



Ricerca di Sistema elettrico

## Eco-greenroof & vertical greenery system Validazione di modelli semplificati per il bilancio energetico dei fabbricati

E. Schettini, G. Vox, G. Scarascia Mugnozza, I. Blanco

## “ECO-GREENROOF & VERTICAL GREENERY SYSTEM” - VALIDAZIONE DI MODELLI SEMPLIFICATI PER IL BILANCIO ENERGETICO DEI FABBRICATI

### DELIVERABLES:

- 1) Risultati sull'applicazione del modello energetico per la determinazione della temperatura superficiale di pareti esterne di edifici protetti con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo.
- 2) Valutazione sperimentale della temperatura del prototipo di parete in scala ricoperto con diverse essenze vegetali
- 3) Valutazione del green factor “ $k_v$ ”.
- 4) Esigenze energetiche per la gestione delle essenze vegetali su pareti di edifici in ambiente mediterraneo.

E. Schettini, G. Vox, G. Scarascia Mugnozza, I. Blanco (Università degli Studi di Bari “Aldo Moro” Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali - DISAAT)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Applicabilità di tecnologie innovative e modelli per la realizzazione di interventi di efficienza energetica sul patrimonio pubblico

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione “*Eco-greenroof & vertical greenery system*”

Responsabile scientifico ENEA: Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Università di Bari: Evelia Schettini

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
1.1 STATO DELL'ARTE.....	5
1.2 ECO-GREENROOF & VERTICAL GREENERY SYSTEM.....	8
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	9
2.1 APPLICAZIONE DEL MODELLO ENERGETICO PER LA SIMULAZIONE DEL REGIME TERMICO DELLA PARETE PROTETTA CON ESSENZE VEGETALI.....	9
2.2 PROVA IN CAMPO CON UN PROTOTIPO DI PARETE DI EDIFICIO IN SCALA RICOPERTO CON ESSENZE VEGETALI.....	15
2.3 VALUTAZIONE DEL GREEN FACTOR "K <sub>v</sub> ".....	25
2.4 DIMENSIONAMENTO DI UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CHE DEVE ALIMENTARE L'IMPIANTO DI IRRIGAZIONE DI UN EDIFICIO RICOPERTO CON LE STESSE ESSENZE VEGETALI USATE NELLA PROVA SPERIMENTALE.....	26
2.5 PUBBLICAZIONI.....	26
3 CONCLUSIONI.....	27
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	27
5 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	29

## Sommario

Le attività svolte dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari nell'ambito dell'Accordo di collaborazione "ECO-GREENROOF & VERTICAL GREENERY SYSTEM" con l'ENEA hanno riguardato attività connesse con la realizzazione di una prova sperimentale presso il centro didattico sperimentale "Martucci" dell'Università di Bari sito in Valenzano (Bari). Sono stati realizzati tre prototipi di parete di edificio in scala ricoperti due con rampicanti sempreverdi (*Pandorea jasminoides variegata* e *Rhynchospermum jasminoides*) e il terzo è stato usato come testimone. Durante il periodo estivo, mediante un sistema costituito da data logger e sensori sono stati registrati: la temperatura dell'aria esterna, la radiazione solare incidente sulla superficie verticale, la velocità e la direzione del vento, la temperatura superficiale interna ed esterna della parete e la temperatura dell'aria nel volume delimitato dietro a ogni parete. I dati ottenuti sono stati analizzati. Nelle ore calde della giornata le temperature dell'intonaco esterno registrate per la parete verticale senza alcuna copertura vegetale sono risultate maggiori di circa 4 °C rispetto alle temperature dell'intonaco esterno registrate nelle stesse ore per le pareti verticali ricoperte da *Rhynchospermum jasminoides* e *Pandorea jasminoides variegata*. L'onda termica si propaga con uno sfasamento di circa 2 ore all'interno dei volumi considerati. I risultati ottenuti in campo sono stati utilizzati: nel modello energetico del microclima all'interno di un edificio ricoperto con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo; per la valutazione del Green Factor "K<sub>v</sub>" per descrivere il comportamento schermante delle due diverse essenze vegetali utilizzate nella prova sperimentale; per il dimensionamento di un sistema fotovoltaico che deve alimentare l'impianto di irrigazione di un edificio ricoperto con le stesse essenze vegetali usate nella prova sperimentale. Le attività svolte hanno consentito di elaborare tre pubblicazioni. Essendo stata condotta la prova sperimentale nel periodo estivo, i risultati presentati riguardano solo il periodo caldo. La ricerca potrà proseguire continuando a monitorare la prova sperimentale anche nel periodo autunnale, invernale e primaverile. Il modello energetico sarà verificato e applicato nelle diverse condizioni climatiche esterne, temperatura dell'aria e radiazione solare. Il modello, una volta testato sia per i periodi caldi che per i periodi freddi, potrà servire per scegliere le essenze vegetali, i materiali e gli impianti da utilizzare per la progettazione di un edificio ricoperto con essenze vegetali, rispettando le esigenze di confort termico per le persone che usufruiscono dell'edificio.

# 1 Introduzione

## 1.1 Stato dell'arte

I centri urbani delle grandi città sono caratterizzati da temperature dell'aria esterna maggiori rispetto a quelle registrate nelle zone periferiche, suburbane e rurali circostanti, e tale differenza può essere anche pari a 5 -6 ° C (Rowe, 2011; Kanechi, et al, 2014; Karlessi et al., 2009; Karlessi et al., 2011; Berdahl e Bretz, 1997; Bretz e Akbari, 1997; Bretz et al., 1998; Gentle et al, 2011; Gladis e Schumann, 2011; Jo et al., 2010; Joudi et al., 2013; Li et al., 2013; Prado e Ferreira, 2005; Synnefa et al., 2006; Uemoto et al., 2010; Zinzi et al., 2012). Il fenomeno del riscaldamento urbano, conosciuto con il nome di "isola di calore urbana" ("Urban Heat Island", UHI), è connesso principalmente all'utilizzo di materiali da costruzione che sono caratterizzati dall'essere resistenti all'acqua e non riflettenti alla radiazione solare; questi materiali, dunque, assorbono un'elevata percentuale di radiazione solare incidente e la rilasciano successivamente sotto forma di calore. Altre cause del riscaldamento urbano possono essere: la diminuzione delle aree verdi urbane, con la conseguente mancanza di zone di ombra, riduzione della possibilità di intercettare la radiazione solare da parte delle piante e di abbassare la temperatura dell'aria grazie all'evapotraspirazione delle piante; la diminuzione dell'emissione della radiazione infrarossa nell'atmosfera; l'inquinamento atmosferico; la ridotta circolazione dell'aria nei canyon urbani; la velocità e la direzione del vento; la produzione di calore da parte dei sistemi di raffrescamento, dei processi industriali e del traffico motorizzato urbano (Santamouris, 2012).

Il fenomeno del riscaldamento urbano ha influenze negative sulle condizioni di comfort esterno, sulla concentrazione di agenti inquinanti come polveri sottili e anidride carbonica, inducendo un maggiore utilizzo dei sistemi di condizionamento dell'aria degli edifici con un notevole aumento dei consumi di energia per il raffrescamento e un aumento della domanda dell'energia elettrica di picco (Karlessi et al, 2009; Karlessi et al, 2011; Jaffal et al., 2012). Il fenomeno del riscaldamento urbano è, inoltre, particolarmente dannoso per la salute di persone malate, di anziani e di bambini, in quanto nel periodo estivo, quando le temperature dell'aria in città sono costantemente elevate nel corso delle 24 ore, l'organismo umano non riesce a riprendersi di notte dalle condizioni di calore estremo a cui è stato sottoposto durante il giorno (Kalkstein e Davis, 1989; Petralli et al., 2006).

La tecnica di disporre della vegetazione sui tetti e sulle facciate degli edifici al fine di ridurre i consumi energetici per il condizionamento nel periodo estivo e di aumentare l'isolamento termico nel periodo invernale è una tecnologia sostenibile per migliorare l'efficienza energetica degli edifici (Cheng et al, 2010; Jim e Tsang, 2011; Köhler e Poll, 2010; Perini et al, 2011; Pérez et al, 2011; Berardi et al, 2014; Fernandez-Canero et al, 2013; Santamouris, 2012). I tetti e i sistemi verticali verdi sono dei sistemi di risparmio energetico passivi in quanto la vegetazione intercetta la radiazione solare incidente e mitiga l'effetto del vento sugli edifici; inoltre, la presenza della vegetazione e del substrato di coltivazione garantisce l'isolamento termico, e il processo di evapotraspirazione delle piante e del substrato favorisce il raffreddamento per evaporazione (Perez et al., 2011). Attualmente nel mondo sono presenti circa 234 ettari di tetti e pareti verdi; mentre in Italia ci sono circa 1000 m<sup>2</sup> di tetti verdi, in Germania ce ne sono circa 13,5 km<sup>2</sup>, pari al 14% di tutte le coperture urbane piane (Castleton et al., 2010). Nelle regioni del Mediterraneo, caratterizzate sia da estati calde sia dalla scarsità di acqua, la diffusione della suddetta tecnologia "verde" è purtroppo limitata a causa della mancanza di conoscenza dei suoi benefici e specifiche caratteristiche, e anche per la mancanza di incentivi statali (Fernandez-Cañero et al., 2013).

La realizzazione di tetti e pareti verdi offre numerosi benefici a livello del tetto e/o parete, dell'edificio, e della zona urbana circostante, oltre ai benefici sociali, ambientali ed estetici. I benefici variano in funzione delle condizioni climatiche dell'area dove è localizzato l'edificio, della tecnologia verde utilizzata, delle caratteristiche costruttive dell'edificio e del contesto urbano (Fioretti et al, 2010; Castleton et al, 2010; Wong et al, 2003; Perini et al, 2011; Wong et al, 2010; Berardi et al., 2014; Santamouris, 2012; Benvenuti, 2014; Rowe, 2011; Kohler, 2008; Francis e Lorimer, 2011; Fernandez-Canero et al, 2013). I benefici su elementi di chiusura orizzontali e verticali come piani di copertura/ pareti sono: prolungamento della vita utile della copertura/parete, riduzione del quantitativo di radiazione solare assorbita dalla

copertura/parete, isolamento termico, riduzione del rumore. I benefici sull'edificio dovuti alla presenza dei tetti/pareti verdi sono: riduzione dei consumi energetici, miglioramento del comfort interno dovuto a una riduzione della temperatura superficiale e all'attenuazione delle fluttuazioni di temperatura, riduzione del carico termico, miglioramento del comfort acustico, aumento del valore della proprietà. I benefici nell'ambito di una scala più ampia sono: riduzione a livello globale del consumo energetico per raffrescamento estivo e riscaldamento invernale; riduzione del fenomeno del riscaldamento urbano; miglioramento della gestione delle acque piovane e della qualità dell'acqua piovana di deflusso; mitigazione dell'inquinamento atmosferico con un conseguente miglioramento della qualità dell'aria urbana grazie alla riduzione delle particelle sospese nell'aria, a una riduzione delle polveri sottili e dei metalli pesanti presenti nell'aria; incremento dell'assorbimento acustico (isolamento acustico e assorbimento del rumore) da parte dei sistemi edilizi. Inoltre la presenza di tetti e pareti verdi può contribuire al mantenimento della biodiversità in ambito urbano, ricreando l'habitat ideale per piante spontanee, ragni, scarafaggi, formiche, api e uccelli e così via (Fernandez-Cañero et al., 2013).

I tetti verdi possono avere una vita utile anche superiore ai 50 anni (Berardi et al, 2014; Getter et al, 2009; Rowe, 2011), in quanto il substrato di coltivazione e le piante proteggono i tetti dalle radiazioni ultraviolette e dalle escursioni termiche (Rowe, 2011). Il verde sistemato lungo le pareti verticali può creare danni ai muri, ma, allo stesso tempo, protegge le finiture esterne e le murature dalla radiazione ultravioletta, dalla pioggia, dalle escursioni termiche e dalla presenza di umidità.

Il posizionamento di vegetazione sui tetti e sulle facciate degli edifici consente di incrementare l'isolamento termico globale, mantenendo l'edificio fresco durante la stagione calda e caldo durante la stagione fredda, con conseguente risparmio energetico per la climatizzazione interna (Fernandez-Canero et al, 2013; Berardi et al, 2014; Santamouris, 2012; Benvenuti, 2014; Kanechi, et al, 2014; Blanusa et al, 2013). Il contributo dell'isolamento termico fornito dalla presenza di verde è inversamente proporzionale alle capacità isolanti intrinseche dell'edificio: il verde contribuisce a migliorare maggiormente l'isolamento termico di edifici con scarse capacità isolanti rispetto a quelli maggiormente performanti (Berardi et al, 2014; Santamouris, 2012; Blanusa et al, 2013). La riduzione del carico annuo di energia è variabile dall'1% al 40% (Santamouris, 2012). I tetti verdi ed i giardini verticali contribuiscono a mitigare il problema dei picchi di flusso dell'acqua piovana, assorbendo parte dell'acqua piovana e rallentando il deflusso al fine di aiutare l'acqua piovana a fluire verso i canali di scolo (Kohler e Poll, 2010; Cameron et al, 2012; Rowe, 2011). La vegetazione intercetta le precipitazioni intense trattenendo nella chioma parte dell'acqua piovana: l'acqua trattenuta nel substrato evaporerà o sarà ceduta di nuovo nell'atmosfera (Rowe, 2011; IGRA, 2014). Il deflusso delle acque viene ridotto dal 50% al 100% in funzione del tipo di tetto o parete verde utilizzata, della specie vegetale, della pendenza, della composizione del substrato e della profondità del substrato, dell'intensità e della durata della pioggia (Rowe, 2011; IGRA, 2014). La qualità delle acque piovane di deflusso può essere influenzata positivamente dalla presenza del verde su tetti e facciate degli edifici in quanto il substrato di coltivazione può assorbire e filtrare le sostanze inquinanti trasportate dalle acque piovane; la qualità dell'acqua di deflusso sarà funzione della composizione e della profondità del substrato, del tipo di pianta utilizzata, delle caratteristiche costruttive e impiantistiche del tetto e/o parete, delle operazioni colturali eseguite (concimazione, fertirrigazione, ecc), dell'intensità della pioggia, delle fonti di inquinamento della zona, e delle proprietà fisiche e chimiche degli inquinanti (Rowe, 2011).

La protezione degli edifici con essenze vegetali può ridurre l'inquinamento atmosferico, sia direttamente che indirettamente (Berardi et al, 2014; Fernandez-Canero et al, 2013; Rowe, 2011). Una riduzione delle temperature superficiali delle pareti degli edifici contribuirà a una riduzione del consumo energetico dell'edificio e, dunque, si avrà una riduzione del fenomeno dell'isola di calore urbana con indirettamente una riduzione dell'inquinamento atmosferico (Berardi et al, 2014; Rowe, 2011). Le piante utilizzate per i tetti e per le pareti verdi agiscono come biofiltri: assorbono alcuni contaminanti, rimuovono le sostanze inquinanti e trattengono particelle sospese nell'aria (Fernandez-Cañero et al., 2013). Le piante assorbono maggiori quantitativi di inquinanti quando si trovano in fase di crescita rispetto al periodo di riposo vegetativo (Rowe, 2011). Un metro quadrato di verde è in grado di assorbire le emissioni di particolato di una vettura emesse durante un anno (Rowe, 2011).

La protezione degli edifici con piante sui tetti e/o lungo le pareti verticali può contribuire anche all'isolamento acustico e all'assorbimento del rumore (Berardi et al, 2014; Rowe, 2011), riducendo la riflessione del suono fino a 3 dB e migliorando l'isolamento acustico fino a 8 dB (IGRA, 2014).

La progettazione di tetti e pareti verdi dipende dalle caratteristiche degli edifici e delle condizioni climatiche della zona.

I tetti verdi sono generalmente classificati in tetti verdi intensivi, semi-intensivi ed estensivi; tale classificazione dipende dal tipo di vegetazione, dallo spessore del substrato di coltivazione, dalla capacità massima di carico del piano di copertura, dall'uso del piano di copertura, dal tipo di impianto di irrigazione utilizzato, e dai costi iniziali e di gestione richiesti (Fioretti et al., 2010; Castleton et al., 2010; Spala et al., 2008; Berardi et al., 2014; Fernandez-Canero et al., 2013; Santamouris, 2012; IGRA, 2014).

I tetti verdi intensivi sono realizzati con piccoli alberi, arbusti e piante, caratterizzati da un substrato di coltivazione avente una profondità superiore a 15 cm (fino anche 1 m) e richiedono costi relativamente elevati sia d'installazione sia di gestione (Rowe, 2011). I tetti verdi intensivi necessitano di elementi portanti capaci di sopportare il loro peso elevato (200-500 kg / m<sup>2</sup>) (Fernandez-Canero et al., 2013); sistemi di drenaggio e di irrigazione devono essere realizzati e tali tetti spesso sono utilizzati anche come spazi verdi ricreativi.

I tetti verdi estensivi, realizzati utilizzando graminacee, erbacee perenni e annuali, e piante tolleranti alla siccità, sono caratterizzati da un substrato di coltivazione di spessore fino a un massimo di 20 cm, e da un peso contenuto fino a 150 kg/m<sup>2</sup> (Fernandez-Canero et al., 2013; Rowe, 2011); questi tetti richiedono un basso livello di manutenzione, bassi costi iniziali, nessun sistema di irrigazione e bassi costi di gestione. I tetti verdi estensivi sono adatti per le coperture di grandi dimensioni e per le coperture che richiedono un sistema semplice, senza impianti di irrigazione e con vegetazione adattabile alle condizioni climatiche del luogo, con una elevata capacità di resistere a periodi di siccità, in grado di rigenerarsi ed auto propagarsi in maniera rapida e autosufficiente, tale da non richiedere interventi manutentivi frequenti.

Le coperture verdi semi-intensive si compongono di piante succulente combinate con piccoli arbusti e piante aromatiche, con uno spessore del substrato che varia tra 15 e 30 cm (IGRA, 2014). Normalmente per questi inverdimenti è consigliabile una manutenzione saltuaria. I carichi sulla copertura dipendono dallo spessore del substrato e devono essere considerati in fase di calcolo statico.

I tetti verdi sono generalmente progettati come strutture a strati: le piante, il substrato di coltivazione, uno strato drenante, una membrana filtrante, un telo antiradice e uno strato di impermeabilizzazione (Fioretti et al, 2010; Spala et al, 2008; Berardi et al, 2014; Kanechi et al, 2013; Rowe, 2011). Una membrana impermeabilizzante è sempre posizionata sul solaio per ostacolare l'ingresso dell'umidità all'interno dell'edificio (Fioretti et al, 2010; Spala et al, 2008). Sopra questa membrana è posizionato un telo antiradice in modo da proteggere da eventuali danni delle radici la struttura della copertura e la membrana impermeabilizzante (Fioretti et al., 2010). Uno strato di drenaggio, realizzato con materiali leggeri come argilla espansa, sassi, ghiaia, lava, ecc, viene collocato al fine di evitare ristagni di acqua con conseguenti fenomeni di marcescenza degli apparati radicali (IGRA, 2014). Un tessuto, preferibilmente realizzato in geotessile, viene generalmente installato per impedire il passaggio delle parti fini del substrato di coltivazione agli strati sottostanti al fine di ostacolare il fenomeno del dilavamento del terreno (Fioretti et al., 2010). Il substrato di coltivazione, esente da semi ed erbe infestanti, è scelto in modo da essere caratterizzato da: buone proprietà fisico-chimiche, per consentire la crescita delle piante; elevate capacità di ritenzione idrica; leggerezza, per ridurre i sovraccarichi sulle coperture dell'edificio (Kanechi et al., 2013). Il substrato di coltivazione può essere realizzato con lava, pomice, argilla espansa, ecc (IGRA, 2014). Le specie vegetali, scelte in base al clima e alla esposizione, possono essere piantate direttamente con semi, talee o piante; un sistema di irrigazione può essere posizionato all'interno o sopra il substrato di coltivazione (Berardi et al., 2014).

I sistemi di inverdimento verticale per gli edifici sono classificati come facciate verdi (green façade) e living wall (Perez et al, 2011; Perini et al, 2011; Francis e Lorimer, 2011; Jim e He, 2011; Kontoleon e Eumorfopoulou, 2010); anche i sistemi verticali verdi, come i tetti verdi, possono essere intensivi, semi-intensivi ed estensivi (Perez et al., 2011).

Le facciate verdi sono generalmente realizzate utilizzando piante rampicanti, che possono essere radicate nel terreno alla base della costruzione o disposte in vasi situati a diverse altezze della facciata; il verde cresce direttamente sulle pareti o su strutture di sostegno (Perez et al., 2011; Francis e Lorimer, 2011; Kontoleon e Eumorfopoulou, 2010). I limiti di questa tecnologia sono lo spazio limitato a livello del suolo e il potenziale di crescita verticale delle piante; l'altezza massima della maggior parte delle piante rampicanti è 20 m (Kohler, 2008). La crescita delle piante rampicanti direttamente sulle pareti può danneggiare i muri o creare un ostacolo durante la ristrutturazione edilizia (Kontoleon e Eumorfopoulou, 2010). Una soluzione tecnologica a questo problema può essere l'uso di grigliati metallici, reti, tralicci modulari, da utilizzare come elementi di supporto per le piante rampicanti (Perez et al, 2011; Kontoleon e Eumorfopoulou, 2010). Questi elementi di supporto possono essere montati direttamente sulla parete verticale o su strutture indipendenti con supporti multipli che permettono il mantenimento e l'integrità della costruzione (Perez et al, 2011; Kontoleon e Eumorfopoulou, 2010).

I living wall sono realizzati con pannelli modulari, talvolta precoltivati, che sono fissati ad un supporto verticale o sulla struttura muraria; ogni pannello contiene il substrato di coltivazione (Perez et al, 2011; Perini et al, 2011; Francis e Lorimer, 2011; Kontoleon e Eumorfopoulou, 2010). Ogni pannello è modulare e può essere unito ad altri per rivestire superfici parietali molto estese. L'ancoraggio alla facciata avviene fissando al muro tramite viti una serie di bande metalliche disposte in successione, in modo poi che ogni modulo possa essere fissato ad esse per mezzo di viti lungo i suoi lati superiori ed inferiori. Ciascun pannello consente una facile circolazione del flusso dell'acqua al suo interno senza trasportare via il terriccio di coltivazione.

## 1.2 Eco-greenroof & vertical greenery system

Nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione tra ENEA e Università di degli Studi di Bari Aldo Moro – Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT) dal titolo "Eco-greenroof & vertical greenery system", il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha svolto una serie di attività di ricerca nel periodo Ottobre 2013- Settembre 2014 con l'obiettivo di incrementare l'efficienza energetica di edifici ricoperti con essenze vegetali con particolare riguardo alla "sostenibilità" dell'edificio in ambiente mediterraneo. La ricerca svolta ha avuto come obiettivo la progettazione di edifici ricoperti con essenze vegetali che assicurino un microclima ideale all'interno e che consentano di contenere i costi energetici in ambiente climatico mediterraneo.

Una metodologia di studio preliminare per valutare l'efficacia dell'applicazione di tetti e/o pareti verdi per il condizionamento climatico di un edificio richiede necessariamente l'uso di un modello previsionale del microclima interno dell'edificio in funzione delle condizioni climatiche della zona e delle caratteristiche fisiche della parete verde e dell'edificio. Il modello, implementato nel corso del PAR 2012, è stato utilizzato nel corso del PAR 2013 come descritto nel paragrafo 2.1. Il modello energetico è stato sviluppato in ambiente numerico considerando i dati rilevati durante la prova sperimentale condotta in campo e descritta nel Paragrafo 2.2. Il modello energetico è stato sviluppato in ambiente Fortran, il sistema di equazioni non lineari è stato risolto utilizzando routines IMSL. I dati calcolati sono stati confrontati con i dati misurati. Il modello è un utile strumento per prevedere l'andamento termico in funzione delle condizioni climatiche del sito, temperatura dell'aria esterna, radiazione incidente sulla parete verde, velocità del vento. Il modello può essere utilizzato per scegliere le essenze vegetali, i materiali e gli impianti da utilizzare per la progettazione di un edificio ricoperto con essenze vegetali, rispettando le esigenze di confort termico all'interno dell'edificio.

L'efficacia di una parete verde sul microclima all'interno di un edificio posizionato in una zona caratterizzata da clima mediterraneo richiede preventivi test sperimentali al fine di misurare i principali parametri climatici e di temperatura quali la temperatura dell'aria esterna, la radiazione solare incidente sulla superficie esterna, la velocità del vento, la temperatura superficiale interna ed esterna della parete. Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha realizzato una prova sperimentale presso il centro didattico sperimentale "Martucci" dell'Università di Bari sita in Valenzano e descritta nel Paragrafo 2.2.

Un fattore utile per descrivere il comportamento schermante delle diverse specie vegetali utilizzate sui tetti e sulle facciate degli edifici è il Green Factor  $K_v$  (Campiotti et al., 2011), quindi la valutazione dell'efficacia di

una parete verde richiede la determinazione di tale valore (Paragrafo 2.3) utilizzando i dati ottenuti dalla prova sperimentale.

Un sistema sostenibile, quale quello proposto, richiede la necessaria integrazione con sistemi di alimentazione energetica generati da fonti energetiche rinnovabili; i consumi energetici sono imputabili essenzialmente alla gestione dell'impianto di irrigazione delle essenze vegetali. Nel Paragrafo 2.4 sono state definite le esigenze energetiche per tali impianti con un corretto dimensionamento dei loro impianti di alimentazione energetica da fonti rinnovabili.

La ricerca è stata finalizzata all'incremento dell'efficienza energetica degli edifici ricoperti con essenze vegetali con particolare riguardo alla "sostenibilità" dell'edificio in ambiente mediterraneo.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Le attività svolte dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari hanno riguardato:

- 1) l'applicazione del modello energetico per la simulazione del regime termico della parete protetta con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo (Paragrafo 2.1, Deliverable: *"Risultati sull'applicazione del modello energetico per la determinazione della temperatura superficiale di pareti esterne di edifici protetti con essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo"*);
- 2) la realizzazione di una prova sperimentale in campo su un prototipo di parete di edificio in scala ricoperto con due diverse essenze vegetali durante il periodo estivo (paragrafo 2.2, Deliverable: *"Valutazione sperimentale della temperatura del prototipo di parete in scala ricoperto con diverse essenze vegetali"*);
- 3) la valutazione del Green Factor " $K_v$ " (paragrafo 2.3, Deliverable: *"Valutazione del green factor " $K_v$ "*");
- 4) il dimensionamento di un sistema fotovoltaico che deve alimentare l'impianto di irrigazione di un edificio ricoperto con le stesse essenze vegetali usate nella prova sperimentale (paragrafo 2.4, Deliverable: *"Esigenze energetiche per la gestione delle essenze vegetali su pareti di edifici in ambiente mediterraneo"*).

Le attività svolte hanno consentito di elaborare tre pubblicazioni (paragrafo 2.5).

### 2.1 Applicazione del modello energetico per la simulazione del regime termico della parete protetta con essenze vegetali

Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha applicato il modello energetico di simulazione del regime termico sviluppato per edifici con superfici esterne protette con pareti verdi. In particolare il modello è stato applicato al caso dei prototipi, sviluppati nel progetto e descritti nel successivo Paragrafo 2.2, utilizzati per lo studio sperimentale degli effetti delle pareti verdi sul regime termico dell'edificio.

I processi di scambio energetico che si instaurano sono stati interpretati analiticamente mediante la formulazione di un modello di simulazione del regime termico. Il sistema alla base dei processi di scambio energetico considera diversi strati: aria esterna, vegetazione (GRF), aria compresa nell'intercapedine tra GRF e parete esterna dell'edificio, superficie esterna della parete dell'edificio, parete dell'edificio, superficie interna della parete, aria interna all'edificio. Nell'ambito di tali strati si attivano processi di trasmissione del calore di tipo radiativo, dovuti sia alla radiazione solare sia alla radiazione nell'IR lungo emessa e ricevuta dalle superfici, di tipo convettivo, tra GRF ed aria e tra superfici dell'edificio ed aria, e di tipo conduttivo nelle pareti.

L'applicazione del modello ha consentito di determinare il regime termico della superficie sottoposta a radiazione solare e protetta con parete verde; le proprietà radiometriche delle superfici, le caratteristiche fisiche dei materiali e della vegetazione e i parametri climatici del sito, cioè il valore della radiazione solare incidente, della temperatura dell'aria e della velocità del vento sono stati assunti nel modello come valori noti.

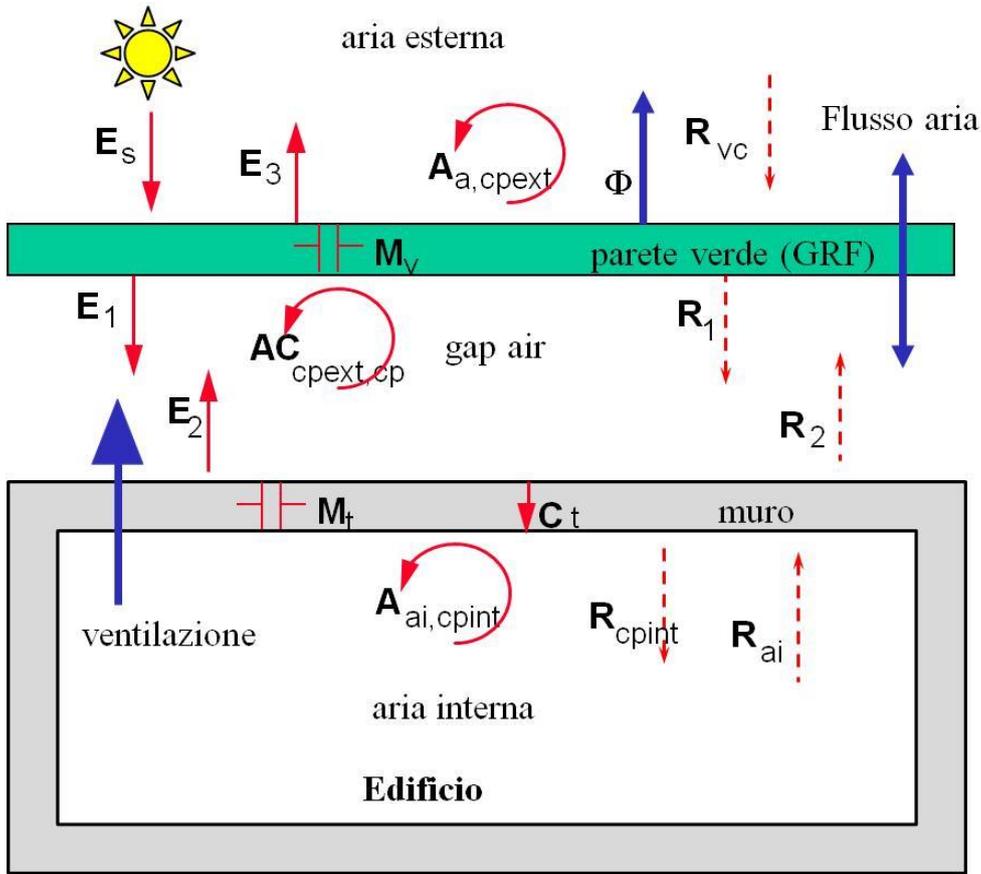


Figura 2.1.1: Flussi energetici che si instaurano nel sistema parete verde - edificio.

La rappresentazione del sistema fisico è stata realizzata per mezzo di un modello dinamico e monodimensionale (Bianchi e Scarascia Mugnozza, 1996). In Figura 2.1.1. sono evidenziati i flussi energetici che si considerano nel modello, assumendo positivi i flussi energetici in ingresso; i termini presenti nella figura sono spiegati in Tabella 2.1.1. Le equazioni di bilancio energetico, cui si aggiungono le equazioni per la rappresentazione del regime termico nella muratura, sono:

GRF (nella formula indicato con "cpext"):

$$E_s + E_2 - E_3 - E_1 + A_{a, cpext} - AC_{cpext, cp} + \varepsilon_{cpext} (R_{vc} + R_2) - 2\varepsilon_{cpext} \sigma T_{cpext}^4 - \Phi + M_v = 0 \quad (1)$$

superficie esterna muratura:

$$E_1 - E_2 + AC_{cpext, cp} + \varepsilon_{cp} R_1 - \varepsilon_{cp} \sigma T_{cp}^4 + C_t - M_t = 0 \quad (2)$$

superficie interna muratura:

$$\varepsilon_{cp} R_{ai} - \varepsilon_{cp, int} \sigma T_{cp, int}^4 + A_{ai, cpint} = 0 \quad (3)$$

aria interna:

$$A_{ai, cpint} - KT(T_{ai, ext} - T_{ai}) - H_{vent} = 0 \quad (4)$$

Tabella 2.1.1: Lista dei simboli relative alla Figura 2.1.1.

<b>A</b> = trasmissione di calore per convezione [W/m <sup>2</sup> ]	<b>T</b> = temperatura [K]
<b>AC</b> = trasmissione di calore per conduzione-convezione [W/m <sup>2</sup> ]	<b>t</b> = tempo [s]
<b>C</b> = trasmissione di calore per conduzione [W/m <sup>2</sup> ]	<b>v</b> = velocità del vento [m/s]
<b>Φ</b> = scambio di calore per evapotraspirazione [W/m <sup>2</sup> ]	<b>clv</b> = calore latente di evaporazione [J/Kg]
<b>Cp</b> = capacità termica massica [J/Kg K]	<b>z</b> = spazio discreto nel muro [m]
<b>D</b> = diffusività termica [m <sup>2</sup> /s]	<b>β'</b> = coeff. Volumetrico di espansione aria <b>β'</b> = 1/T [1/K]
<b>E</b> = radiazione nel solare (0.3-3μm) [W/m <sup>2</sup> ]	<b>ε</b> = emissività [%]
<b>g</b> = costante gravitazionale <b>g</b> = 9.8 [m/s <sup>2</sup> ]	<b>γ</b> = angolo di inclinazione materiali di copertura rispetto al piano orizzontale = 0°
<b>Hvent</b> = energia asportata per ventilazione [W/m <sup>2</sup> ]	<b>LAI</b> = indice di area fogliare
<b>h</b> = coefficiente convettivo [W/m <sup>2</sup> K]	<b>λ</b> = conduttività termica [W/m K]
<b>KT</b> = coefficiente globale di trasm. [W/m <sup>2</sup> K]	<b>ν</b> = viscosità cinematica [m <sup>2</sup> /s]
<b>L</b> = distanza [m]	<b>ρ</b> = coefficiente di riflessione [%]
<b>M</b> = capacità di accumulo termico [W/m <sup>2</sup> ]	<b>pd</b> = massa volumica [Kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Nu</b> = numero di Nusselt	<b>σ</b> = costante di Stefan-Boltzmann <b>σ</b> = 5.6697x10 <sup>-8</sup> [W/m <sup>2</sup> k <sup>4</sup> ]
<b>R</b> = flusso di energia radiante nell'IR lungo (>3μm) [W/m <sup>2</sup> ]	<b>τ</b> = coefficiente di trasmissione [%]
<b>Ra</b> = numero di Rayleigh	
<b>Pedici</b>	
<b>a</b> = aria	<b>Δ</b> =intercapedine
<b>cp</b> = superficie esterna muro	<b>j</b> = contatore passo temporale Δt
<b>cpint</b> = superficie interna muro	<b>k</b> = contatore passo spaziale Δz
<b>cpext</b> = parete verde o GRF	<b>r</b> = banda dell'infrarosso lungo (>3μm)
<b>ext</b> = esterno	<b>s</b> = banda della radiazione solare (0.3-3μm)
<b>i</b> = interno	<b>t</b> =muro
<b>int</b> = interno	<b>vc</b> = volta celeste

Le equazioni relative ai flussi termici radiativi che interessano il GRF ed la superficie esterna della parete verticale nelle incognite rappresentate dai flussi termici  $R_1$  ed  $R_2$  sono :

$$R_1 = \varepsilon_{cpext} \sigma T_{cpext}^4 + \tau_{r,cpext} R_{vc} + \rho_{r,cpext} R_2 \quad (5)$$

$$R_2 = \varepsilon_{cp} \sigma T_{cp}^4 + \rho_{r,cp} R_1 \quad (6)$$

dove il significato dei termini è esplicitato nella Tabella 2.1.1 e i termini sono valutati tramite le seguenti relazioni:

$$A_{a,cpext} = h_{ext} (T_{a,ext} - T_{cpext}) \left[ \text{W/m}^2 \right]; \quad h_{ext} = 7.2 + 3.8v \left[ \text{W/m}^2 \text{K} \right]$$

$$AC_{cpext,cp} = h_{\Delta} (T_{cpext} - T_{cp}) \left[ \text{W/m}^2 \right]; \quad h_{\Delta} = Nu \frac{\lambda_a}{L_{cp,cpext}} \left[ \text{W/m}^2 \text{K} \right]$$

$$A_{cp,ai} = h_i \rho d_a C p_a (T_{cp} - T_{ai}) \left[ \text{W/m}^2 \right]; \quad h_i = 0.004 |T_{cp} - T_t|^{\frac{1}{3}} \left[ \text{m/s} \right]$$

$$C_t = \frac{\lambda_t (T_{t,k=0} - T_{t,k=1})}{\Delta z} \left[ \text{W/m}^2 \right]; \quad M_t = \rho d_t C p_t \Delta z \frac{(T_{t,k=0,j} - T_{t,k=0,(j-1)})}{\Delta t} \left[ \text{W/m}^2 \right]$$

$$R_{vc} = \sigma T_{vc}^4 \left[ \text{W/m}^2 \right]; \quad T_{vc} = 0.0552 \times T_{a,ext}^{\frac{3}{2}} \text{ in presenza di cielo sereno } \left[ \text{K} \right]$$

$$T_{vc} = T_{a,ext} \text{ in presenza di cielo coperto } \left[ \text{K} \right]$$

$$\Phi = 2S_v \text{clv} \rho_{ai} \text{LAI} \frac{\omega_{sv} - \omega_{ai}}{\nu_v + \mu_v} \left[ \text{W/m}^2 \right]; \quad M_v = \rho_v c p_v \text{vol}_v \frac{(T_{v(j-1)t} - T_{v(j)t})}{\Delta t} \left[ \text{W/m}^2 \right]$$

$$\text{clv} = 3.16 \times 10^6 - 2.41 \times 10^3 T_{ai} \left[ \text{J/kg} \right]$$

$$P_s = P_s(T) = 610.78 e^{\frac{17.269(T-273.161)}{T-35.86}}$$

$$\omega_s = 0.622 \frac{P_s}{1013 - P_s}$$

Il termine  $h_{\Delta}$ , relativo allo scambio termico conduttivo-convettivo che si instaura fra GRF e superficie dell'edificio, è espresso mediante i numeri di Nusselt e Rayleigh (Duffie e Beckman, 1991):

$$Nu = 1 + 1.44 \left[ 1 - \frac{1708(\text{sen } 1.8\gamma)^{1.6}}{Ra \cos \gamma} \right] \left[ 1 - \frac{1708}{Ra \cos \gamma} \right]^+ + \left[ \left( \frac{Ra \cos \gamma}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+$$

$$Ra = \frac{g\beta' L_{cp,cpext}^3 |T_{cpext} - T_{cp}|}{\nu_a D_a} \quad (7)$$

l'esponente + indica che se il contenuto della parentesi è negativo il termine è nullo.

Mediante i termini  $C_t$ ,  $M_t$  e  $R$  sono state rappresentate, rispettivamente, l'energia scambiata per conduzione fra lo strato esterno di muratura ed il primo strato di muratura, l'energia immagazzinata nel primo strato di muratura in funzione della sua inerzia termica, e i flussi che definiscono l'energia, nel range dell'IR lungo, in ingresso per i singoli strati; la frazione di energia emessa, nell'IR lungo, è valutata mediante l'espressione di Stefan-Boltzmann:  $\varepsilon\sigma T^4$  (Vox, 1997).

La radiazione emessa verso la superficie terrestre dalle molecole di vapor d'acqua e di anidride carbonica presenti negli strati più bassi dell'atmosfera (Swinbank, 1963) è stata indicata con  $R_{vc}$ .

Le caratteristiche radiometriche  $\tau_{r,lab}$  e  $\rho_{r,lab}$  indicano i valori di trasmittanza e riflettanza medi (Vox e Schettini, 2007; Papadakis et al., 2000).

Per quanto concerne il contributo energetico della radiazione solare (0.3-3.0  $\mu\text{m}$ ), è stato risolto un sistema di 3 equazioni nelle 3 incognite  $E_1, E_2, E_3$  assumendo nota la radiazione solare incidente  $E_s$  (Kindelan, 1980):

$$\begin{cases} E_3 - \tau_{s,cpext} E_2 - \rho_{s,cpext} E_s = 0 \\ E_1 - \tau_{s,cpext} E_s - \rho_{s,cpext} E_2 = 0 \\ E_2 - \rho_{s,cp} E_1 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

La rappresentazione delle temperature nella muratura è stata realizzata matematicamente per mezzo dell'equazione di Fourier di diffusione del calore:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (9)$$

ove la diffusività termica D è pari a:  $D = \frac{\lambda_t}{\rho d_t C p_t} [m^2 / s]$ .

L'equazione (9) è stata risolta con il metodo alle differenze finite implicito secondo lo schema di Crank-Nicolson (Gambolati, 1984). L'applicazione di tale metodo conduce alla discretizzazione della (9) che, con intervallo discreto temporale  $\Delta t$  e spaziale  $\Delta z$ , diviene per il generico strato k:

$$\frac{T_{t,k,(j+1)} - T_{t,k,j}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{D_k}{(\Delta z)^2} [T_{t,(k+1),(j+1)} - 2T_{t,k,(j+1)} + T_{t,(k-1),(j+1)} + T_{t,(k+1),j} - 2T_{t,k,j} + T_{t,(k-1),j}] \quad (10)$$

L'equ. (10) si può scrivere anche:

$$r_k T_{t,(k-1),(j+1)} - 2(1+r_k) T_{t,k,(j+1)} + r_k T_{t,(k+1),(j+1)} + r_k T_{t,(k-1),j} + 2(1-r_k) T_{t,k,j} + r_k T_{t,(k+1),j} = 0 \quad (11)$$

avendo posto  $r_k = D_k \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2}$  in cui  $k=1,\dots,K$  è il contatore del passo spaziale ( $\Delta z$ ) e  $j=0,\dots,N$  è il contatore dell'intervallo temporale ( $\Delta t$ ). L'uso del metodo implicito di Crank-Nicolson garantisce convergenza e stabilità indipendentemente dal valore di  $r_k$  prescelto. L'applicazione di tale metodo comporta la risoluzione di tante equazioni quanti sono gli strati di muratura prescelti (Scarascia Mugnozza et al., 1992). Nel caso del modello sviluppato nel presente progetto la muratura è stata considerata composta di 20 strati di uguale spessore.

Il sistema descritto mediante le equazioni (1) –(11) è stato sviluppato in ambiente numerico ed applicato ai dati rilevati in campo. I dati calcolati sono stati confrontati con i dati misurati, in modo da verificare la capacità del modello nel prevedere l'andamento termico in funzione delle condizioni climatiche del sito, temperatura dell'aria esterna, radiazione incidente sulla parete verde, velocità del vento. Le variabili determinate dal modello sono state le temperature della superficie esterna della muratura, dei diversi strati interni e la temperatura della superficie interna. Le variabili sono state calcolate con un passo temporale di 15 minuti. Il passo spaziale di risoluzione delle equazioni differenziali all'interno della muratura è stato definito pari a 1 cm.

Il sistema è stato sviluppato in ambiente Fortran, il sistema di equazioni non lineari è stato risolto utilizzando routines IMSL.

Per la muratura sono stati utilizzati i seguenti valori equivalenti delle caratteristiche termiche:

$\lambda_t$  (conduttività termica del muro) = 0.282 W/m K

$\rho d$  (massa volumica) = 719 Kg/m<sup>3</sup>

$C_p$  (capacità termica massica) = 840 J/Kg K.

Le figure 2.1.2 -2.1.4 riportano la simulazione eseguita utilizzando i valori relativi alla parete verticale ricoperta da *Rhyncospermum jasminoides* e i dati climatici registrati durante la prova sperimentale condotta presso il campo sperimentale di Valenzano (descritta nel Paragrafo 2.2) nel periodo che va dal 8 al 12 Agosto 2014. La figura 2.1.2 mostra l'andamento della temperatura esterna della parete verticale

ricoperta da *Rhynchospermum jasminoides* misurata durante la prova sperimentale condotta presso il campo sperimentale di Valenzano dal 8 al 12 Agosto 2014 e l'andamento della temperatura esterna calcolata tramite il modello energetico proposto.

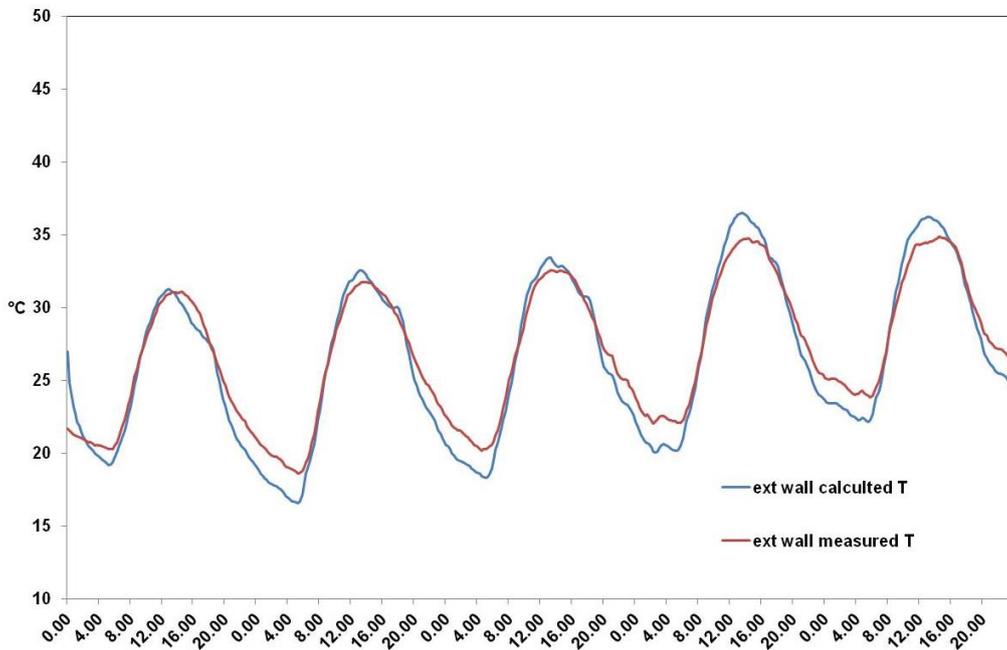


Fig.2.1.2: Andamento della temperatura esterna della parete verticale ricoperta da *Rhynchospermum jasminoides* misurata durante la prova sperimentale condotta presso il campo sperimentale di Valenzano dal 8 al 12 Agosto 2014 e calcolata tramite il modello energetico proposto.

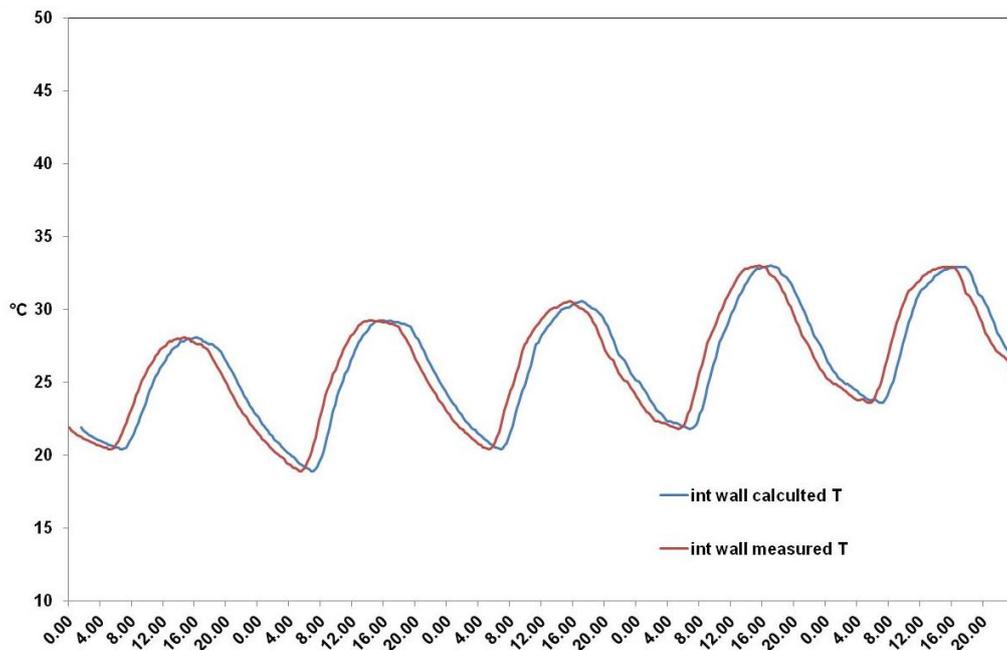


Fig.2.1.3: Andamento della temperatura interna della parete verticale ricoperta da *Rhynchospermum jasminoides* misurata durante la prova sperimentale condotta presso il campo sperimentale di Valenzano dal 8 al 12 Agosto 2014 e calcolata tramite il modello energetico proposto.

La figura 2.1.3 mostra l'andamento della temperatura interna della parete verticale ricoperta da *Rhynchospermum jasminoides* misurata durante la prova sperimentale condotta presso il campo sperimentale di Valenzano dal 8 al 12 Agosto 2014 e della temperatura esterna calcolata tramite il modello energetico proposto.

La Fig.2.1.4 evidenzia la simulazione della temperatura interna ed esterna della parete verticale ricoperta da *Rhynchospermum jasminoides* utilizzando i dati climatici misurati durante la prova sperimentale condotta presso il campo sperimentale di Valenzano dal 8 al 12 Agosto 2014 e andamento della radiazione solare incidente. I risultati evidenziano la capacità del modello di prevedere lo sfasamento termico.

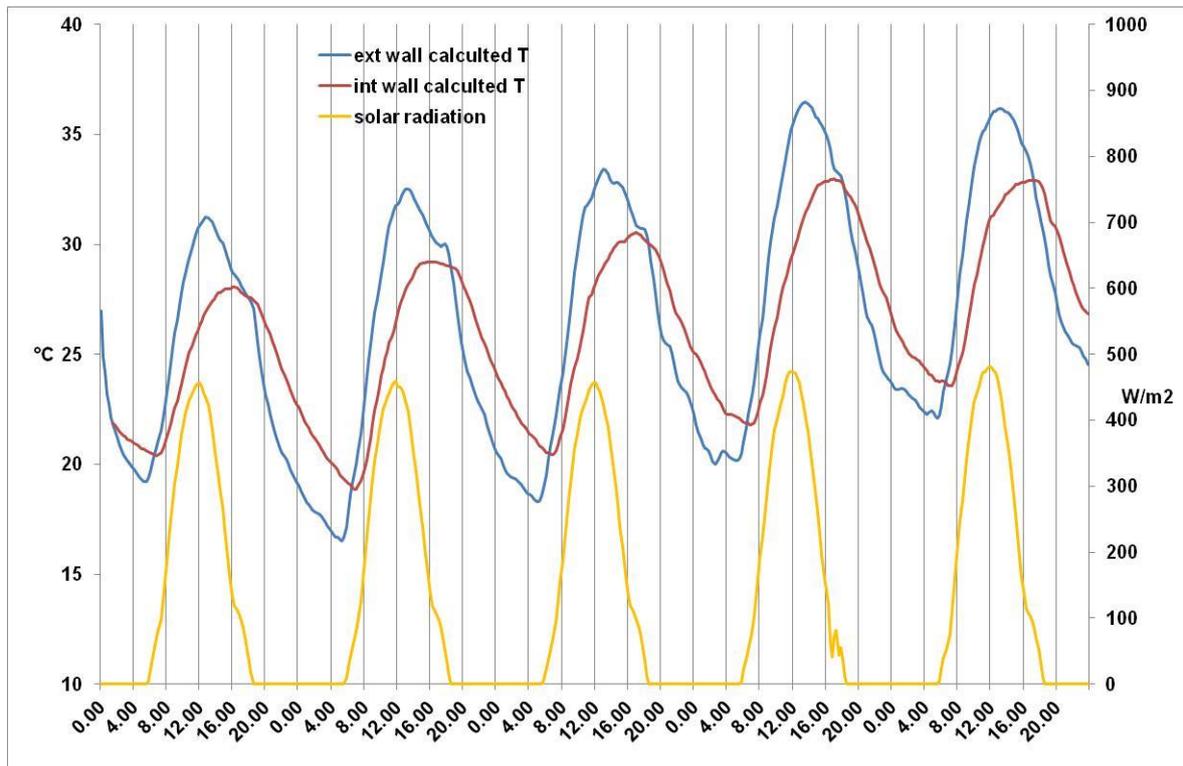


Fig.2.1.4: Simulazione dell'andamento della temperatura interna ed esterna della parete verticale ricoperta da *Rhynchospermum jasminoides* utilizzando i dati climatici misurati durante la prova sperimentale condotta presso il campo sperimentale di Valenzano dal 8 al 12 Agosto 2014 e andamento della radiazione solare incidente.

## 2.2 Prova in campo con un prototipo di parete di edificio in scala ricoperto con essenze vegetali

Il gruppo di ricerca del Dipartimento DISAAT ha realizzato una prova sperimentale con un prototipo di parete di edificio in scala ricoperto con essenze vegetali presso il centro didattico sperimentale "Martucci" dell'Università di Bari sito in Valenzano (Bari; 41°05' N, 16° 53' E). È stato progettato un prototipo semplificato di parete di edificio civile in scala e le pareti del prototipo sono state realizzate con mattoni forati (Figura 2.2.1). Il mattone forato utilizzato ha le seguenti dimensioni: 20 cm di spessore, 25 cm di altezza e 25 cm di lunghezza. Il mattone è caratterizzato dalle seguenti caratteristiche termiche: conducibilità equivalente  $\lambda$  (secondo UNI EN 1745:2005) della parete (con giunti in malta normale) pari a  $0.282 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  (valore comprensivo dell'umidità di equilibrio secondo UNI EN ISO 10456:2008, spessore giunti 7 mm,  $\lambda_{10, \text{dry}}$  malta normale pari a  $0.83 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ); peso medio della muratura in opera (compreso intonaco) pari a  $695 \text{ kg m}^{-3}$ , calore specifico C pari a  $840 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

La parete in mattoni forati è stata scelta essendo comunemente usata nelle costruzioni civili come sistema di chiusura verticale in muratura monostrato in area mediterranea. Sono state realizzate tre pareti con esposizione Sud, ognuna avente larghezza pari a 1 m, altezza pari a 1.55 m, e spessore pari a 0.2 m (Figura 2.2.2).



Figura 2.2.1: Il mattone forato usato per la realizzazione delle pareti in scala presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.



Figura 2.2.2: Le tre pareti verticali in scala realizzati presso il campo sperimentale dell'Università di Bari (Giugno 2014).

Due pareti sono protette con copertura verde mentre la terza, senza alcuna copertura verde, è stata utilizzata come testimone. Le piante sono state trapiantate nel terreno il 18 Giugno 2014 (Figura 2.2.3). Per la copertura verde sono stati scelti due rampicanti vigorosi e sempreverdi: *Pandorea jasminoides variegata* e *Rhynchospermum jasminoides*.

*Pandorea jasminoides variegata* ha grandi foglie ovali di colore verde scuro, lucido e dall'aspetto leggermente ceroso; i fiori sono a trombetta, di colore chiaro, con gola di colore rosa acceso, delicatamente profumati.

*Rhynchospermum jasminoides* ha una crescita veloce e i suoi rami possono raggiungere lunghezze anche attorno ai dieci metri. Le foglie sono opposte, di forma ovale e lanceolata, lucide e coriacee; nella fase giovanile della pianta sono di colore verde chiaro, successivamente assumono una tinta verde scuro. I fiori sono bianchi e riuniti in mazzetti di 8-10 con corolla a forma stellata e tubiforme a cinque petali, ermafroditi; il frutto è una lunga capsula: quando è maturo, si apre e disperde i semi.



Figura 2.2.3: Le tre pareti presso il campo sperimentale dell'Università di Bari; la parete a destra è ricoperta da *Rhynchospermum jasminoides*, la parete centrale da *Pandorea jasminoides variegata* mentre la parete nuda a sinistra è il testimone (18 Giugno 2014).

Il giorno successivo al trapianto, per poter meglio sostenere le piante rampicanti una rete è stata inserita tra le piante e la parete; la rete è stata sistemata a circa 10 cm dalla parete verticale (Figura 2.2.4).

Per irrigare le piante è stato utilizzato un impianto di irrigazione a goccia. Un tubicino in PVC morbido (spaghetto gocciolatore) è stato inserito in corrispondenza di ogni pianta. L'impianto di irrigazione a goccia consente di dosare in maniera equilibrata e costante la quantità di acqua che serve ad innaffiare le piante, senza eccessivi sprechi di acqua. Nel periodo Giugno-Settembre 2014, l'impianto è entrato in funzione ogni giorno per circa 10 minuti. L'irrigazione nei periodi freddi entrerà in funzione invece una volta a settimana. Una concimazione è stata effettuata il giorno del trapianto, alle piante è stato somministrato del concime N:P:K 12:12:12.

Per consentire una corretta valutazione dell'influenza delle piante sugli effetti della radiazione solare incidente, la parete posteriore di ogni parete verticale è stata isolata mediante la realizzazione di una struttura coibentata. La struttura è stata realizzata con fogli in polistirene espanso sinterizzato dello

spessore di 30 mm (Figura 2.2.5 e Figura 2.2.6); il polistirene è caratterizzato dalla conducibilità termica pari a  $0.037 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

Una rete ombreggiante blu è stata posizionata sulla struttura per ridurre l'effetto della radiazione solare incidente (Figura 2.2.6).



Figura 2.2.4: Rete di supporto alle piante rampicanti presso il campo sperimentale dell'Università di Bari: *Pandorea jasminoides variegata* (sinistra) e *Rhynchospermum jasminoides* (destra).



Figura 2.2.5: Fasi della realizzazione della struttura coibentata retrostante la parete verticale.



Figura 2.2.6: Struttura coibentata retrostante la parete verticale e protetta con rete ombreggiante.

Il campo sperimentale è dotato di una stazione meteorologica (Figura 2.2.7) con un sistema di acquisizione dati costituito da un data logger (CR10X, Campbell, Logan, USA) e da sensori per la rilevazione della temperatura dell'aria esterna, della radiazione solare incidente sulla superficie verticale, della velocità e direzione del vento, della temperatura superficiale interna ed esterna della parete e della temperatura dell'aria del volume delimitato dietro a ogni parete.



Figura 2.2.7: Stazione meteorologica presso il campo sperimentale dell'Università di Bari: interno della stazione meteo (sinistra) e data logger (destra).

I dati climatici sono registrati ogni 60 s dal data logger e memorizzati come valori medi ogni 15 minuti. La radiazione solare incidente sulla superficie verticale è misurata con un piranometro (modello 8-48, Eppley Laboratorio, Newport, RI, USA) nell'intervallo di lunghezze d'onda 0.3-3  $\mu\text{m}$ . La temperatura dell'aria esterna è misurata con sonde Hygroclip-S3 (Rotronic, Zurigo, Svizzera) e le sonde sono state schermate dalla radiazione solare. Per misurare la velocità e la direzione del vento è utilizzato un sensore Young Wind

Sentry 03002 (Wind Sentry 03002 Data Sheet, R. M. Young Company 1999). La velocità del vento è misurata da un anemometro classico con piccole pale rotanti che producono un segnale sinusoidale la cui frequenza è proporzionale alla velocità del vento. La direzione del vento viene rilevata da una banderuola potenziometrica la cui resistenza è funzione dell'orientamento banderuola. I campi di misura sono  $0-50 \text{ m s}^{-1}$  per la velocità del vento e  $0-360^\circ$  per la direzione del vento.

Su ogni parete verticale sono state misurate: la temperatura superficiale della parete sul lato esterno esposta alla radiazione, la temperatura superficiale della parete sul lato interno e la temperatura dell'aria del volume delimitato dietro alla parete. Le temperature sono misurate mediante termistori (Tecno.el s.r.l. Formello, Rome, Italy). I sensori sono opportunamente posizionati sulla superficie della parete (Figura 2.2.8 e Figura 2.2.9).

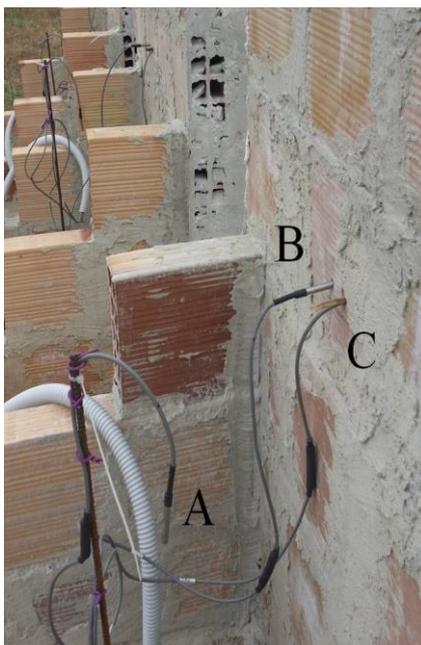


Figura 2.2.8: Sensore di temperatura dell'aria del volume retrostante la parete verticale (A), sensore di temperatura superficiale della parete interna (B), sensore della temperatura superficiale dell'intonaco esterno (C)



Figura 2.2.9: Sensore della temperatura dell'intonaco esterno: sensore appena inserito (sinistra, nel cerchio); sensore ricoperto da uno strato sottile di intonaco (destra).

La crescita delle piante è stata monitorata nel tempo. Le pareti sono risultate sufficientemente ricoperte da vegetazione da metà Agosto 2014 in poi (Figura 2.2.10).



Figura 2.2.10: Sviluppo della vegetazione al 13 Agosto 2014: *Rhyncospermum jasminoides* (destra), *Pandorea jasminoides variegata* (sinistra).

Dalle prime elaborazioni dei dati, considerando il periodo temporale dal 15 Agosto al 31 Agosto, periodo in cui la vegetazione ha cominciato a coprire la parete verticale in modo più significativo rispetto all'inizio della prova (Figura 2.2.11), si possono cominciare a trarre le prime considerazioni. Si deve però precisare che i due rampicanti non hanno ancora ricoperto la parete al 100% al momento della redazione del presente documento, e che il rampicante *Rhyncospermum jasminoides* presenta vuoti maggiori rispetto al rampicante *Pandorea jasminoides variegata*. Il non completo sviluppo dell'apparato vegetale è imputabile alle condizioni meteorologiche particolarmente avverse registrate nel periodo estivo 2014.

Come si può evincere dalla Figura 2.2.12, le temperature dell'intonaco esterno registrate per il testimone sono sempre maggiori nelle ore calde della giornata rispetto alle temperature dell'intonaco esterno registrate nelle stesse ore per le pareti verticali ricoperte da *Rhyncospermum jasminoides* e *Pandorea jasminoides variegata*. La presenza della vegetazione, dunque, mitiga il quantitativo di radiazione solare assorbita dalle pareti e conseguentemente si riduce la temperatura dell'intonaco esterno delle pareti coperte dai rampicanti rispetto alla parete senza copertura verde.

In un giorno particolarmente caldo, il giorno 27 Agosto 2014, le differenze tra le temperature registrate sono state dell'ordine di 3-4 °C: il testimone ha registrato una temperatura massima della temperatura dell'intonaco esterno pari a 38°C, la parete verticale ricoperta da *Rhyncospermum jasminoides* una temperatura massima della temperatura dell'intonaco esterno pari a 35°C mentre la parete verticale ricoperta da *Pandorea jasminoides variegata* una temperatura massima della temperatura dell'intonaco esterno pari a 34°C (Figura 2.2.13). Le differenze con il testimone sicuramente si incrementeranno quando tutta la superficie delle pareti risulterà completamente coperta dalla vegetazione. Sicuramente la maggiore presenza di vuoti sulla parete ricoperta con il rampicante *Rhyncospermum jasminoides* rispetto alla parete con il rampicante *Pandorea jasminoides variegata* influenza le temperature dell'intonaco esterno delle due pareti "verdi" (Figura 2.2.14).



Figura 2.2.11: Sviluppo delle piante rampicanti utilizzate presso il campo sperimentale dell’Università di Bari: la parete a destra è ricoperta da *Rhynchospermum jasminoides*, la parete centrale da *Pandorea jasminoides variegata* mentre la parete nuda a sinistra è il testimone; 1 Settembre 2014.

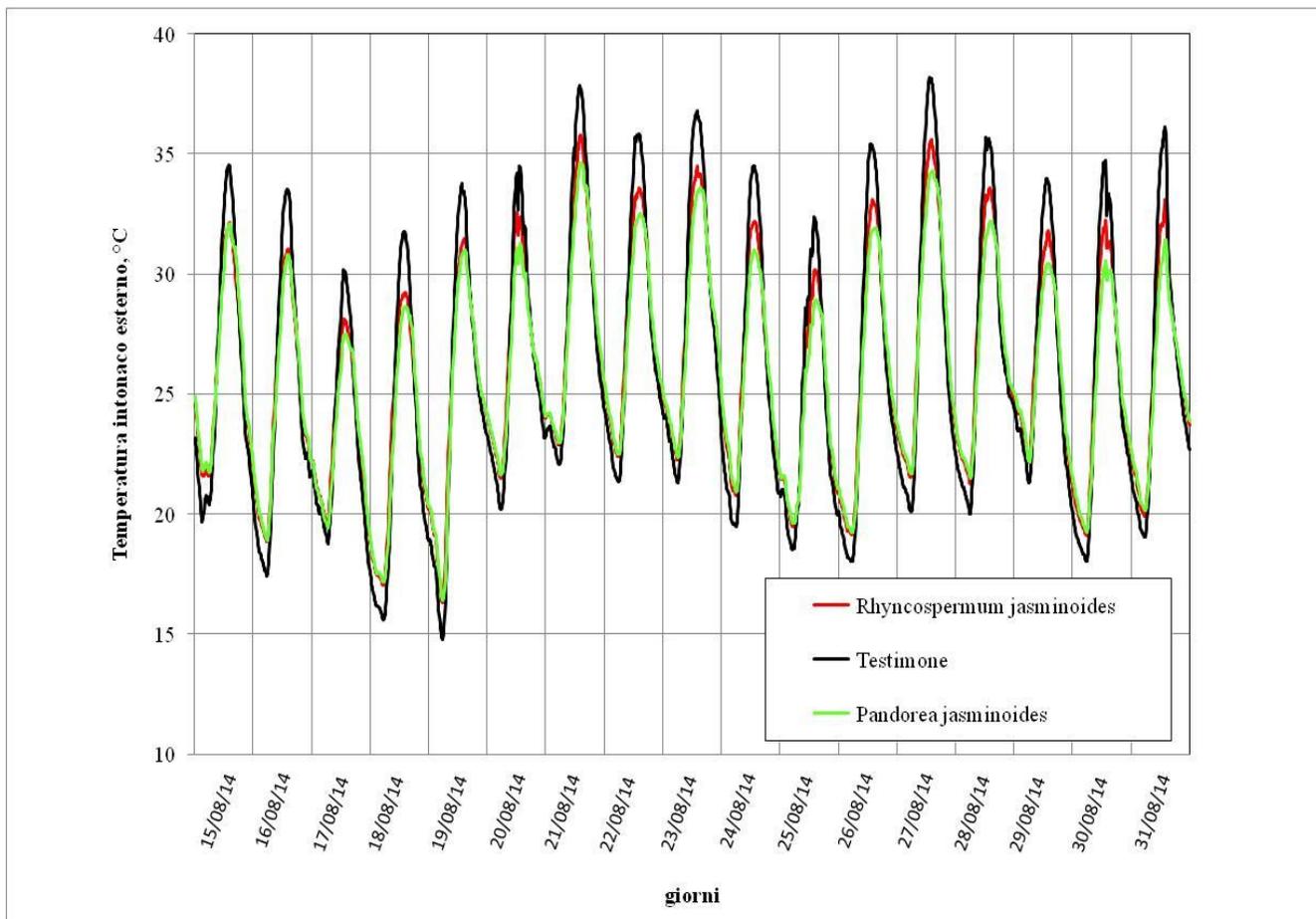


Figura 2.2.12: Andamento della temperatura dell’intonaco esterno nel periodo 15-31Agosto 2014.

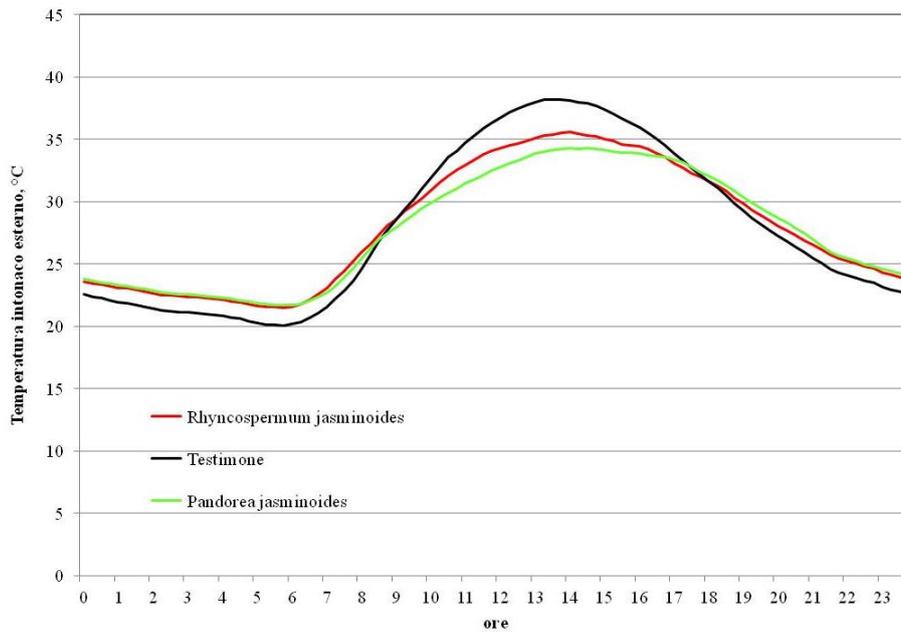


Figura 2.2.13: Andamento della temperatura dell'intonaco esterno nel corso delle 24 ore nel giorno 27 Agosto 2014.



Figura 2.2.14: Piante rampicanti in corrispondenza del sensore di temperatura: *Rhyncospermum jasminoides* (destra), *Pandorea jasminoides variegata* (sinistra); 1 Settembre 2014.

Sempre per lo stesso giorno (27 Agosto 2014), la Figura 2.2.15 riporta l'andamento delle temperature dell'intonaco interno registrate per il testimone e per le pareti verticali ricoperte da *Rhyncospermum jasminoides* e *Pandorea jasminoides variegata*. Nelle ore più calde della giornata la parete verticale usata come testimone è caratterizzata sia da una maggiore temperatura dell'intonaco esterno sia da una maggiore temperatura dell'intonaco interno, con uno sfasamento dell'onda termica pari a circa 2 ore (Figura 2.2.16). Il testimone ha registrato una temperatura massima della temperatura dell'intonaco interno pari a 34°C, entrambe le pareti verticali ricoperte dai rampicanti una temperatura massima della temperatura dell'intonaco interno pari a 32°C, dunque la differenza tra le temperature registrate è dell'ordine di 2 °C.

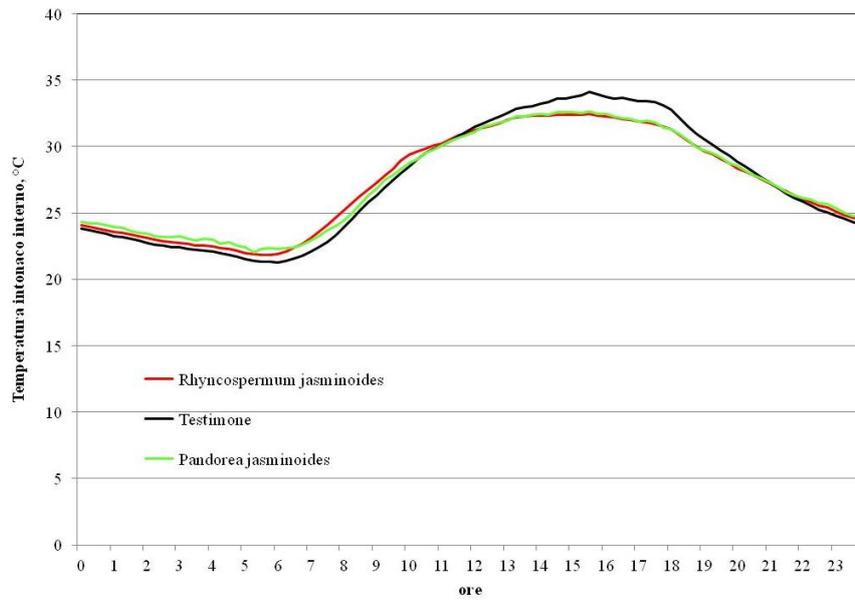


Figura 2.2.15: Andamento della temperatura dell’intonaco interno nel corso delle 24 ore nel giorno 27 Agosto 2014.

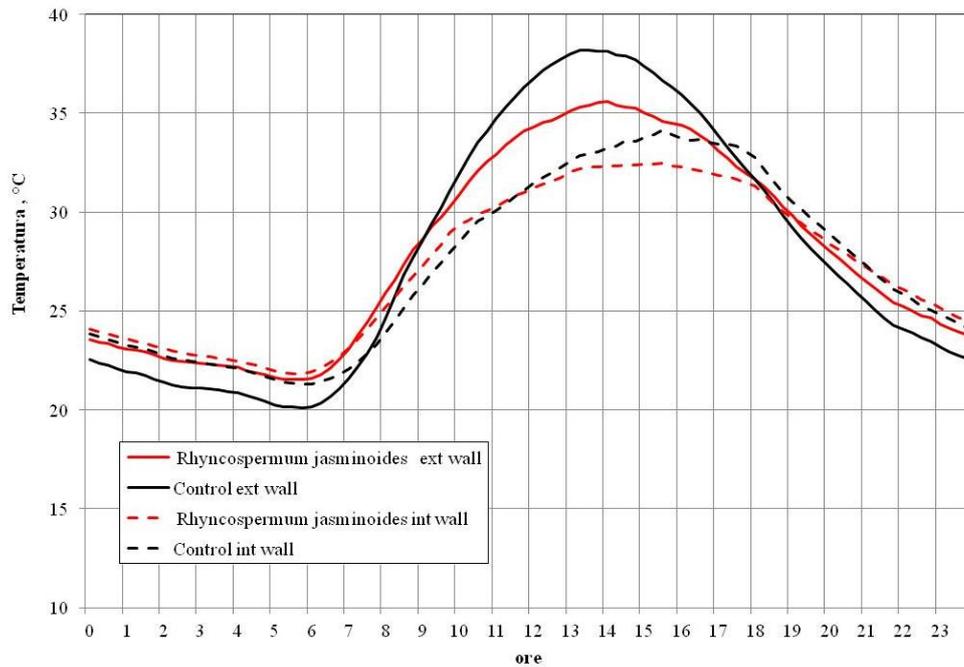


Figura 2.2.16: Onda termica nel corso delle 24 ore nel giorno 27 Agosto 2014.

La Figura 2.2.17 riporta l’andamento delle temperature dell’aria interna della struttura retrostante ogni parete verticale registrate durante il giorno 27 Agosto 2014. Le temperature più elevate si sono registrate per la parete verticale usata come testimone.

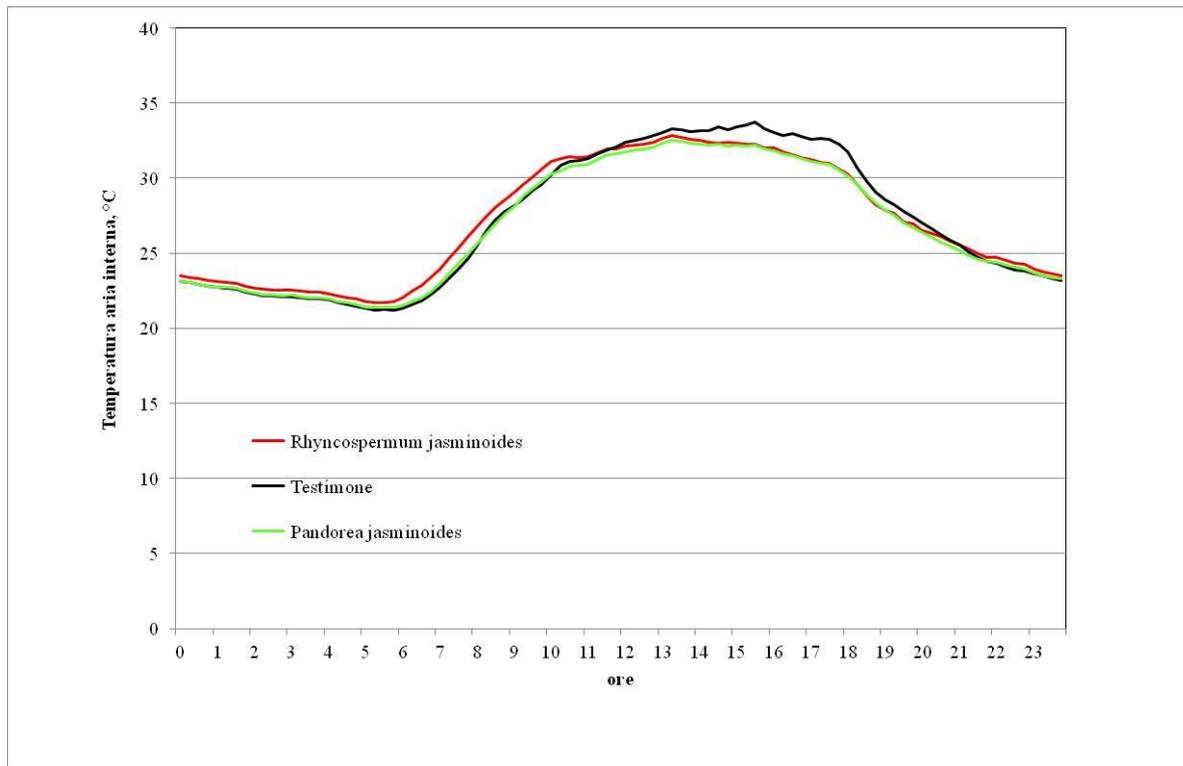


Figura 2.2.16: Andamento della temperatura dell'aria interna della struttura retrostante ogni parete nel corso delle 24 ore nel giorno 27 Agosto 2014.

### 2.3 Valutazione del Green Factor "K<sub>v</sub>"

I dati ottenuti nella prova sperimentale presso l'Università di Bari nella stagione estiva 2014 sono stati utilizzati per valutare il Green Factor  $K_v$  per i due rampicanti *Rhynchospermum jasminoides* e *Pandorea jasminoides variegata*. Il Green Factor  $K_v$  è un fattore utile per descrivere il comportamento schermante delle diverse specie vegetali. I dati usati sono relativi al periodo dal 15 al 31 agosto, periodo in cui i due rampicanti hanno avuto uno sviluppo vegetativo tale da cominciare a coprire la parete verticale in modo più significativo rispetto all'inizio della prova. Comunque i risultati ottenuti sono preliminari in quanto sicuramente potranno subire delle variazioni quando tutte le superfici delle pareti verticali risulteranno completamente coperte dalla vegetazione.

Il Green Factor  $K_v$  è valutato utilizzando la seguente formula (Campiotti et al., 2011):

$$K_v = \frac{T_s - T_{sv}}{T_s - T_{air}}$$

dove:

$T_{air}$  è la temperatura dell'aria dell'ambiente esterno

$T_s$  è la temperatura superficiale della parete nuda (in assenza del verde)

$T_{sv}$  è la temperatura superficiale della parete con copertura verde.

Per il calcolo del Green Factor  $K_v$  nel periodo dal 15 al 31 agosto si sono considerati gli intervalli temporali diurni caratterizzati da una radiazione solare incidente sulla superficie verticale superiore a  $300 \text{ Wm}^{-2}$  (Tabella 2.3.1).

Tabella 2.3.1: Valori medi del Green Factor  $K_v$  per le due coperture vegetali testate presso l'Università di Bari.

Copertura verde	$K_v$
<i>Rhynchospermum jasminoides</i>	0.81
<i>Pandorea jasminoides variegata</i>	0.95

#### 2.4 Dimensionamento di un sistema fotovoltaico che deve alimentare l'impianto di irrigazione di un edificio ricoperto con le stesse essenze vegetali usate nella prova sperimentale

Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha definito le potenze energetiche necessarie di un sistema fotovoltaico dedicato alla gestione delle essenze vegetali presenti su pareti di edifici localizzati in ambiente mediterraneo, con riferimento all'impianto di irrigazione.

Le specie vegetali selezionate, *Pandorea jasminoides variegata* e *Rhynchospermum jasminoides*, se messe a dimora a distanza di un metro (1 pianta/metro lineare), necessitano di un sistema di irrigazione del tipo a goccia con pompa che garantisca nei mesi più caldi 15 minuti di funzionamento ogni 48 ore e nei mesi freddi 15 minuti di funzionamento con frequenza settimanale.

Una pompa avente una potenza di 1.100 W può garantire l'irrigazione di una parete verde avente una lunghezza di 50 metri ed alta circa 16-18 m (5 piani) con le piante disposte lungo una fila per piano, ovvero circa 250 piante. Con tali impostazioni l'impianto di irrigazione richiederebbe una quantità di energia pari a circa 0.5 MJ/giorno durante i mesi caldi e pari a circa 0.14 MJ/giorno durante i mesi freddi.

In Puglia ed in particolare presso Valenzano (Bari) un metro quadrato di superficie di pannelli fotovoltaici orientati verso sud con inclinazione rispetto all'orizzontale di 30° possono alimentare sufficientemente, compresi gli impianti accessori per il fotovoltaico, l'impianto di irrigazione ipotizzato, garantendo difatti la produzione media di energia elettrica pari a 0.91 MJ/giorno nel periodo di Dicembre, mese avente il livello più basso di radiazione solare disponibile.

Il sistema fotovoltaico può essere realizzato sia come sistema stand-alone sia con connessione alla rete elettrica.

#### 2.5 Pubblicazioni

I risultati ottenuti dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari e dall'ENEA UTEE AGR sono stati presentati al International Conference of Agricultural Engineering AgEng 2014- Engineering for improving resource efficiency. Zurigo (Svizzera), 6-10 luglio 2014 e al 18th World Congress of the International Commission of Agriculture and Biosystems Engineering (CIGR) (Beijing, Cina, 16-19 Settembre 2014).

1. C.A. Campiotti, E. Schettini, G. Alonzo, C. Viola, C. Bibbiani, G. Scarascia Mugnozza, I. Blanco, G. Vox (2013) Building green covering for a sustainable use of energy. Journal of Agricultural Engineering 2013; volume XLIV(s2):e50, pISSN 1974-7071 | eISSN 2239-6268; doi:10.4081/jae.2013.(s1):e50; pag 253-256
2. Vox G., Schettini E., Campiotti C.A., Viola C., Alonzo G., Blanco I., Scarascia Mugnozza G. (2014) "Building climate control by means of passive systems", International Conference on Agricultural Engineering AgEng2014 "Engineering for Improving Resource Efficiency" (Zurigo, Svizzera, 6-10 Luglio 2014), 8 pagine
3. E. Schettini, G. Scarascia Mugnozza, I. Blanco, C. A. Campiotti, C. Viola, G. Alonzo, G. Vox (2014) "Passive systems to control microclimate inside buildings", 18th World Congress of the International Commission of Agriculture and Biosystems Engineering (CIGR) (Beijing, Cina, 16-19 Settembre 2014)., poster

### 3 Conclusioni

La ricerca svolta dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari nell'ambito dell'Accordo di collaborazione "ECO-GREENROOF & VERTICAL GREENERY SYSTEM" con l'ENEA ha riguardato: l'applicazione di un modello energetico per la previsione del regime termico delle superfici di chiusura di un edificio che utilizza pareti verticali verdi; la sperimentazione in campo su pareti verticali sperimentali ricoperte da due diverse essenze vegetali; il calcolo del Green Factor ( $K_v$ : indice "costante verde") per descrivere il comportamento schermante delle due diverse essenze vegetali utilizzate nella prova sperimentale; la definizione delle potenze energetiche necessarie ad un sistema fotovoltaico per coprire le esigenze energetiche derivanti dalla gestione delle diverse essenze vegetali in ambiente climatico mediterraneo. La prova sperimentale è stata condotta nel periodo estivo e pertanto i risultati riguardano solo il periodo caldo. La ricerca potrà proseguire continuando a monitorare la prova sperimentale anche nel periodo autunnale, invernale e primaverile. Il modello energetico sarà verificato e applicato nelle diverse condizioni climatiche esterne, temperatura dell'aria e radiazione solare. Il modello, una volta testato sia per i periodi caldi che per i periodi freddi, potrà servire per scegliere le essenze vegetali, i materiali e gli impianti da utilizzare per la progettazione di un edificio ricoperto con essenze vegetali, rispettando le esigenze di confort termico per le persone che usufruiscono dell'edificio.

### 4 Riferimenti bibliografici

- S. Benvenuti Wildflower green roofs for urban landscaping, ecological sustainability and biodiversity. *Landscape and Urban Planning*, 124 (2014), pp. 151-161.
- U. Berardi, A. H. GhaffarianHoseini, A. GhaffarianHoseini. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, (2014), pp. 411-428.
- P. Berdahl, S.E. Bretz Preliminary Survey of the Solar Reflectance of Cool Roofing Materials, *Energy and Buildings*, 25(1997), pp. 149-158.
- A. Bianchi, G. Scarascia Mugnozza Studio e verifica sperimentale di un modello matematico di simulazione del microclima in serre a regime naturale con copertura in film plastico. *Rivista di Ingegneria Agraria* 27 (4) (1996), pp. 220-229
- T. Blanus, M. M. Vaz Monteiro, F. Fantozzi, E. Vysini, Y. Li, R. W. F. Cameron. Alternative to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better 'cooling service'?. *Building and Environment*, 59 (2013), pp. 99-106.
- S.E. Bretz, H. Akbari Long-term Performance of High-Albedo Roof Coatings, *Energy and Buildings*, 25 (1997), pp. 159-167.
- S.E. Bretz, H. Akbari, A. Rosenfels Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. *Atmospheric Environment* 32 (1998), pp. 95-101.
- R. W. F. Cameron, T. Blanus, J. E. Taylor, A. Salisbury, A. J. Halstead, B. Henricot, K. Thompson. The domestic garden – Its contribution to urban green infrastructure. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11 (2), (2012), pp. 129-137.
- C. Campiotti, C. Bibbiani, G. Alonzo, G. Giagnacovo, R. Ragona, C. Viola. Green roofs and façades agriculture (GRF) for supporting building energy efficiency. *Journal of Sustainable Energy*, 2011, Vol. II, N°. 3 (2011).
- H. F. Castleton, V. Stovin, S. B. M. Beck, J. B. Davison. Green roofs: building energy savings and the potential of retrofit. *Energy and Buildings*, 42, (2010), pp. 1582-1591.
- C. Y. Cheng, K. K.S. Cheung, L.M. Chu Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Build. Environ.* 45 (2010), pp.1779-1787
- J. A. Duffie, W.A. Beckman Solar engineering of thermal process (1991) John Wiley & Sons, Inc.
- C. Y. Jim, S.W. Tsang Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Build. Environ.* 46 (2011), pp. 1263-1274.
- C.Y. Jim, H. He. Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem. *Ecological Engineering*, 37 (8), (2011), pp. 1112-1122

- R. Fernandez-Cañero, T. Emilsson, C. Fernandez-Barba, M. A. Herrera Machuca. Green roof systems: A study of public attitudes and preferences in southern Spain. *Journal of Environmental Management*, 128, (2013), pp. 106-115.
- R. Fioretti, A. Palla, L. G. Lanza, P. Principi Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Build. Environ.* 45 (2010), pp. 1890-1904.
- R. A. Francis, J. Lorimer. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management*, 92 (6), (2011), pp. 1429-1437
- G. Gambolati. *Elementi di calcolo numerico*". Edizioni Libreria Cortina (1984) Padova.
- A.R. Gentle, J.L.C. Aguilar, G.B. Smith. Optimized cool roofs: integrating albedo and thermal emittance with R-value. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95 (2011), pp. 3207-3215.
- K. L. Getter, D. B. Rowe, B. M. Cregg. Solar radiation intensity influences extensive green roof plant communities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8, (2009), pp. 269-181.
- F. Gladis, R. Schumann. Influence of material properties and photocatalysis on phototropic growth in multi-year roof weathering. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65 (2011), pp. 36-44.
- IGRA (2014). International Green Roof Association. Available at: <http://www.igra-world.com/> (accessed May, 2014)
- I. Jaffal, S. E. Ouldboukhite, R. Belarbi A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance *Renew. Energ.* 43(2012), pp. 157-164.
- J.H. Jo, J.D. Carlson, J.S. Golden, H. Bryan. An integrated empirical and modeling methodology for analyzing solar reflective roof technologies on commercial buildings. *Building and Environment* 45 (2010), pp. 453-460.
- A. Joudi H. , Svedung, M. Cehlin, M. Rönnelid. Reflective coatings for interior and exterior of buildings and improving thermal performance. *Applied Energy*, 103 (2013), pp. 562-570.
- L.S. Kalkstein, R.E. Davis. Weather and human mortality: An evaluation of demographic and interregional responses in the United States. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.* 79 (1989), pp. 44-64.
- M. Kanechi, S. Fujiwara, N. Shintani, Y. Uno. Performance of herbaceous *Evolvulus pilosus* on urban green roof in relation to substrate and irrigation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(1) (2014), pp. 184-191.
- T. Karlessi, M. Santamouris, K. Apostolakis, A. Synnefa, I. Livada Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. *Sol. Energy* 83 (2009), pp. 538-551
- T. Karlessi, M. Santamouris, A. Synnefa, D. Assimakopoulos, P. Didaskalopoulos, K. Apostolakis Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat Island and cool buildings. *Build. Environ.* 46 (2011), pp. 570-576.
- M. Kindelan. Dynamic modeling of greenhouse environment. *Transaction of the ASAE*, 23 (6), (1980) , pp. 1232-1239.
- M. Köhler. Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, 11, (2008), pp. 423-436.
- M. Köhler, P. H. Poll Long-term performance of selected old Berlin greenroofs in comparison to younger extensive greenroofs in Berlin. *Ecol. Eng.* 36 (2010), pp. 722-729.
- K. J. Kontoleon, E.A. Eumorfopoulou. The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*. 45, (2010), pp. 1287-1303.
- H. Li, J. Harvey, A. Kendall. Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance. *Building and Environment* 59 (2013), pp. 536-546.
- G. Papadakis, D. Briassoulis, G. Scarascia-Mugnozza, G. Vox, P. Feuilloley, J.A. Stoffers, Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials, *J. Agric. Eng. Res.* 77 (1) (2000), pp. 7–38.
- G. Pérez, L. Rincón, A. Vila, J. M. González, L. F. Cabeza Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Appl. Energy* 88 (2011), pp. 4854-4859
- K. Perini, M. Ottel , A.L.A. Fraaij, E.M. Haas, R. Raiteri Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Build. Environ.* 46 (2011), pp. 2287-2294

- M. Petralli, A. Prokopp, M. Morabito, G. Bartolini, T. Torrigiani, S. Orlandini. Ruolo delle aree verdi nella mitigazione dell'isola di calore urbana: uno studio nella città di Firenze. *Rivista Italiana di Agrometeorologia* 1 (2006), pp. 51-58
- R. T. A. Prado, F. L. Ferreira. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings* 37 (2005), pp. 295-300.
- D. B. Rowe. Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution* 159 (2011), pp. 2100-2110.
- M. Santamouris Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol. Energy* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- G. Scarascia Mugnozza, G. Russo, G. Vox Modello numerico per l'analisi previsionale delle temperature nel terreno agrario solarizzato, *Atti del Convegno "Informatica e Agricoltura"*, Firenze, 17-18 Dicembre (1992), pp. 185-194.
- A. Spala, H. S. Bagiorgas, M. N. Assimakopoulos, J. Kalavrouziotis, D. Matthopoulos, G. Mihalakakou. On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens, Greece. *Renewable Energy*, 33 (1), (2008), pp. 173-177.
- A. Synnefa, M. Santamouris, I. Livada A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy* 80 (2006), pp. 968-981.
- K.L. Uemoto, N.M.N. Sato, V.M. John Estimating thermal performance of cool colored paints. *Energy and Buildings* 42 (2010).
- G. Vox Analisi degli scambi energetici radiativi nei modelli di simulazione del microclima delle serre, *Atti del VI Convegno Nazionale A.I.I.A.*, Ancona 11-12 Settembre (1997), pp. 85-94
- G. Vox, E. Schettini Evaluation of the radiometric properties of starch-based biodegradable films for crop protection. *Polym. Test.* 26 (2007), pp. 639-651
- N. H. Wong, D. K. W. Cheong, H. Yan, J. Soh, C. L. Ong, A. Sia. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*, 35 (4), (2003), pp. 353-364.
- N. H. Wong, A. Y. Kwang Tan, Y. Chen, K. Sekar, P. Yok Tan, D. Chan, K. Chiang, N. C. Wong. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Buil-ding and Environment*, 45 (3), (2010), pp. 663-672.
- M. Zinzi, E. Carnielo, S. Agnoli Characterization and assessment of cool coloured solar protection devices for Mediterranean residential buildings application. *Energy and Buildings* 50 (2012), pp. 111-119

## 5 Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" ha una lunga tradizione nell'insegnamento e nella ricerca scientifica nel campo dell'ingegneria agraria. L'area scientifica di maggiore interesse riguarda lo studio degli aspetti ingegneristici relativi alle strutture, agli impianti, ai materiali e all'energia concernenti gli insediamenti produttivi agricoli quali serre, allevamenti e industrie di trasformazione dei prodotti agricoli. Le ricerche condotte dal gruppo di ricerca del Dipartimento DISAAT sono finalizzate a ridurre l'impatto ambientale dei sistemi produttivi agricoli mediante l'individuazione di impianti e materiali finalizzati alla riduzione dei consumi energetici, alla gestione dei reflui prodotti e all'introduzione delle energie rinnovabili. Il gruppo di ricerca attualmente sta partecipando al progetto "Agricultural Waste valorisation for a competitive and sustainable Regional Development - AWARD", European Territorial Cooperation Programme Greece-Italy 2007-2013, Progetto finanziato da European Union (ERDF) e da National Funds of Greece & Italy; (Contratto n° I3.11.03; Ottobre 2013 - Settembre 2015). 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, Accordo di collaborazione “Modelli per l’incremento dell’efficienza energetica degli edifici mediante la copertura con essenze vegetali in ambiente mediterraneo” nell’ambito dell’Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA (2013).

Il gruppo di ricerca è costituito da:

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

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

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

*ing. Ileana Blanco* – Ingegnere Edile, dottoranda in “Gestione e ingegneria dei biosistemi agro-forestali”.

*dott. Costantino Anifantis* - EP, Agronomo, responsabile del campo sperimentale di Valenzano.

*Sig. Francesco Ferrulli* - Tecnico, esperto di sensoristica.