevato del dato in serra è giustificato dal fatto che il sistema di raffreddamento in serra non è in grado di utilizzare tutta l'energia termica di raffreddamento prodotta dal sistema. Il consumo idrico del sistema ad assorbimento è attribuibile quasi esclusivamente alla torre evaporativa, essendo le altre componenti del circuito prive di perdite sostanziali di acqua.

4 Pubblicazioni

I risultati ottenuti dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari e dall'ENEA UTEE AGR sono stati presentati durante i seguenti convegni:

- GreenCities 2017 “International Symposium on greener cities for more efficient ecosystem services” che si è tenuto a Bologna, Italia, 12-15 Settembre 2017. Le comunicazioni presentate sono state: “Heat fluxes in Green Walls”, autori Vox G., Scarascia Mugnozza G., Blanco I., Schettini E., e “Green walls for building microclimate control”, autori Schettini E., Campiotti C.A., Scarascia Mugnozza G., Blanco I., Vox G.
- “13th Conference on Advanced Building Skins”, che si è tenuta a Berna, Svizzera, 1-2 Ottobre 2018. Le comunicazioni presentate sono state: “Energy Balance in Green Façades”, autori Convertino F., Vox G., Schettini E., e “Influence of green facades on building surface temperature in South Italy”, autori Blanco I., Schettini E., Vox G.
- Urban Agriculture 2018 “1st International Conference on Urban Agriculture and City Sustainability”, che si è tenuta a New Forest, Regno Unito, 9 - 11 Ottobre 2018. Le comunicazioni presentate sono state: “Effects of vertical green technology on building surface temperature”, autori Blanco I., Schettini E., Vox G., e “Heat transfer mechanisms in vertical green systems and energy balance equations”, autori Convertino F., Vox G., Schettini E., sono state oggetto di numerose domande da parte di ricercatori stranieri.

Le presentazioni sono state oggetto di numerose domande e richieste di approfondimenti da parte di ricercatori partecipanti alle Conferenze.

Gli articoli pubblicati sono stati:

1. Blanco I., Schettini E., Scarascia Mugnozza G., Vox G. (2018). Thermal behaviour of green façades in summer. *Journal of Agricultural Engineering*, 49(3), 183-190. DOI: <https://doi.org/10.4081/jae.2018.835>.
2. Vox G., Blanco I., Schettini E. (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, 129, 154-166, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>.
3. Convertino F., Vox G., Schettini E. (2018). Energy Balance in Green Façades. *Proceedings of 13th Conference on Advanced Building Skins*, 1-2 October 2018, Bern, Switzerland, 390-398. ISBN 978-3-9524883-4-8.
4. Blanco I., Schettini E., Vox G. (2018). Influence of green facades on building surface temperature in South Italy. *Proceedings of 13th Conference on Advanced Building Skins*, 1-2 October 2018, Bern, Switzerland, 368-387. ISBN 978-3-9524883-4-8.

I seguenti articoli sono in corso di pubblicazione:

1. Puglisi G., Vox G., Schettini E., Morosinotto G., Campiotti C.A. Climate control inside a greenhouse by means of a solar cooling system. *Acta Horticulturae*.
2. Schettini E., Campiotti C.A., Blanco I., Vox G. Green façades to enhance climate control inside buildings. *Acta Horticulturae*.
3. Blanco I., Schettini E., Vox G. Effects of vertical green technology on building surface temperature. *International journal of Design & Nature and Ecodynamics*.

4. Convertino F., Vox G., Schettini E. Heat transfer mechanisms in vertical green systems and energy balance equations. *International journal of Design & Nature and Ecodynamics*.
5. Vox G., Scarascia Mugnozza G., Blanco I., Schettini E. Heat fluxes in Green Walls. *Acta Horticulturae*.
6. Schettini E., Campiotti C.A., Scarascia Mugnozza G., Blanco I., Vox G. Green walls for building microclimate control. *Acta Horticulturae*.

5 Riferimenti bibliografici

Alexandri, E., & Jones, P. (2007). Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. *Building and Environment*, 42, 2835-2849. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.004>

Cameron, R.W.F., Taylor, J.E., Emmett, M.R., (2014). What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment* 73, 198-207.

Cheng, C.Y., Cheung, K.K.S., Chu, L.M. (2010). Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment*. 45, 1779-1787.

Dahanayake, K. W., & Chow, C. L. (2017). Studying the potential of energy saving through vertical greenery systems: Using EnergyPlus simulation program. *Energy and Buildings*, 138, 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.002>

Deardorff, J. (1978). Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 83 (C4), 1889-1903. <https://doi.org/10.1029/JC083iC04p01889>

Dickinson, R. E., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P. J., & Wilson, M. F. (1986). Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. National Center for Atmospheric Research, Atmospheric analysis and prediction division, Boulder, Colorado.

Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R. (2015). Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 86, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.057>

Djedjig, R., Ouldboukhite, S. E., Belarbi, R., & Bozonnet, E. (2012). Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(6), 752-761. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.03.024>

FAO (2017). *The future of food and agriculture – Trends and challenges*. Rome. ISBN 978-92-5-109551-5

Fernandez-Cañero, R., Emilsson, T., Fernandez-Barba, C., & Herrera Machuca, M. A., (2013). Green roof systems: A study of public attitudes and preferences in southern Spain. *Journal of Environmental Management* 128, 106-115.

Flores Larsen, S., Filippin, C., & Lesino, G. (2015). Modeling double skin façades with traditional thermal simulation software. *Solar Energy*, 121, 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.033>

Frankenstein, S., & Koenig, G. G. (2004a). Fast All-season Soil Strength (FASST). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold regions Research and Engineering Laboratory. ERDC/CRREL Special Report SR-04-1.

Frankenstein, S., & Koenig, G. G. (2004b). FASST Vegetation Models. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold regions Research and Engineering Laboratory. ERDC/CRREL Special Report SR-04-1.

Fumo, N., Rafe Biswas, M.A. (2015). Regression analysis for prediction of residential energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 332-343. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.035>.

Gago, E.J., Roldan, J., Pacheco-Torres, R., Ordóñez, J. (2013). The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 749-758.

He, Y., Yu, H., Ozaki, A., Dong, N., & Zheng, S. (2017). An investigation on the thermal and energy performance of living wall system in Shanghai area. *Energy and Buildings*, 140, 324-335. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.083>

Hoelscher, M.-T., Nehls, T., Janicke, B., & Wessolek, G. (2016). Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>

Holm, D. (1989). Thermal Improvement by means of Leaf Cover on External Walls - A Simulation Model. *Energy and Buildings*, 14, 19-30. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(89\)90025-X](https://doi.org/10.1016/0378-7788(89)90025-X)

Hunter, A., Williams, N. S., Rayner, J. P., Aye, L., Hes, D., & Livesley, S. J. (2014). Quantifying the thermal performance of green facades: A critical review. *Ecological Engineering*, 63, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.021>

Ip, K., Lam, M., & Miller, A. (2010). Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Building and Environment*, 45, 81-88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.003>

Jaffal, I., Ouldboukhitine, S. E., Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy* 43, 157-164.

Jim, C. Y., & He, H. (2011). Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem. *Ecological Engineering*, 37, 1112-1122. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.005>

Jim, C.Y., Tsang S.W. (2011). Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Building and Environment*, 46, 1263-1274.

Kalkstein, L.S., Davis, R.E. (1989). Weather and human mortality: An evaluation of demographic and interregional responses in the United States. *Annals of the Association of American Geographers* 79, 44-64.

Karlessi, T., Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, D., Didaskalopoulos, P., Apostolakis, K. (2011). Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat Island and cool buildings. *Building and Environment*, 46, 570-576.

Kimball, B.A. (1973). Simulation of the energy balance of a greenhouse. *Agricultural Meteorology*, 11, 243-260. [doi.org/10.1016/0002-1571\(73\)90067-8](https://doi.org/10.1016/0002-1571(73)90067-8)

Kindelan, M. (1980). Dynamic modelling of greenhouse environment. *Transaction of the ASAE*, 1232-1239. DOI: 10.13031/2013.34752

Köhler, M., Poll, P.H. (2010). Long-term performance of selected old Berlin greenroofs in comparison to younger extensive greenroofs in Berlin. *Ecological Engineering*, 36 (5), 722-729.

Kontoleon, K. J., & Eumorfopoulou, E. A. (2010). The effect of orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*, 45, 1287-1303. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.013>

Malys, L., Musy, M., & Inard, C. (2014). A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption. *Building and environment*, 73, 187-197. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.012>

Mekala, G.D., Hatton MacDonald, D. (2018). Lost in Transactions: Analysing the Institutional Arrangements Underpinning Urban Green Infrastructure. *Ecological Economics*, 147, 399-409. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.01.028>.

Monteith, J. L., & Unsworth, M. (1973). *Principles of Environmental Physics* (Fourth ed.). London: Elsevier Ltd.

Norton, B.A., Coutts, A.M., Livesley, S.J., Harris, R.J., Hunter, A.M., Williams, N.S.G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127-138.

Palomo Del Barrio, E. (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, 27, 179-193. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00029-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00029-7)

Papadakis, G., Frangoudakis, A., Kyritsis, S., 1994. Experimental Investigation and Modelling of Heat and Mass Transfer between a Tomato Crop and the Greenhouse Environment. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57(4), 217-227. doi.org/10.1006/jaer.1994.1022

Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia Mugnozza, G., Vox, G., Feuilleley, P., & Stoffers, J.A. (2000). Radiometric and Thermal Properties of, and Testing Methods for, Greenhouse Covering Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77, 7-38. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0525>

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Science*, 11, 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., Cabeza, L.F. (2014). Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 139-165.

Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J.M., Cabeza, L.F. (2011). Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy*, 88 (12), 4854-4859. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.032>.

Perini, K., Ottelè, M., Fraaij, A.L.A., Haas, E.M., Raiteri, R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46 (11), 2287-2294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>.

Petralli, M., Prokopp, A., Morabito, M., Bartolini, G., Torrigiani, T., Orlandini, S. (2006). Ruolo delle aree verdi nella mitigazione dell'isola di calore urbana: uno studio nella città di Firenze. *Rivista Italiana di Agrometeorologia* 1, 51-58 (in Italian).

Raji, B., Tenpierik, M. J., van den Dobbelsteen, A., (2015). The impact of greening systems on building energy performance: A literature review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45, 610-623.

Rowe, D.B., (2011). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution* 159, 2100-2110.

Russo, A., Escobedo, F.J., Cirella, G.T., Zerbe, S. (2017). Edible green infrastructure: An approach and review of provisioning ecosystem services and disservices in urban environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 242, 53-66, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.026>.

Saaroni, H., Amorim, J.H., Hiemstra, J.A., Pearlmutter, D. (2018). Urban Green Infrastructure as a tool for urban heat mitigation: Survey of research methodologies and findings across different climatic regions. *Urban Climate*, 24, 94-110. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.02.001>.

- Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40, 1466-1478. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001>
- Scarpa, M., Mazzali, U., & Peron, F. (2014). Modeling the energy performance of living walls: Validation against field measurements in temperate climate. *Energy and Buildings*, 79, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.014>
- Sellers, P. J., Mintz, Y., Sud, Y. C., & Dalcher, A. (1986). A Simple Biosphere Model (SiB) for Use within General Circulation Models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43(6), 505-531. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<0505:ASBMFU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<0505:ASBMFU>2.0.CO;2)
- Solecki, W.D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J.R., Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Environmental Hazards* 6 (1), 39–49.
- Stec, W. J., van Paassen, A. H., & Maziarz, A. (2005). Modelling the double skin façade with plants. *Energy and Buildings*, 37, 419-427. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.008>
- Susorova, I., Angulo, M., Bahrami, P., & Stephens, B. (2013). A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*, 67, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.027>
- Tan, C.L., Wong, N.H., Jusuf, S.K. (2014). Effects of vertical greenery on mean radiant temperature in the tropical urban environment. *Landscape Urban Plan.* 127, 52-64.
- UN (United Nations) (2015). *World Population Prospects: the 2015 Revision*. [Website] (available at <https://esa.un.org/unpd/wpp>). Accessed November 2016.
- Vox, G., Blanco, I., Campiotti, C. A., Giagnacovo, G., Schettini, E. (2015). Vertical green systems for buildings climate control. *Proceedings of the 43rd International Symposium – Actual Tasks on Agricultural Engineering*, Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, Zavod za mehanizaciju poljoprivrede. Opatija, Croatia, 723–732.
- Vox, G., Blanco, I., Fuina, S., Campiotti, C.A., Scarascia Mugnozza, G., Schettini, E. (2017). Evaluation of wall surface temperatures in green facades. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 170 (6), 334-344. <https://doi.org/10.1680/jensu.16.00019>
- Vox, G., Blanco, I., Schettini, E. (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, 129, 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>
- Wong, N. H., Tan, A. Y., Tan, P. Y., & Wong, N. C. (2009). Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings*, 41, 1401-1408. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.010>
- Yildiz, B., Bilbao J.I., Sproul, A.B. (2017). A review and analysis of regression and machine learning models on commercial building electricity load forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1104-1122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.023>.

6 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”; 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).

Il gruppo di ricerca è costituito da:

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

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

prof. ing. Giacomo Scarascia Mugnozza – Direttore del Dipartimento DISAAT, Professore Ordinario, Ingegnere Civile, esperto di strutture serricole, di materiali costruttivi, di energie rinnovabili.

ing. Ileana Blanco – Assegnista di ricerca, Ingegnere Civile, PhD in Ingegneria dei Biosistemi, esperta di impianti per la climatizzazione delle serre alimentati da energia rinnovabile, di pareti verdi e infrastrutture verdi.

Ing. Fabiana Convertino – Ingegnere Civile, Dottoranda in “Biodiversità, agricoltura e Ambiente”.

Sig. Francesco Ferrulli - Tecnico, esperto di sensoristica.