



Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali



Corso di dottorato in Ecosistemi e Sistemi Produttivi

Curriculum: Ingegneria dei Sistemi Agricoli e Forestali

XXIX Ciclo

TESI

**Messa a punto di tecniche e sistemi colturali per la realizzazione di
superfici verdi per l'efficientamento di edifici urbani**

(S.s.d. AGR/ 10)

Dottorando: Dott. Biagiotti Damiano

Coordinatore del corso: Prof. Franco Silvio

Tutors: Prof. Cecchini Massimo

Dott.ssa Di Bonito Rita

(a.a. 2016/2017)

INDICE

1 INTRODUZIONE

1.1 Le coperture a verde: stato dell'arte	5
1.2 Vantaggi ambientali	6
1.3 Struttura delle coperture a verde	8
1.3a Elementi Strutturali	8
1.3b La normativa sulle coperture a verde	11
1.4 La vegetazione per le coperture a verde	14
1.5 Coperture verdi ed isolamento termico degli edifici	17

2 SCOPO DEL LAVORO 19

3 MATERIALI E METODI

3.1 Valutazione delle specie e substrati colturali	20
3.1.1 Valutazione di accessioni spontanee di <i>Crassulaceae</i> in substrati "soilless"	20
3.1.2 Valutazione dell'aggiunta di ammendanti in colture di <i>Crassulaceae</i>	21
3.2 Valutazione di crescita in colture miste	24
3.2.1 Moduli di coperture estensive con <i>Crassulaceae</i>	24
3.2.2 Moduli di coperture semi-intensive con specie arbustive (<i>Lamiaceae</i>)	25
3.3 Valutazione dei parametri ambientali e termici dei moduli	26

4 RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Valutazione delle specie e substrati colturali	29
4.1.1 Valutazione di accessioni spontanee di <i>Crassulaceae</i> in substrati "soilless"	29
4.1.2 Valutazione dell'aggiunta di ammendanti in colture di <i>Crassulaceae</i>	33

4.2 Valutazione di crescita in colture miste	38
4.2.1 Moduli di coperture estensive con <i>Crassulaceae</i>	38
4.2.2 Moduli di coperture semi-intensive con specie arbustive (<i>Lamiaceae</i>)	43
4.3 Valutazione dei parametri ambientali e termici dei moduli	45
5 CONCLUSIONI	60
BIBLIOGRAFIA	63

ABSTRACT

The installation of structures made of plants on the top of buildings (green roofs) or facades, are receiving a growing interest in the urban planning not only for their aesthetic value but also for the related environmental advantages. The transpiration and the shade of plants on green roofs can have an effect of mitigation of the heat rising observed in the urban settlements during the summer, known as Urban Heat Island (UHI) and on the indoor temperatures. The green roofs are common in North and Central Europe but less popular in the Mediterranean regions, where the heat and drought during the summer made more difficult the survival of plants in the shallow substrates required by this type of installations. The aim of this research was the evaluation of succulent and indigenous species of Crassulaceae and the development of sustainable soilless substrates suitable for green roofs in the Mediterranean regions. A second aspect of the research was the installation of green roof modules on a terrace of a building at ENEA Casaccia, Central Italy, for the evaluation of the thermal parameters in relation to the plant type and development. We have evaluated a collection of 13 genotypes of Crassulaceae, characterized by prostrate growth habit and resistance to drought, including indigenous accessions collected in Mediterranean regions (*Sedum* sp. *Sempervivum* sp. *Aeonium* sp.). We have evaluated their ability to grow on shallow soil-less substrates (8-10 cm), with the addition of different rates of organic amendment (compost and biochar). We have selected three accessions characterized by superior prostrate growth and resistance to the environmental factors: *S. album* from Croatia, *S. acre* and *S. tectorum* from Molise, Italy. The amendment with compost or compost + biochar (5% or 10% vol/vol) produced increase of the plant growth parameters. In the second part of the research were realized platforms simulating one extensive green roof covered with a combination of five Crassulaceae species (*S. palmieri*, *S. spurium*, *Sempervivum tectorum*, *S. reflexum*, *S. acre*) and substrate depth of 8 cm, and two semi-intensive green roofs with small shrubs of species of Lamiaceae (*Rosmarinus officinalis prostratus*, *Salvia officinalis*, *Thymus citriodorus*, *Lavandula officinalis*, *Thymus vulgaris*) and substrate depth of 18 cm. The platforms were installed on a terrace for the monitoring of the thermal parameters using sensors connected to a datalogger that recorded the data with hourly frequency. The temperature of substrates, the temperature of the interspace on the surface of building under the green structures and the atmospheric parameters were evaluated in the summer periods. The development of the plants canopy was evaluated as percentage of covered surface from the plant during the time. The results obtained during three years of monitoring have shown an average decrease of the higher daily temperature of 3 °C - 5 °C in the interspace under the structures respect to the atmospheric value when the plants development produced a surface coverage of 70%-100% for all the platforms (2nd and 3rd summer from the installation). The platform covered with a mix of Crassulaceae species, characterized by reduced height and vegetative propagation presented higher growth rate, resistance to the climatic factors and survival of plants, respect to the platform realized with shrubs of Lamiaceae. The experiment has shown the resistance and sustainability over time of green roofs realized with a combination of indigenous succulent species of Crassulaceae and the addition of organic amendment to the soilless substrates. The consistent reduction of the temperature on the surface of the building suggests a positive effect of the green roof structures on the mitigation of the “Urban Heat Island” and the indoor air temperature in Mediterranean regions.

Key words: Crassulaceae, green roof, soilless substrate, compost, biochar, Lamiaceae

ABSTRACT

Le installazioni di sistemi vegetali su tetti e terrazzi (tetti verdi) o facciate di edifici hanno ricevuto un crescente interesse non solo per il miglioramento dell'aspetto estetico degli ambienti urbani ma per i significativi vantaggi ambientali connessi. La traspirazione delle piante e l'effetto ombreggiante della "canopy" possono avere un effetto di mitigazione sul fenomeno di aumento della temperatura che si verifica nelle aree urbane in estate, conosciuto come "isola di calore" e sulla temperature degli ambienti interni. I tetti verdi sono comuni nei paesi del Nord e Centro Europa ma poco diffusi nelle regioni mediterranee in quanto il caldo e la siccità estiva rendono problematica la sopravvivenza delle piante nei substrati di ridotto spessore utilizzati per questo tipo di installazioni. Lo scopo di questa ricerca è stato la valutazione di specie succulente di Crassulaceae ed accessioni autoctone e lo sviluppo di substrati "soilless" sostenibili adatti a tetti verdi in ambienti mediterranei. Un secondo aspetto del lavoro è stato il monitoraggio dei parametri termici su moduli di coperture a verde installati sul terrazzo di un edificio nel Centro ENEA Casaccia, Roma. Sono stati valutati i parametri di crescita di una collezione di 13 genotipi di Crassulaceae, caratterizzate da sviluppo prostrato e resistenza alla siccità, comprendente ecotipi autoctoni raccolti in regioni Mediterranee (*Sedum sp.*, *Sempervivum sp.*, *Aeonium sp.*). Sono state valutate le capacità di adattamento su substrati "soilless" di basso spessore (cm 8) con l'aggiunta di concentrazioni diverse di ammendanti organici (compost e biochar). Sono stati individuati tre genotipi caratterizzati da capacità di crescita tappezzante superiore e resistenza ai fattori ambientali adatti a tetti verdi estensivi: *Sedum album* (Croazia), *S. acre* e *Sempervivum tectorum* (Molise, Italia). L'aggiunta di compost e compost + biochar (5% e 10% vol/vol) hanno prodotto un aumento dei parametri di crescita delle piante. Nella seconda parte della ricerca sono stati realizzati un modulo di copertura a verde estensivo (spessore 8 cm), realizzato con una combinazione di cinque specie di Crassulaceae (*S. palmieri*, *S. spurium*, *Sempervivum tectorum*, *S. reflexum*, *S. acre*) e due moduli di copertura a verde semi-intensiva (spessore cm 18) con piccoli arbusti di specie aromatiche di Lamiaceae (*Rosmarinus officinalis prostratus*, *Salvia officinalis*, *Thymus citriodorus*, *Lavandula officinalis*, *Thymus vulgaris*). Periodicamente sono stati valutati la temperatura del substrato e dell'intercapedine sotto la copertura ed i parametri ambientali utilizzando sensori collegati ad un *datalogger* che ha permesso la registrazione dei dati con frequenza oraria per tre anni. Lo sviluppo delle piante è stato valutato come % di superficie coperta a periodi diversi dall'impianto. I risultati ottenuti hanno mostrato in entrambi i tipi di strutture una diminuzione media della temperatura estiva diurna più elevata fino a 3° C - 5° C nell'intercapedine sotto i moduli rispetto al valore atmosferico quando la copertura da parte delle piante raggiungeva il 70% - 100% della superficie (seconda e terza estate dall'inizio dell'impianto). Il modulo realizzato con un insieme di cinque specie di Crassulaceae, caratterizzate da altezza ridotta e propagazione vegetativa, ha presentato una velocità di crescita tappezzante, resistenza ai fattori climatici e sopravvivenza più elevata rispetto ai moduli realizzati con specie di Lamiaceae. In conclusione, i risultati indicano la resistenza nel tempo e sostenibilità di coperture verdi realizzate con insiemi di piante succulente indigene e l'utilizzo di ammendanti organici. Il consistente effetto delle coperture verdi sulla riduzione della temperatura sulla superficie dell'edificio fa ipotizzare un effetto positivo sulla mitigazione del fenomeno urbano di "isola di calore" e sulle temperature dell'aria degli ambienti interni in climi Mediterranei.

Parole chiave: Crassulaceae, tetto verde, substrato *soilless*, compost, biochar, Lamiaceae

1. INTRODUZIONE

1.1 Le coperture a verde: stato dell'arte

La rapida urbanizzazione degli ultimi decenni ha comportato perdita di suolo e di biodiversità rendendo le aree urbanizzate luoghi poco accoglienti e salutarì. Le installazioni di sistemi vegetali, utilizzati come coperture di parti strutturali di edifici rappresentano sistemi innovativi per migliorare non solo l'aspetto estetico delle città ma per fornire vantaggi ambientali. I sistemi verdi possono essere installati su pareti esterne ("Vertical Greenery System", VGS) o su tetti e terrazzi ("green roof", GR) utilizzando specie vegetali, aventi caratteristiche rampicanti e/o ricadenti, aggrappate direttamente o indirettamente tramite supporti verticali o orizzontali di sostegno alla muratura. Le civiltà della Mesopotamia hanno realizzato le prime strutture di giardini pensili sulle coperture degli edifici e Greci, Romani, Persiani hanno inserito negli edifici qualche forma di struttura verde per abbellire e rinfrescare i loro ambienti urbani spesso eccessivamente caldi. Coperture di torba sono state utilizzate nelle zone del Medio Oriente per secoli e tetti inerbiti hanno a lungo abbellito le antiche case in Scandinavia e Islanda, fornendo isolamento supplementare nei climi freddi e umidi. La natura è l'ispirazione per i tetti verdi: i semi spontanei germinano in substrati sottili, sporchi, rocciosi ed inospitali, nelle grondaie e su tratti di tetto piatti e ampi.

In epoca moderna, i tetti verdi sono stati realizzati in varie zone del Nord Europa e maggiormente in Germania, in zone rurali e agricole. La loro costruzione e l'uso erano puramente funzionali (Dunnett e Kingsbury 2004; Getter e Rowe 2006). Alla fine del 1800 e agli inizi del 1900, l'uso di calcestruzzo nella costruzione di tetti piani, o terrazzi, è aumentato in Europa e negli Stati Uniti. Ciò ha portato allo sviluppo di diversi "tetti naturali" a Parigi, Colonia, Londra e Chicago. Nel corso del 1930, iniziò la costruzione di un tetto verde a New York sull'edificio Rockefeller Plaza, considerato tra le prime installazioni in Nord America. Dopo la seconda guerra mondiale, quando Svizzera, Germania, Austria e altri paesi hanno intrapreso la campagna di ricostruzione, le coperture verdi sono state largamente utilizzate per scopi pratici, ambientali ed estetici. In Germania nel 1989 erano stati realizzati m^2 1.000.000 di tetti verdi e tale superficie è decuplicata nel 1996. Recenti stime indicano che tra il 12 % ed il 15 % dei tetti piani in Germania presentano rivestimenti verdi (GRHC 2005; Snodgrass e Snodgrass 2006).

1.2 Vantaggi ambientali delle coperture a verde

Le coperture con essenze vegetali di tetti e terrazzi, comunemente chiamate “tetti verdi”, forniscono numerosi benefici ambientali in funzione dei quali possono essere considerati servizi ecosistemici (Obendorfer *et al.* 2007). Un’importante funzione è l’aumento della biodiversità, che si verifica in seguito all’introduzione di superfici verdi in aree densamente urbanizzate. Essendo spesso inaccessibili al pubblico, le superfici verdi possono infatti fornire un habitat indisturbato per microrganismi, insetti ed uccelli e rappresentare un’alternativa per la sopravvivenza di flora e fauna indigena (Brenneisen, 2004). Il tetto verde può rappresentare un substrato adatto per la colonizzazione da parte di piante indigene. Uno studio di Bates *et al.* (2013) nel Regno Unito, ha valutato lo sviluppo della vegetazione su due tetti verdi inizialmente seminati con un miscuglio di semi di 25 specie erbacee, riscontrando dopo 4 anni un significativo aumento di colonizzazione da parte di specie spontanee ed un numero totale di ben 59 diverse specie. Uno studio sulla biodiversità effettuato su diciassette tetti verdi in Svizzera ha identificato in tre anni 78 specie di ragni e 254 specie di scarabeo dei quali il 18 % e l’11% di ogni gruppo erano stati elencati come rari od in via di estinzione (Brenneisen, 2003). La realizzazione di tetti verdi può essere inserita nei programmi di ripristino della natura per contrastare la distruzione degli habitat dovuta all’aumento degli insediamenti urbani (Francis e Lorimer, 2011).

Un considerevole vantaggio ambientale dei tetti verdi è il miglioramento della qualità dell’aria tramite la cattura di gas serra e particolato atmosferico (Yang e Gong 2008). Le piante infatti sequestrano carbonio nella massa vegetale tramite l’utilizzo di CO₂ per la funzione clorofilliana mentre la superficie delle foglie trattiene il particolato, che può essere poi dilavato o assorbito nei tessuti vegetali. Alcuni studi in Hong Kong hanno riscontrato un abbassamento della concentrazione di CO₂ del 2% in relazione alla presenza di tetti verdi (Li *et al.* 2010). Liesecke e Borgwardt (1997) hanno dimostrato un effetto della vegetazione dei tetti verdi sulla riduzione dell’inquinamento atmosferico causato dai motori diesel. Un importante servizio ecosistemico fornito dalla presenza di tetti verdi è la riduzione del deflusso delle acque piovane, che vengono trattenute nei substrati o nella vegetazione per essere poi restituite all’atmosfera mediante i fenomeni di evapotraspirazione. Kolb (2004) riporta che il 45% di tutte le acque piovane può essere riciclato in questo modo. I tetti verdi possono ridurre il deflusso delle acque piovane dal 60% al 100%, a seconda del tipo di copertura (De Nardo *et al.*, 2005; Moran *et al.*, 2004; VanWoert *et al.*, 2005a) ed avere quindi una funzione nel contenere i fenomeni di allagamento in aree urbane. Le coperture verdi hanno un effetto di protezione per i supporti ed i materiali rispetto all’esposizione al

calore ed alla radiazione ultravioletta che possono danneggiare soprattutto le membrane bituminose dei tetti tradizionali. Le coperture verdi infatti riducono le fluttuazioni di temperatura tra giorno e notte, riducendo lo stress dovuto da espansioni e contrazioni giornaliere delle membrane isolanti. Connelly e Liu (2005) hanno valutato che le fluttuazioni diurne per un tetto tradizionale possono arrivare fino a 50 °C, mentre quelle di un tetto verde soltanto di 3 °C. Un importante effetto ambientale è l'effetto di mitigazione delle temperature estive dovute ai fenomeni di evapotraspirazione da parte delle piante. Inoltre i rivestimenti vegetali a copertura di pareti in muratura, possono contribuire alla loro protezione contro gli agenti atmosferici e quindi aumentarne la durata nel tempo (Capiotti et al., 2013). Peck et al. (1999) hanno stimato che la mitigazione delle temperature può estendere la vita utile delle membrane isolanti di due o tre volte. Infine vengono anche riconosciuti dei benefici estetici e psicologici sia per coloro che usufruiscono direttamente delle funzioni del verde, sia per coloro che indirettamente godono del miglioramento dell'ambiente dovuto all'introduzione delle piante negli elementi architettonici (Sutton, 2014).

1.3 Struttura delle coperture a verde

1.3a Elementi strutturali

Una copertura verde si realizza tramite il sistema multistrato ed un esempio schematico tipico è riportato nella Figura 1. Le caratteristiche dei materiali e modalità di costruzione sono specificate dalle normative in vigore nei singoli paesi. Partendo dalla superficie dell'edificio troviamo: il solaio, lo strato isolante e anti-vapore, una guaina impermeabilizzante ed un elemento rigido di supporto e drenaggio, la membrana filtrante, il substrato di crescita e la vegetazione.

Il solaio dell'edificio che ospita il tetto verde può essere costruito in cemento, legno, metallo, plastica o gesso. Il legno ha meno forza strutturale rispetto a cemento e metallo, materiali scelti in molti progetti commerciali, per questo richiede tecniche ingegneristiche aggiuntive per supportare un tetto verde. Le costruzioni con solaio in cemento sono le migliori candidate per accogliere un tetto verde poiché esse sono più resistenti fin dalla base e quest'ultima non degrada insieme al tetto nello stesso modo in cui lo fa il legno. I solai in metallo sono solitamente ondulati e, sebbene resistenti e meglio adatti ai tetti verdi, richiedono un supporto per la membrana impermeabilizzante poiché è richiesto l'isolamento. Questo supporto è solitamente installato sopra al solaio ondulato ed è in grado di sostenere il peso del tetto verde.

Al di sopra del solaio viene posta una membrana impermeabilizzante che deve essere costituita da materiali che garantiscano un'efficienza del 100% nel tempo. Sono possibili diversi tipi di impermeabilizzazione, che può essere integrata col tetto: bituminosa, mono-strato e con applicazione liquida. Una tecnica impermeabilizzante aggiuntiva per i tetti verdi è rappresentata da membrane multistrato di materiali inorganici a base di plastica (PVC, gomma sintetica, ecc.) disponibili in fogli arrotolati con giunzioni termosaldate. Questo tipo di membrana deve anche avere una funzione anti-radice ed impedire la penetrazione delle stesse negli strati sottostanti.

Alcuni tipi di strutture prevedono l'installazione di uno strato di materiale sotto la membrana impermeabilizzante, oppure sopra di essa (metodo conosciuto con il nome di "inverted roof membrane assembly system"- IRMA). Le strutture IRMA consistono in un solaio, una membrana impermeabilizzante, l'isolante e poi gli altri strati della copertura verde. I vantaggi di questo sistema sono la protezione totale della membrana, ostacolo alla penetrazione meccanica del tetto, la mitigazione degli shock termici causati da significative variazioni di temperature al livello della

membrana ed inoltre il trend attuale nella costruzione dello strato isolante tende a portare l'isolamento in piccola parte al di fuori dello stabile per contrastare i problemi di muffa. Al disopra dello strato impermeabilizzante viene depositato uno strato protettivo che ha la funzione di barriera anti-radice. Se un solaio è fatto di materiale organico, la barriera anti-radice deve essere posta al di sopra della membrana impermeabilizzante per assicurare che la vegetazione non faccia breccia e comprometta l'intero sistema. Lo strato anti-radice è spesso composto da fogli di polivinilcloruro (PVC) o polietilene ad alta densità (PE-AD). Si possono utilizzare analogamente fogli di rame o altri impregnanti chimici.

Una copertura verde deve anche avere un impianto drenante ben funzionante che consenta l'eliminazione dell'eccesso di acqua dalle radici delle piante e dalla superficie del solaio il più velocemente possibile. Il drenaggio dell'acqua, nella maggior parte dei tetti estensivi, specialmente in pendenza e dove le precipitazioni sono limitate, può essere compiuto attraverso la scelta del substrato e di un elemento di supporto. Nei luoghi in cui c'è un eccesso di precipitazioni si possono utilizzare elementi rigidi forniti di fessure che vengono posati sulla guaina impermeabilizzante del solaio e che fungono da drenaggio e accumulo delle acque meteoriche. Tali strutture presentano piedini che formano intercapedini contribuendo all'isolamento della copertura dalle sollecitazioni termiche e meccaniche. L'effetto del trattenimento delle acque meteoriche è direttamente proporzionale allo spessore del substrato colturale, alla sua capacità di ritenzione e alla massa vegetale presente. Al di sopra dello strato rigido viene depositato un tessuto che accoglie il substrato colturale, che permette il filtraggio del liquido in eccesso ed evita il dilavamento.

Per consentire lo sviluppo della vegetazione, la copertura a verde ha bisogno di un substrato di crescita che abbia una buona resistenza alla compattazione, porosità, che sia in grado di far ancorare le piante, trattenere l'umidità, l'ossigeno ed i nutrienti. Il miscuglio esatto va determinato considerando le condizioni climatiche del sito, i carichi ammissibili, le esigenze di drenaggio e le caratteristiche delle piante. I tetti verdi di tipo estensivo hanno di solito una componente inorganica predominante ed una frazione organica che varia dal 6 % all' 8 % a seconda del tipo di copertura. In alcuni prodotti commerciali, la densità a saturazione è di 1350 kg/m^3 (Agriterram^{TVS} Perlite Italiana) mentre la porosità totale varia dal 60 % al 70 % v/v. Sono stati sviluppati numerosi substrati "soilless" specifici per tetti verdi, con materiali normalmente utilizzati per la crescita di piante fuori suolo in serra. Per la componente inorganica viene utilizzata una vasta gamma di materiali: perlite, argilla espansa, pomice, lapillo, zeolite, scisto, ardesia. Particolare interesse per la sostenibilità delle strutture riveste l'utilizzo di materiali di risulta come tegole o mattoni frantumati (Ondono et al., 2014). Per la componente organica vengono utilizzate torba, corteccia o

ammendanti sostenibili quali il compost (Olszewski, 2010) ed il biochar ottenuto da pirolisi di materiale lignocellulosico.

In base allo spessore del substrato, alla vegetazione utilizzata ed alcuni accorgimenti costruttivi che ne favoriscono l'insediamento ed il pubblico utilizzo, è possibile classificare i tetti verdi in coperture verdi di tipo intensivo, semi-intensivo ed estensivo a seconda della profondità del substrato che permette di coltivare diverse tipologie di piante. I tetti verdi di tipo semi-intensivo e intensivo possono avere profondità da cm 20 a m 1, hanno un aspetto simile a quello di un giardino convenzionale e richiedono una regolare manutenzione. Possono ospitare diverse tipologie di piante, da specie erbacee a piccoli arbusti fino ad arrivare a piccoli alberi. Possono essere utilizzate anche piante tappezzanti a crescita orizzontale che pur richiedendo minima manutenzione, contengono i costi ed il peso gravante sulla struttura. Inoltre permettono una maggiore scelta di specie da utilizzare e presentano di solito una maggiore biodiversità. Le coperture verdi estensive hanno uno spessore del substrato compreso tra cm 6 e cm 15 e sono realizzate con tappeti erbosi e specie a propagazione vegetativa e crescita prostrata. La scelta varietale per queste tipo di coperture deve tenere conto del limitato spessore di substrato che restringe di fatto le possibilità all'impiego di piante poco esigenti e resistenti ai fattori ambientali. I tetti verdi estensivi richiedono minima o nulla manutenzione, con eventuale irrigazione nel periodo di attecchimento della vegetazione ma non sono realizzati per l'uso regolare dell'uomo. Solo se le strutture dello stabile sottostante lo consentono, possono essere incorporati spazi con percorsi usufruibili e bacini di raccolta dell'acqua.

1.3b La normativa sulle coperture a verde

La normativa sulla costruzione dei moderni tetti/coperture verdi ha avuto origine e si è sviluppata in Nord Europa. In Germania sono state sviluppate le linee guida per la pianificazione, costruzione e mantenimento delle coperture verdi già nel 2002, successivamente aggiornate nel 2008 (Roof-Greening Working Group 2008) e che hanno rappresentato un punto di riferimento per le normative di altri paesi europei. In Italia la realizzazione di verde orizzontale è regolamentata dalla normativa UNI 11235/2007, avente come obiettivo “la progettazione, l’esecuzione, il controllo e la manutenzione delle coperture a verde pensile”, aggiornata dalla recente norma UNI 11235/2015. Più recentemente la deliberazione emessa dal Ministero dell’Ambiente-Comitato verde pubblico (Deliberazione 1/2014) ha riconosciuto alle opere a verde l’ammissione alla fruizione dei benefici fiscali nell’ambito della normativa sull’efficienza energetica. La norma UNI 11235, considera il verde pensile un “sistema tetto” in tutta la sua completezza, prende in considerazione tutti gli elementi che possono comporre la sua stratigrafia e ne definisce i requisiti minimi. Per ognuno degli elementi vengono descritte le tipologie accettabili e le prestazioni che devono soddisfare. Il valore di ogni caratteristica viene espresso in funzione di una norma di riferimento che a sua volta definisce le procedure per la determinazione della caratteristica stessa. Un elemento può svolgere più di una funzione, come avviene per un manto impermeabile che può svolgere sia la funzione di tenuta all’acqua che quella di barriera alla penetrazione delle radici. Nella parte iniziale della norma vengono definiti i criteri progettuali tra cui gli obiettivi e le funzioni che svolgono le coperture a verde, il tipo di fruibilità della copertura ed i suoi carichi comprendenti sia la vegetazione che gli eventuali oneri manutentivi. Da tenere in considerazione anche le prestazioni interne dell’edificio, in particolare le capacità di isolamento termico ed acustico, e quelle esterne, tra cui la mitigazione del fenomeno “isola di calore”, la regolazione del deflusso delle acque piovane e l’assorbimento delle polveri sottili. In fase di progettazione si deve tener conto della compensazione ambientale ovvero della capacità della copertura di armonizzarsi col sistema architettonico in cui è inserita. Uno dei benefici importanti di una copertura a verde può essere quello legato al possibile valore ecologico che può assumere. L’analisi del contesto, durante la fase progettuale, va effettuata dal punto di vista climatico e territoriale, in relazione alla definizione dello schema funzionale della copertura e della tipologia vegetativa. In corso di realizzazione il progettista deve tener conto di diversi agenti tra cui quelli idrici, biologici, chimici, termici e radiativi oltre ai carichi permanenti ed i sovraccarichi variabili. Allo stesso tempo deve valutare i requisiti della copertura e le capacità di diversi fattori tra cui: la capacità agronomica, quella drenante e di aerazione dello stesso strato, la

capacità di accumulo idrico e di aerazione dello strato culturale e la resistenza agli attacchi biologici. La progettazione dell'elemento portante, dello strato termoisolante, dell'elemento di tenuta dell'acqua e di protezione dall'azione delle radici vanno considerati di primaria importanza (ISPRA, 2012). La nuova norma UNI 11235/2015 sul verde pensile integra e aggiorna la precedente rappresentando un documento più dettagliato. Infatti la versione del 2007 si componeva di 42 pagine mentre l'attuale ne conta 66 ed è maggiormente indirizzata alle questioni progettuali e prestazionali del sistema. I capitoli: 5. Istruzioni per la progettazione, 8. Materiali e componenti, 9. Istruzioni per l'esecuzione e l'installazione, 10. Controlli (in precedenza intitolato *Collaudi*) e 11. Manutenzione, nell'ultimo aggiornamento risultano largamente rivisti. Un'importante novità riveste il fatto che fin dall'introduzione vengono esplicitati i benefici che devono essere apportati dai sistemi a verde pensile e che ricadono in tre macro-categorie specifiche: la pianificazione urbana, il valore ecologico e la tutela economica e ambientale. E' interessante notare che un capitolo fortemente modificato è il quinto, al paragrafo 5.3, dal titolo: "Progettazione dei requisiti". In tale contesto vengono indicate le caratteristiche progettuali inerenti la realizzazione di tetti verdi e giardini pensili (capacità agronomica, controllo della capacità drenante e della gestione delle acque meteoriche, areazione, accumulo idrico) introducendo alcuni parametri funzionali di grande importanza per il sistema: MT (massima acqua trattenuta), CI (contenuto intermedio), PA (punto di appassimento), UT (rapporto di utilizzabilità), APD (acqua a potenziale decrescente), EF (rapporto di efficienza), livello di manutenzione della vegetazione, resistenza agli attacchi biologici ed ai microrganismi. Il nuovo testo rivede anche le tabelle relative alla quantificazione di massima della manutenzione annuale da dedicare all'apparato, inserendo alcune sottoclassi dipendenti dalle diverse tipologie di vegetazione: estensivo a minima manutenzione, estensivo a bassa manutenzione, intensivo a ridotta manutenzione, intensivo a media manutenzione ed intensivo ad alta manutenzione. In merito alla gestione del sistema, la normativa precedente contemplava solo i tipi estensivo e intensivo. Un'ulteriore novità riguarda l'attenzione alla tutela della biodiversità ambientale, tematica che oggi è imprescindibile rispetto agli obiettivi di sostenibilità globale. A questo tema è riservato il paragrafo 5.3.7 (attitudine alla biodiversità), in cui è affermato il fondamentale valore ecologico del verde pensile. Una delle porzioni più spendibili nell'ottica dell'applicabilità della norma alla fase progettuale da parte di tecnici e professionisti, si trova al paragrafo 5.4.3 (elementi, strati e impianti componenti il sistema), ove tramite una serie di dettagli-tipo vengono individuate soluzioni conformi focalizzate sui caratteri tipici di un sistema d'inverdimento pensile, ovvero: bordi in corrispondenza di una parete perimetrale, bordi in corrispondenza di lucernai, pozzetto di raccolta e scarico acque meteoriche, collegamenti tra copertura a verde e copertura pedonabile, bordo perimetrale, soluzioni con elemento termoisolante

posto sopra all'elemento di tenuta, soluzioni senza elemento termoisolante, soluzioni con strato di accumulo idrico e soluzioni con strato di accumulo idrico ed elemento termoisolante. Altre integrazioni degne di nota riguardano la manutenzione, prendendo in considerazione due nuove classi: manutenzione del sistema di drenaggio (11.3) e manutenzione degli impianti (11.5). Proprio quest'ultima è particolarmente dettagliata, in quanto vi si analizzano tutte le operazioni gestionali che possono riguardare gli impianti d'irrigazione e/o elettrici presenti. Nel paragrafo manutenzione di avviamento al controllo (11.2.1) viene fornito un esempio tabulare di piano di manutenzione indirizzato alla gestione in uso di un sistema a verde pensile secondo la UNI 11540/2014, ipotizzando anche delle possibili scadenze temporali su un arco di tempo annuale. La nuova norma presenta inoltre tre appendici in cui vengono dettagliati alcuni requisiti delle coperture a verde minimamente accennati in precedenza: l'appendice A (caratteristiche di progetto dello strato colturale), prende in considerazione tutti gli aspetti riguardanti le caratteristiche dello strato colturale, in vista di una sua adeguata progettazione ed esecuzione. L'appendice B (tipologie vegetazionali), descrive le forme vegetali maggiormente riscontrabili: le erbacee, le bulbose, le tuberose e rizomatose, gli arbusti, i rampicanti e ricadenti e gli alberi. L'appendice C (ulteriori informazioni e metodi di prova) fornisce indicazioni su come migliorare le *prestazioni* del fabbricato, in relazione ai seguenti obiettivi: controllo dell'isolamento acustico, assorbimento acustico, controllo delle polveri e della dispersione degli inquinanti, controllo del flusso di energia, determinazione sperimentale dei coefficienti di deflusso e afflusso, procedura di determinazione degli strati di accumulo idrico negli elementi porosi di sistema, strato colturale ed altri materiali porosi con capacità di ritenzione idrica (geotessili, materiali granulari, schiume).

1.4 La vegetazione per le coperture a verde

I fattori che contribuiscono all'insediamento ottimale della vegetazione in un tetto verde sono l'esposizione e la localizzazione geografica che condizionano le variazioni micro e macroclimatiche: le precipitazioni, l'umidità, la presenza di periodi di siccità, l'andamento termico, la ventosità. Tutti questi fattori vanno a formare una suddivisione per fasce climatiche e vegetazionali a cui vengono associate le piante più adatte. Il substrato su cui la vegetazione si sviluppa e la sua profondità, peso e composizione influenzano enormemente la scelta delle specie da introdurre. Altri fattori da tenere in considerazione sono le richieste del committente (budget, risultato finale, tipologia costruttiva), la richiesta di manutenzione, la sicurezza e l'accessibilità della copertura verde. Per ragioni estetiche, le erbacee perenni sono le piante più richieste nei tetti verdi estensivi. Offrono miglior colore, tessitura e mutevolezza stagionale, ma richiedono una certa profondità e umidità di substrato ed hanno inoltre una limitata tolleranza alla siccità e agli stress. Le specie annuali e stagionali pur non avendo il requisito di longevità richiesto per realizzare un progetto a costo conveniente, possono essere incorporate in aree specifiche, a condizione che il substrato abbia uno spessore adatto. Le annuali vengono ampiamente utilizzate in zone con precipitazioni che garantiscano più di mm 75 d'acqua al mese e possono essere utilizzate nei tetti verdi estensivi per colmare vuoti e fornire una rapida copertura durante la prima stagione di crescita oppure per una loro auto-disseminazione senza diventare invasive. Nella pratica sono maggiormente diffusi i tetti di tipo estensivo in quanto essendo più leggeri impattano meno sulla struttura dell'edificio, hanno minori costi di realizzazione e manutenzione ed in alcune condizioni ambientali non necessitano di irrigazione. In fase di progettazione si dovrebbero scegliere specie longeve con adeguata tolleranza al caldo estivo e stress ambientali e le specie a sviluppo prostrato e a propagazione vegetativa risultano le più adatte. La natura sempreverde delle coperture estensive ed il limitato spessore del substrato hanno indirizzato la scelta verso le specie succulente. Numerosi studi in ambiente continentale hanno dimostrato le buone capacità di specie della famiglia Crassulaceae per la realizzazione di coperture verdi. Il genere *Sedum*, caratterizzato da piante a crescita prostrata e ridotta altezza si adattano bene e presentano un numero elevato di specie tra le quali è stato possibile individuare genotipi adatti alla crescita in substrati con ridotto spessore, bassa somministrazione di fertilizzante, resistenza al freddo, diversi valori di pH e regimi di irrigazione (Getter and Bradley, 2009; Nagase & Dunnet, 2010; Clark & Zheng, 2012; Zheng & Clark, 2013). Lavori sperimentali hanno dimostrato che l'utilizzo di un elevato numero di specie migliora il successo della copertura verde. Nagase e Dunnet (2010) utilizzando combinazioni di 12 specie comprendenti piccoli arbusti da fiore (*Armeria maritima*, *Origanum vulgare*, *Prunella vulgaris*, *Silene uniflora*, *K. macrantha*, *T. flavescens*), specie di *Sedum* e Graminaceae perenni hanno

dimostrato che la maggiore ricchezza di specie garantisce una migliore adattabilità alla siccità e resistenza nel tempo della copertura verde.

Nei climi mediterranei la siccità estiva ed il freddo invernale rendono più difficile la scelta delle piante per le coperture a verde. In climi caratterizzati da estati aride ed alte temperature, le specie succulente sono state considerate tra le più adatte e specie del genere *Sedum* vengono comunemente utilizzate (Dunnet and Kingsbury, 2008) (Cook- Patton and Bauerle, 2012). Vahdati et al. (2017), nel clima arido con freddo invernale di una regione in Iran, hanno utilizzato con successo *Sedum spurium* e cespugliose perenni con fioriture stagionali: la succulenta *Carpobrotus edulis*, la graminacea *Agropyron crisatum* e le tappezzanti *Frankinia thymifolia*, *Potentilla sp.* e *Vinca sp.*. In clima mediterraneo Ferrante et al., (2016) hanno eseguito sperimentazioni utilizzando per coperture verdi miscugli di specie di *Sedum* ed altre piante succulente cespugliose esotiche quali *Phyla nordiflora* (Verbenaceae), *Gazania uniflora*, *Gazania nivea* (Asteraceae), *Aptenia lancifolia* e *Mesembryanthemum barbatum* (Aizoaceae). Savi et al. (2016) hanno proposto miscugli di arbusti mediterranei: *Cistus sp.*, *Prunus sp.*, *Salvia sp.* e *Ligustrum sp.*. L'utilizzo di specie autoctone per le coperture verdi è stato proposto e sperimentato con successo in vari ambienti in quanto la resistenza naturale agli stress di tali genotipi può essere un requisito per il successo dell'installazione, oltre che un contributo al mantenimento della biodiversità negli ambienti urbani (Emilsson, 2008; MacDonagh et al., 2006; Schroll et al., 2009).

Recentemente, Caneva et al. (2015) hanno redatto un database contenente 138 specie spontanee mediterranee con caratteristiche morfologiche e fisiologiche potenzialmente vantaggiose per la sopravvivenza in coperture verdi, valutando anche la capacità di copertura del substrato e la durata della fioritura. Il database comprende specie perenni, con fioriture dalle tonalità cromatiche che variano dal bianco al giallo, dal rosso al viola e che, se coltivate in combinazioni, permettono una copertura perenne e fioritura durante tutto l'arco dell'anno. Tuttavia la realizzazione di tetti verdi con specie indigene richiede ulteriori sperimentazioni per valutare le capacità di adattamento delle comunità di piante ai substrati "soilless" ed al micro - ambiente. Sulla base di dati sperimentali eseguiti su substrati per tetti verdi sono state individuate le seguenti specie cespugliose con buona adattabilità nelle condizioni climatiche mediterranee: *Achillea maritima*, *Armeria pungens*, *Anthemis maritima*, *Helichrysum italicum* e *H. stoechas*, *Ruta chalepensis*, oltre alle specie tappezzanti, *Sedum album*, *Sedum rupestre* e *Thymus serpyllum* (Bacci e Benvenuti 2010, Benvenuti e Bacci 2010, Provenzano et al. 2010a, 2010b). In una recente sperimentazione Benvenuti (2014) ha valutato 20 specie erbacee spontanee raccolte in Toscana, suddividendole in 4 gruppi a seconda del periodo di fioritura. Le specie con organi riproduttivi vegetativi ed i gruppi a fioritura precoce

(*Anemone hortensis*, *Crocus verus*, *Narcissus tazetta*) o tardiva (*Allium carinatus*, *Colchicum autumnale*, *Scilla autumnalis*) sono risultate le più persistenti, ma hanno presentato una bassa copertura nel periodo estivo. Sono comunque necessari ulteriori studi per l'ottimizzazione e la sperimentazione di insiemi di specie di diversa origine al fine di individuare le combinazioni adatte a diverse tipologie di substrato e coltivazione in coperture verdi di climi mediterranei.

1.5 Coperture verdi ed isolamento termico degli edifici

Le coperture verdi effettuano una funzione di mitigazione della temperatura dell'edificio tramite gli effetti di ombreggiamento, assorbimento di calore utilizzato per l'evapotraspirazione e le funzioni fisiologiche della massa fogliare (Eumorfopoulou e Aravantinis, 1998). Un effetto isolante è dovuto anche allo strato d'aria che si crea tra la copertura verde e la superficie muraria e lo strato d'aria presente all'interno della vegetazione, che hanno una funzione isolante sia nei periodi caldi che in quelli freddi. Negli ambienti urbani si assiste nel periodo estivo al fenomeno chiamato "isola di calore" o UHI (Urban Heat Island) che consiste nell'aumento della temperatura ambientale dovuto all'emissione di radiazione infrarossa dalle superfici degli edifici esposte al sole. Numerosi lavori hanno documentato una riduzione della radiazione infrarossa emessa da parte della massa fogliare delle piante, con un effetto di mitigazione della UHI (Susca et al. 2011). Il comportamento termico della copertura verde è dipendente dal tipo di piante, dallo spessore medio della coltre vegetale, dall'indice di area fogliare, dalla densità della vegetazione, dal coefficiente di trasferimento di temperatura e dal clima della regione studiata (Ahmadi et al., 2015).

In un clima continentale degli Stati Uniti, Getter et al. (2011) hanno monitorato per due anni i parametri termici relativi ad una copertura estensiva coltivata con *Sedum*, riscontrando un minor flusso di calore dall'edificio rispetto ad un tetto convenzionale, con una diminuzione media della temperatura di 5 °C nelle stagioni intermedie ed una diminuzione fino a 20 °C nei periodi più caldi. In Singapore, con clima tropicale, Wong et al. (2003) hanno monitorato i parametri termici di un tetto verde su un edificio valutando l'impatto di sei specie di piante diverse. Nelle ore più calde, la temperatura massima sulla superficie sotto la coltre vegetale era di 26°C, mentre la superficie senza copertura verde raggiungeva il massimo di 57°C. Lo stesso studio ha riscontrato una riduzione del flusso di calore verso gli ambienti interni sotto la copertura, con una diminuzione della temperatura del soffitto di 2 - 4 °C. Tale effetto è risultato dipendente dal tipo di morfologia fogliare, misurato come "Leaf Area Index" (LAI) con i valori più significativi per specie arbustive di maggiori dimensioni e biomassa fogliare (specie di *Amarillidaceae*, *Raphis sp.*, *Pandanus sp.*) rispetto a specie con una minore densità fogliare (*Heliconia sp.*, *Ophiopogon sp.*, *Erythrina sp.*). Studi in zone tropicali hanno dimostrato una buona capacità termica ed energetica del tetto verde estensivo realizzato con piante di *Sedum* (Morau et al., 2012). Nel clima mediterraneo del sud Italia (Cosenza), Bevilacqua et al. (2016) hanno compiuto osservazioni su un terrazzo in cemento ricoperto da un rivestimento bituminoso, riscontrando una diminuzione massima di 12°C della superficie in seguito all'installazione di un tetto verde di tipo estensivo con piante cespugliose di

bassa taglia a crescita tappezzante (*Diantus grantianopolitanus*, *Cerastium tormentosum*) e succulente (*Carpobrotus* sp.). Ancora in ambiente mediterraneo, El Bachawati (2016) ha valutato l'effetto di due tipi di coperture verdi sulla copertura in cemento, riscontrando una diminuzione delle fluttuazioni delle temperature ed una diminuzione della temperatura. Nelle condizioni climatiche mediterranee di Istanbul, è stato osservato che un inverdimento estensivo su mm 50 di spessore di substrati di coltivazione ha fornito una protezione termica per l'involucro edilizio contro gli effetti di temperature estreme (Ekşi e Uzun, 2013).

L'introduzione di coperture verdi con capacità di riduzione dei flussi di calore e coibentazione degli ambienti interni ha rivestito notevole interesse in seguito alle necessità di ridurre i consumi energetici in conseguenza di accordi internazionali finalizzati alla riduzione di emissioni di gas serra. Si stima che il settore edilizio sia responsabile del 35% del consumo globale di energia, con i valori massimi registrati nei paesi industrializzati (Ghaffarian Hoseini *et al.* 2013). Tra le soluzioni per il contenimento dei consumi energetici dovuti alla climatizzazione nel periodo estivo, un particolare interesse è stato rivolto all'introduzione di superfici ricoperte da piante sugli edifici. L'ottimizzazione dei parametri di esecuzione delle coperture a verde si inserisce nello sviluppo di tecnologie di edilizia sostenibili in grado di ridurre i consumi energetici. Tale funzione è stata riconosciuta dalla delibera emessa dal Ministero dell'Ambiente-Comitato verde pubblico (Deliberazione 1/2014) che ha concesso alle opere a verde l'ammissione alla fruizione dei benefici fiscali nell'ambito della normativa sull'efficienza energetica.

2. SCOPO DEL LAVORO

L'attività di studio, ricerca e sperimentazione ha avuto come obiettivo iniziale la valutazione e selezione di accessioni di Crassulaceae e la definizione di substrati di coltivazione “soilless” adatti alla realizzazione di coperture verdi nelle condizioni climatiche degli ambienti mediterranei. La seconda parte del lavoro ha previsto la valutazione dei parametri termici di moduli di coperture verdi installate su un terrazzo. È stata valutata la crescita di una collezione di 13 genotipi di Crassulaceae caratterizzate da sviluppo prostrato e resistenza alla siccità, comprendente accessioni raccolte in regioni Mediterranee o provenienti da collezioni, appartenenti ai generi *Sedum*, *Sempervivum* e *Aeonium*. I parametri di crescita delle piante sono stati valutati utilizzando substrati “soilless” con l'aggiunta di concentrazioni diverse di ammendanti organici (compost e biochar). Sono state utilizzate specie di Crassulaceae e Lamiaceae per la realizzazione di moduli di coperture verdi di tipo estensivo (substrati di altezza cm 8) e semi - intensivo (altezza cm 18) al fine di valutare i parametri termici delle strutture in relazione ai parametri ambientali ed allo stato di crescita delle piante. Le sperimentazioni sono state eseguite su un terrazzo presso il centro ENEA, Casaccia, Roma.

3. MATERIALI E METODI

3.1 Valutazione delle specie e substrati colturali

3.1.1 Valutazione di accessioni spontanee di Crassulaceae in substrati “soilless”

Sono state valutate le capacità di crescita tappezzante e di copertura di 11 ecotipi appartenenti a specie della famiglia Crassulaceae in substrati e condizioni colturali tipiche dei tetti verdi in ambiente mediterraneo. La lista e l'origine delle accessioni sono riportate in Tabella 1 e la Foto 1 mostra i caratteri morfologici. Gli ecotipi sono stati raccolti e classificati dalla dott.ssa Germina Giagnacovo. La collezione comprende nove accessioni raccolte nelle regioni adriatiche e tirreniche italiane ed in aree costiere della Slovenia e Croazia dei generi *Sedum* e *Sempervivum* e due provenienti dalla collezione dell'Orto Botanico di Viterbo, originari da climi tropicali e subtropicali (*Sedum palmieri* e *Aeonium*). I genotipi, caratterizzati da altezza ridotta e crescita prostrata, sono stati raggruppati in due tipologie morfologiche: la prima con crescita tappezzante per ramificazione di fusti ed aumento del numero di germogli e la seconda con foglie disposte a rosetta. Il substrato “soilless” è composto da una miscela di Agrilit 3 e Agriterram TVS TM (1:1 vol/vol) forniti dalla Perlite Italiana s.r.l. Milano. L'Agrilit 3 è costituito da perlite, con elementi di diametro mm 3-5 e l'Agriterram TVS TM è composto da torba, lapillo, pomice e fertilizzante a lento rilascio 16N-24P-12K. Le piantine sono state inizialmente propagate per talea in ambiente protetto e quindi trapiantate allo stadio di cm 3 in cassette di m² 0,14. Sono state effettuate tre repliche con 4 piante/cassetta. L'esperimento è stato condotto dal 15 maggio 2014 al 15 agosto 2014 e la valutazione della crescita tappezzante è stata effettuata periodicamente, sovrapponendo su ogni pianta una griglia con quadrati di lato cm 1 e contando il numero di quadrati corrispondenti alla superficie coperta, secondo metodologia riportata da Emilsson (2008).

3.1.2 Valutazione dell'aggiunta di ammendanti in colture di *Crassulaceae*

La sperimentazione ha avuto lo scopo di valutare l'effetto dell'aggiunta degli ammendanti compost e biochar alla miscela di substrato. Il compost fornito da UTTAMB-RIF (ENEA, Casaccia) è stato ottenuto da rifiuti alimentari usando una compostiera sperimentale di comunità Joraform JK 5100 con l'aggiunta del 20% di materiale cellulosico, in accordo con la regolamentazione in vigore. Il compost è stato analizzato dalla società AGRI-BIO-ECO Laboratori Riuniti (Pomezia) con metodiche accreditate e le caratteristiche sono riportate nella Tabella 2. I valori di metalli pesanti sono risultati conformi alla normativa vigente e non sono stati riportati. Il biochar fornito da Carbon Terra GmbH, Asburgo, Germania, con diametro delle particelle di circa mm 1-10, è stato ottenuto per pirolisi di vari tipi di legni duri e soffici, con il 40% di legno di quercia. Gli ammendanti sono stati aggiunti alla miscela sottraendo lo stesso volume di substrato inerte Agrilit3. Le piante sono state fornite dal vivaio Albani e Ruggeri, Viterbo.

Una prima sperimentazione è stata condotta in vasi da 1 litro, nei quali sono state trapiantate piantine di *Sedum reflexum* propagate per talea di altezza media cm 5. Gli ammendanti sono stati miscelati al substrato alle concentrazioni: compost 10% vol/vol; biochar 10% vol/vol; biochar 5% + compost 5% vol/vol. La sperimentazione è iniziata il 31 luglio e dopo 100 giorni dal trapianto, 4 piante per ogni trattamento sono state raccolte per la valutazione del peso fresco e secco della parte aerea. Le rimanenti piante sono state trapiantate in cassette di superficie m² 0,14 con profondità di cm 6 (4 piante/cassetta) e 3 repliche per trattamento. Le piante sono state allevate per un anno e periodicamente è stata valutata la superficie di copertura delle singole piante ed il numero di germogli/ pianta. Al termine della sperimentazione è stato valutato il peso della parte aerea delle piante. In una seconda sperimentazione, piantine di *S. acre* sono state trapiantate in vasi da 0,3 litri contenenti substrato "soilless" con compost e biochar alle seguenti concentrazioni: compost 5% e 10% vol/vol, biochar 5% e 10% vol/vol; biochar 5% + compost 5% vol/vol. La sperimentazione ha previsto un controllo senza ammendanti e sei repliche per ogni trattamento. Il trapianto è stato effettuato il 5 agosto 2014 ed il peso della parte aerea delle piante valutato dopo 120 giorni.

I risultati sono stati analizzati statisticamente con il metodo ANOVA utilizzando il software SPSS 15.0. Le differenze tra le medie sono state valutate con l' Independent t Test o il Test di Duncan.

Tabella 1. Accessioni di Crassulaceae e loro origine.

Accessione	Specie	Origine
SLO1	<i>Sedum sexangulare</i>	Pirano. (Slovenia) 0 m s.l.m
CRO1	<i>Sedum album</i>	Cherso (Croazia) 0 m s.l.m
MOL2	<i>Sedum acre</i>	Molise (Italia) 850 m s.l.m.
CRO2	<i>Sedum reflexum</i>	Lussino (Croazia) 0 m s.l.m
MOL3	<i>Sedum hispanicum</i>	Molise (Italia) 850 m s.l.m.
ST	<i>Sempervivum tectorum</i>	Molise (Italia) 850 m s.l.m.
VIT1	<i>Sedum rupestre</i>	Lazio (Italia) 326 m s.l.m.
VIT2	<i>Sedum sp.</i>	Lazio (Italia) 326 m s.l.m.
VIT3	<i>Sedum spurium</i>	Liguria (Italia) 1000 m s.l.m.
VIT4	<i>Aeonium castello-paivae</i>	Canarie (Spagna)
VIT5	<i>Sedum nussbaumerianum</i>	Messico



Foto 1. Morfologia delle accessioni di Crassulaceae raccolte in ambiente mediterraneo e coltivate su substrato “soilless”

Tabella 2. Caratterizzazione del compost

	CE	TOC	N	NH ₄ -N	NO ₃ -N	K	P	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
pH	mS/cm	%	%	%m/m	%	%	%	%	%	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg
7.40	69.300	44.2	2.6	0.07	0.001	1.6	1.0	1.13	0.14	0.14	154.80	13.90	180.80

3.2 Valutazione di crescita in colture miste

3.2.1 Moduli di coperture estensive con *Crassulaceae*

Sulla base delle precedenti sperimentazioni, sono state scelte tre accessioni spontanee di *Sedum palmieri*, *S. spurium*, *Sempervivum tectorum* e due provenienti da vivaio (*Sedum reflexum*, *S. acre*) caratterizzate dalle migliori capacità di crescita e resistenza ai fattori climatici, da utilizzare in coltura mista per la valutazione dei parametri di crescita in substrati “soilless” con e senza l’aggiunta di compost. Sono stati realizzati due moduli di coperture verdi di dimensioni 1,5 x 3,5 metri di tipo estensivo. L’elemento portante del modulo era costituito da una struttura rigida fatta da elementi quadrati di lato cm 50 in polietilene (Drainroof™, Geoplast s.p.a., Grantorto, Padova), con piedi di appoggio che formavano un’intercapedine di cm 6 rispetto alla superficie del terrazzo. Sul supporto, in successione, sono stati depositi uno strato di geotessile permeabile in poliestere, uno strato di Agrilit T3 ed uno strato di Agriterram™, in modo da raggiungere un’altezza del substrato di 8 cm. In uno dei due moduli è stato aggiunto al substrato compost 10% vol/vol., sottraendo lo stesso volume all’Agrilit T3. I moduli sono delimitati perimetralmente da una cornice di legno e forniti di impianto di irrigazione. Ogni modulo è stato idealmente suddiviso in quadrati di lato cm 50 ed in ognuno di essi sono state trapiantate nello stesso ordine le piantine dei cinque ecotipi. *Sempervivum tectorum*, caratterizzato da crescita a rosetta, è stato posto al centro di ogni quadrato. L’irrigazione è stata effettuata per aspersione da maggio a settembre per 3 giorni/settimana. Periodicamente sono state valutate la superficie di copertura e l’altezza di ogni pianta su quattro quadrati per ogni modulo fino al raggiungimento della completa copertura. La sperimentazione è iniziata il 4 luglio 2014 e dopo 250 giorni, al termine della stagione primaverile, è stata effettuata la raccolta della parte aerea delle piante per la valutazione del peso.

3.2.2 Moduli di coperture semi-intensive con specie arbustive (Lamiaceae)

E' stata valutata la crescita delle specie arbustive aromatiche della famiglia Lamiaceae: *Rosmarinus officinalis prostratus*, *Salvia officinalis* e *Thymus citriodorus* utilizzando varietà provenienti da vivai locali in condizioni che hanno simulato una copertura di tipo semi-intensivo, con e senza l'aggiunta di compost. La sperimentazione è stata condotta in un modulo di misura 1,5 x 3,5 metri con altezza del substrato di cm 18, utilizzando i materiali precedentemente descritti. Il modulo è stato diviso in due parti simmetriche per mezzo di un setto in legno ed in una delle due parti è stato aggiunto al substrato compost 10% vol/vol sottraendo lo stesso volume all'Agrilit 3. In ognuna delle due sezioni sono state coltivate le stesse combinazioni di piante: 6 piante di *Rosmarinus officinalis prostratus*, 4 piante di *Salvia officinalis* e 4 di *Thymus citriodorus*. Il trapianto è avvenuto il 5 luglio 2014 e dopo 130 giorni sono stati valutati i parametri di crescita delle piante. Per le piante di *Salvia officinalis* e di *Thymus citriodorus*, a crescita cilindrica, sono state misurate la circonferenza e l'altezza, mentre per le piante di *Rosmarinus officinalis prostratus*, a forma romboidale o poligonale, sono state misurate le diagonali ed i lati. I valori ottenuti sono stati utilizzati per calcolare la superficie del substrato coperta dalla "canopy" delle singole piante.

3.3 Valutazione dei parametri ambientali e termici dei moduli

Le valutazioni sono state effettuate su un modulo di tipo estensivo e due moduli di tipo semi-intensivo realizzati come precedentemente descritto. Il modulo di verde estensivo è stato realizzato aggiungendo al substrato compost 10% vol/vol e trapiantando 5 ecotipi di Crassulaceae come precedentemente descritto. I due moduli di coperture semi-intensive erano costituiti dalla struttura precedentemente descritta e da una seconda delle stesse dimensioni e substrato “*soilless*” sulla quale erano state trapiantate 16 piante di *Lavandula officinalis* e 16 di *Thymus vulgaris*. Le valutazioni di parametri termici dei moduli e dei parametri ambientali sono state effettuate tramite una stazione di rilevamento composta da sensori collegati ad un datalogger CR1000 (Campbell Scientific Inc), dotato di software specifico che ha permesso l’acquisizione e memorizzazione dati inviati a PC tramite collegamento alla rete Ethernet. Le misurazioni sono state registrate in continuo e le medie orarie riportate ad intervalli orari. I sensori erano costituiti da termo-coppie per la misura della temperatura dei substrati, dell’intercapedine sotto le strutture e della temperatura atmosferica. Trasduttori di conducibilità elettrica hanno effettuato la misura dell’umidità dei substrati ed un pirometro ha misurato la radiazione infrarossa emessa a livello della “canopy” sulla superficie delle strutture. La fornitura, taratura ed installazione della strumentazione è stata condotta dalla ditta Tecno El (Formello, Roma). L’alimentazione elettrica della strumentazione era fornita da un pannello solare. La Figura 1 riporta la sezione dei moduli e la posizione dei sensori e la Foto 2 mostra alcuni particolari della strumentazione applicata alle strutture.

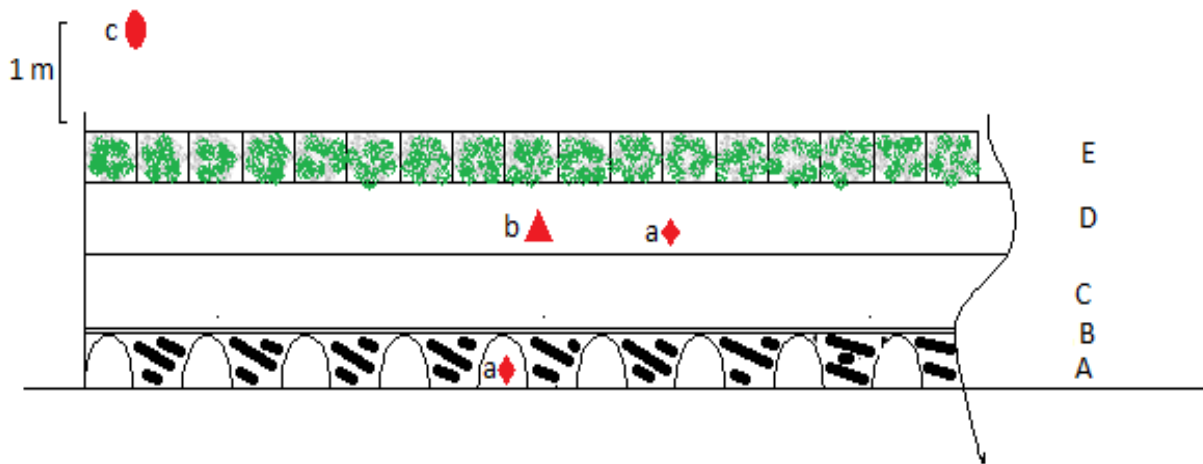


Figura 1. Sezione della struttura della copertura verde. A: Pannelli di supporto Drainroof TM (altezza cm 6); B: Geotessile (spessore mm 1); C: Substrato Agrilit T3 (spessore cm -9); D: Substrato AgriterramTM (spessore cm -9); E: Copertura vegetale.

a. Sensori di temperatura inseriti rispettivamente nel substrato (D) e nell'intercapedine sulla superficie del pavimento. **b.** Sensore di umidità del substrato. **c.** Sensore a raggi infrarossi (pirometro) per la misura della temperatura al di sopra della copertura vegetale.

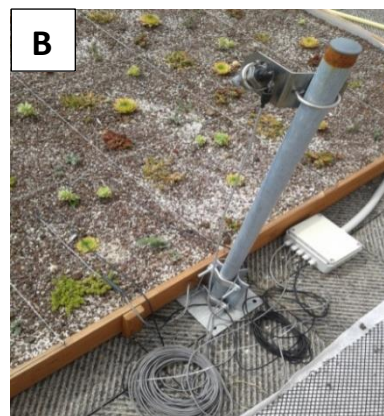


Foto 2. **A:** Modulo di verde semi-intensivo; **B:** pirometro per la misura della temperatura sopra la vegetazione del modulo di verde estensivo; **C:** sensori per la misura della temperatura e umidità del substrato; **D** :datalogger per la raccolta dei dati.; **E:** sensore per la misura della temperatura dell'aria e pannello solare per l'alimentazione elettrica del sistema

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Valutazione delle specie e substrati culturali

4.1.1 Valutazione di accessioni spontanee di *Crassulaceae* in substrati “soilless”

La superficie di copertura è stata rilevata periodicamente per ogni accessione ed i valori ottenuti sono stati utilizzati per il calcolo della percentuale media di copertura. La Figura 2A riporta i valori di percentuale di copertura di ogni accessione rilevata a sei intervalli dal trapianto, nel periodo primavera - autunno 2014. Tutte le accessioni raccolte da regioni mediterranee e caratterizzate da fusti prostrati hanno mostrato capacità di propagazione per talea e capacità di copertura superiore rispetto al gruppo con morfologia a rosetta. In particolare, CRO 1 (*Sedum album*) e MOL 2 (*Sedum acre*) hanno presentato la maggiore velocità di crescita, raggiungendo dopo 90 giorni una copertura del substrato rispettivamente del 45% e 35% della superficie disponibile mentre MOL 3 (*Sedum rupestre*) ha presentato una crescita molto contenuta rispetto alle altre (<10% della superficie). Nel gruppo con crescita a rosetta, *Sempervivum tectorum* (STE), raccolto in Italia, ha mostrato una maggiore velocità rispetto alle specie provenienti da ambienti tropicali e subtropicali e *Sedum nussbaumerianum* (VIT 5) non ha mostrato incremento di crescita nel periodo considerato. La Figura 2B riporta la valutazione della superficie di copertura delle accessioni caratterizzate da crescita con fusti prostrati a cinque periodi significativi di sviluppo. L'elaborazione statistica dei dati ha mostrato un incremento significativo di CRO 1 nelle osservazioni di estate e autunno 2014 che si è mantenuto nella primavera 2015, dimostrando una buona capacità nel superare il rigore invernale. L'incremento di MOL 2, pur presentando valori più elevati rispetto alle rimanenti accessioni, risulta statisticamente significativo nel periodo autunnale ma non nella primavera successiva dimostrando una maggiore suscettibilità alle condizioni climatiche invernali. La velocità di crescita tappezzante raggiunta da CRO 1 (*Sedum album*) e MOL 2 (*Sedum acre*) è buona rispetto alla normativa UNI 11235, che considera soddisfacente una copertura dell' 80% del substrato da parte delle piante dopo 12 - 15 mesi dall'inizio dell'impianto.

Le specie di *Sedum* sono comunemente utilizzate in coperture verdi di tipo estensivo per la loro capacità tappezzante, la facilità di propagazione, rusticità e resistenza alle avversità. Il metabolismo CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*), tipico di queste specie, consente di immagazzinare acqua

nelle foglie e quindi di resistere alla siccità per lunghi periodi (Ranson et al., 1960) e tale carattere può essere vantaggioso per la sopravvivenza nelle coperture verdi. Sperimentazioni eseguite in ambiente continentale hanno riportato una notevole variabilità tra le varie specie nell'adattamento a condizioni ambientali e la selezione di ecotipi spontanei locali può essere utile per il successo delle installazioni di tetti verdi (Monterusso *et al.* 2005, Oberndorfer *et al.* 2007). In Italia esistono circa trenta specie di *Sedum* (Pignatti 1982), diffuse da ambienti che vanno dal livello del mare fino ai 2000 m di altitudine, che rappresentano una variabilità genetica da esplorare per la selezione di genotipi adatti a tetti verdi in clima mediterraneo. La selezione di specie perenni indigene da utilizzare in tetti verdi in ambiente mediterraneo è stata già proposta da altri autori (Van Mechelen *et al.* 2014; Caneva *et al.* 2015) ed i risultati ottenuti in questo studio confermano i lavori precedenti.

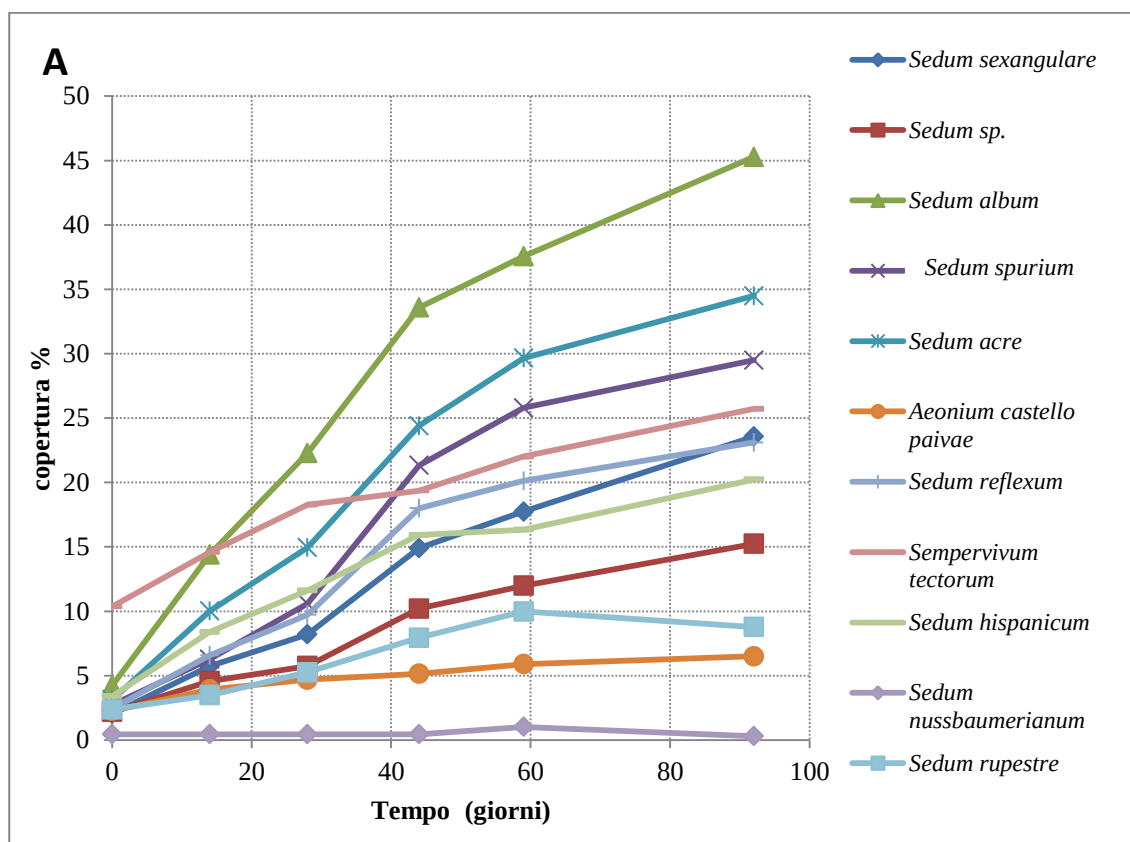


Figura 2A. Capacità di crescita tappezzante dei 11 accessioni di Crassulaceae a 6 intervalli dal trapianto. La crescita è stata valutata come % media di copertura della superficie disponibile. Ogni valore rappresenta la media di 3 contenitori con 4 piante ognuno.

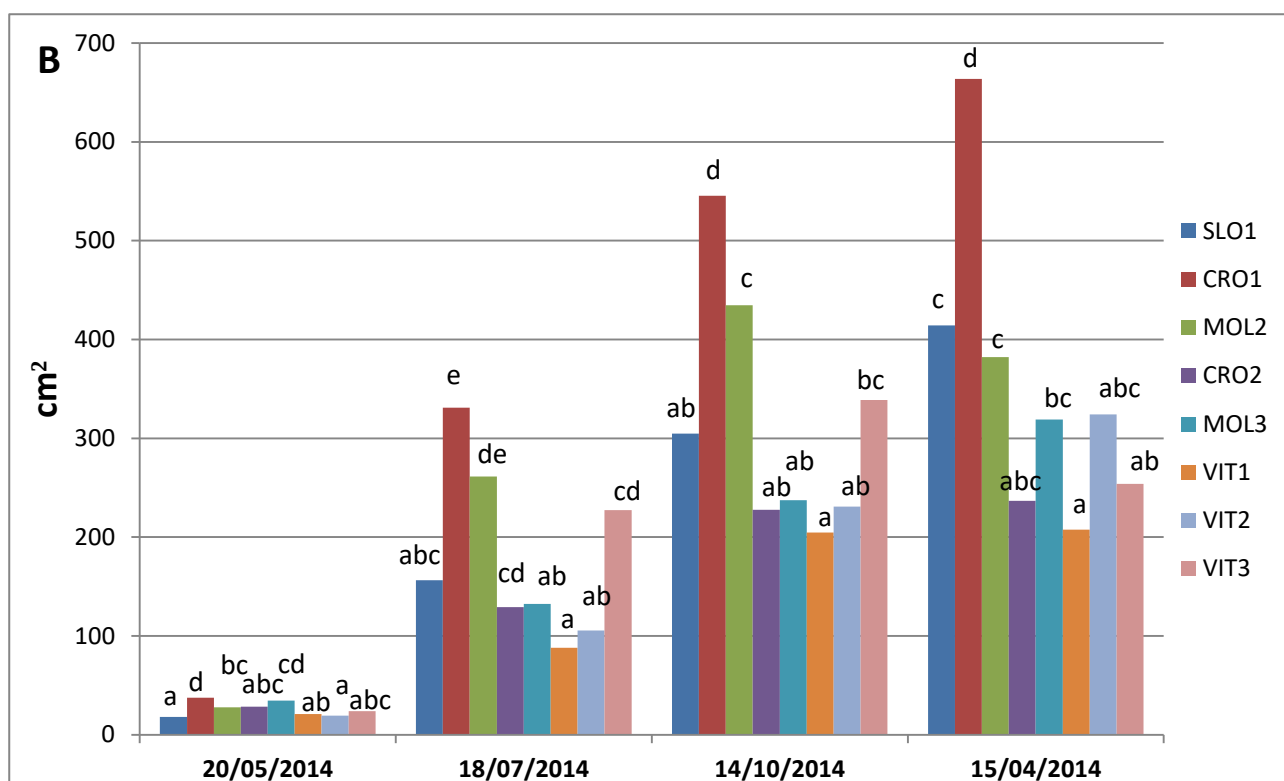


Figura 2B. Superficie di copertura media delle accessioni caratterizzate da crescita con fusti prostrati a 4 intervalli dal trapianto corrispondenti a periodi significativi di sviluppo (2014 – 2015). Le differenze tra medie caratterizzate da lettere diverse sono significative per $P = 0.05$ (Duncan's test).

4.1.2 Valutazione dell'aggiunta di ammendanti in colture di *Crassulaceae*

La Figura 3 riporta i valori medi di peso fresco e secco in piante di *S. reflexum* coltivate in vasi dopo 100 giorni dal trapianto e mostra un incremento nel trattamento con compost per il peso fresco rispetto al controllo, mentre il peso secco presenta un incremento sia per il trattamento compost che compost + biochar, anche se le differenze non sono statisticamente significative.

La Figura 4 riporta i risultati della crescita tappezzante delle piante a tre diversi tempi dal trapianto in cassette. La superficie media di copertura (Figura 4A) ha mostrato un incremento nel trattamento compost a 5, 57 e 116 giorni anche se le differenze tra medie non risultano statisticamente significative, mentre il numero di germogli non sembra seguire lo stesso andamento e non sembra mostrare incremento in seguito all'aggiunta di ammendante.

La Figura 5 mostra i valori medi dei pesi delle piante per ogni trattamento dopo 365 giorni dal trapianto. I risultati confermano l'andamento della Figura 3 e mostrano un incremento del peso fresco sia per compost che compost + biochar sia nel peso fresco che secco.

In tutte le osservazioni su *Sedum reflexum* sia di breve durata in vaso che di lunga durata in cassette, i trattamenti compost e compost + biochar presentano incremento della crescita ma le differenze non risultano statisticamente significative probabilmente a causa della disformità tra piante dovuta ad una differenza iniziale dovuta alla propagazione vegetativa. Il trattamento con il solo biochar non mostra mai incremento della crescita rispetto al controllo.

La Figura 6 riporta i valori di peso fresco e secco di piante di *S. acre* a 120 giorni dal trapianto in vaso con diverse concentrazioni di compost e biochar. I risultati mostrano un incremento di peso fresco e secco per il trattamento compost 5%, compost 10% e compost + biochar ma le differenze tra le medie sono significative per il compost 5%. Il peso secco mostra un incremento significativo solo per il compost 5%.

I risultati della valutazione delle specie ottenute da vivaio *Sedum acre* e *Sedum reflexum* sia negli esperimenti di breve durata, che negli esperimenti di durata annuale, hanno sempre mostrato un incremento della crescita delle piante, valutata sia come capacità di copertura che come peso fresco e secco, in seguito all'aggiunta di compost e compost + biochar. Tuttavia l'analisi statistica non ha sempre mostrato differenze significative e ciò può essere attribuito alla elevata disformità iniziale delle piante ottenute da propagazione vegetativa.

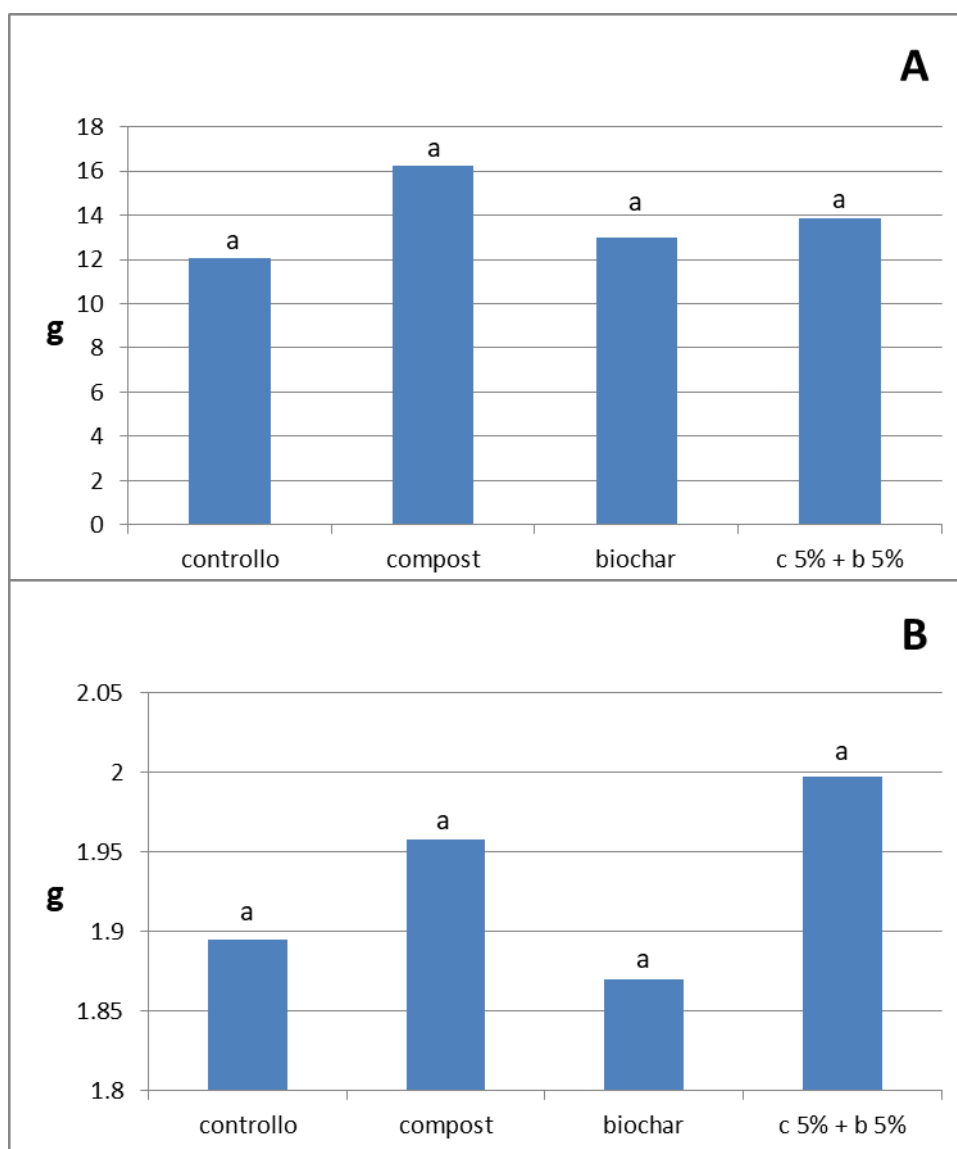


Figura 3. Effetto di ammendanti sul peso fresco (A) e peso secco (B) di *Sedum reflexum* coltivato in vasi a 100 giorni dal trapianto. Le differenze tra medie caratterizzate da lettere diverse sono significative per $P = 0.05$ (Duncan's test).

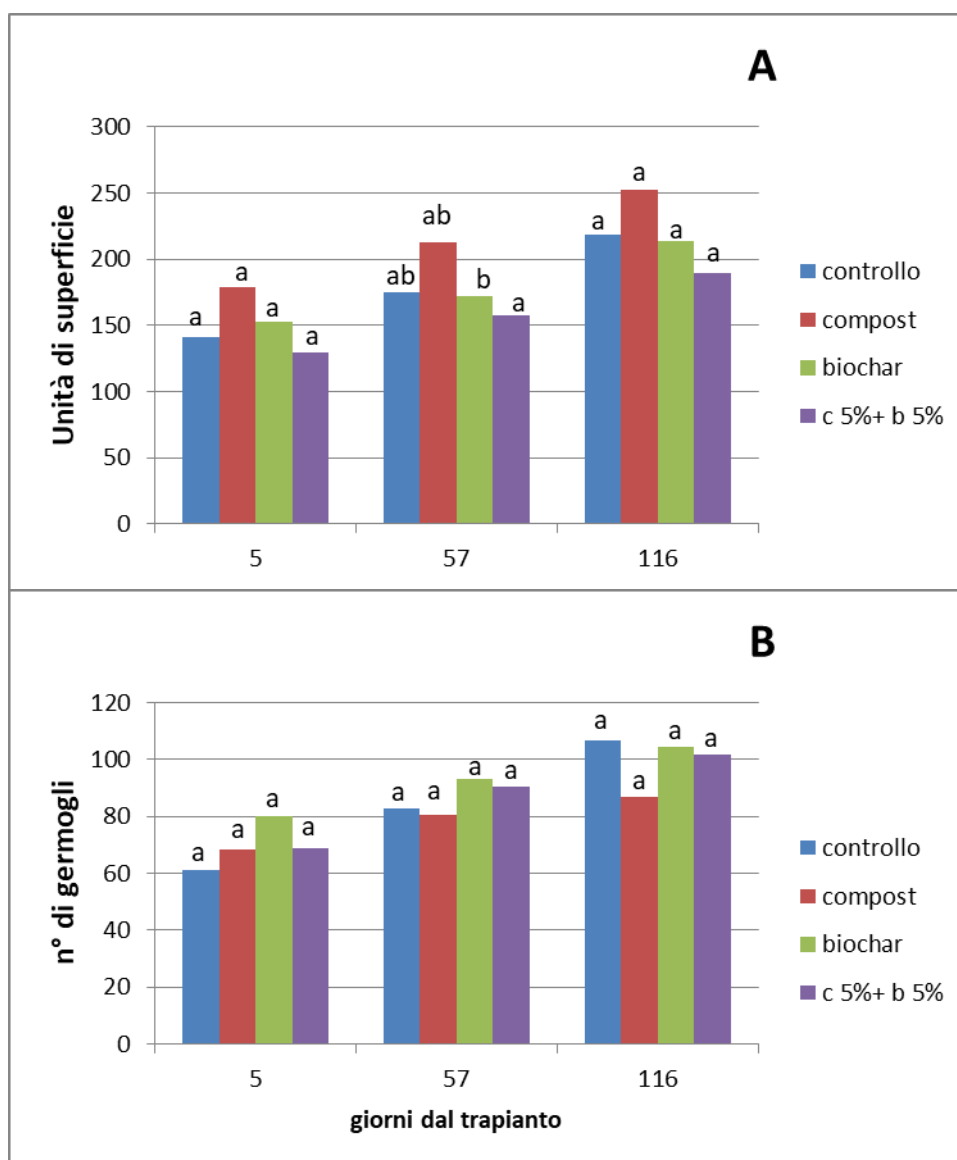


Figura 4. Crescita di *Sedum reflexum* coltivato in cassette a tre intervalli dal trapianto. **A:** Superficie coperta (Unità di superficie: quadrato di lato cm 1). **B:** Numero medio di germogli. Le differenze tra medie caratterizzate da lettere diverse sono significative per $P = 0.05$ (Duncan's test).

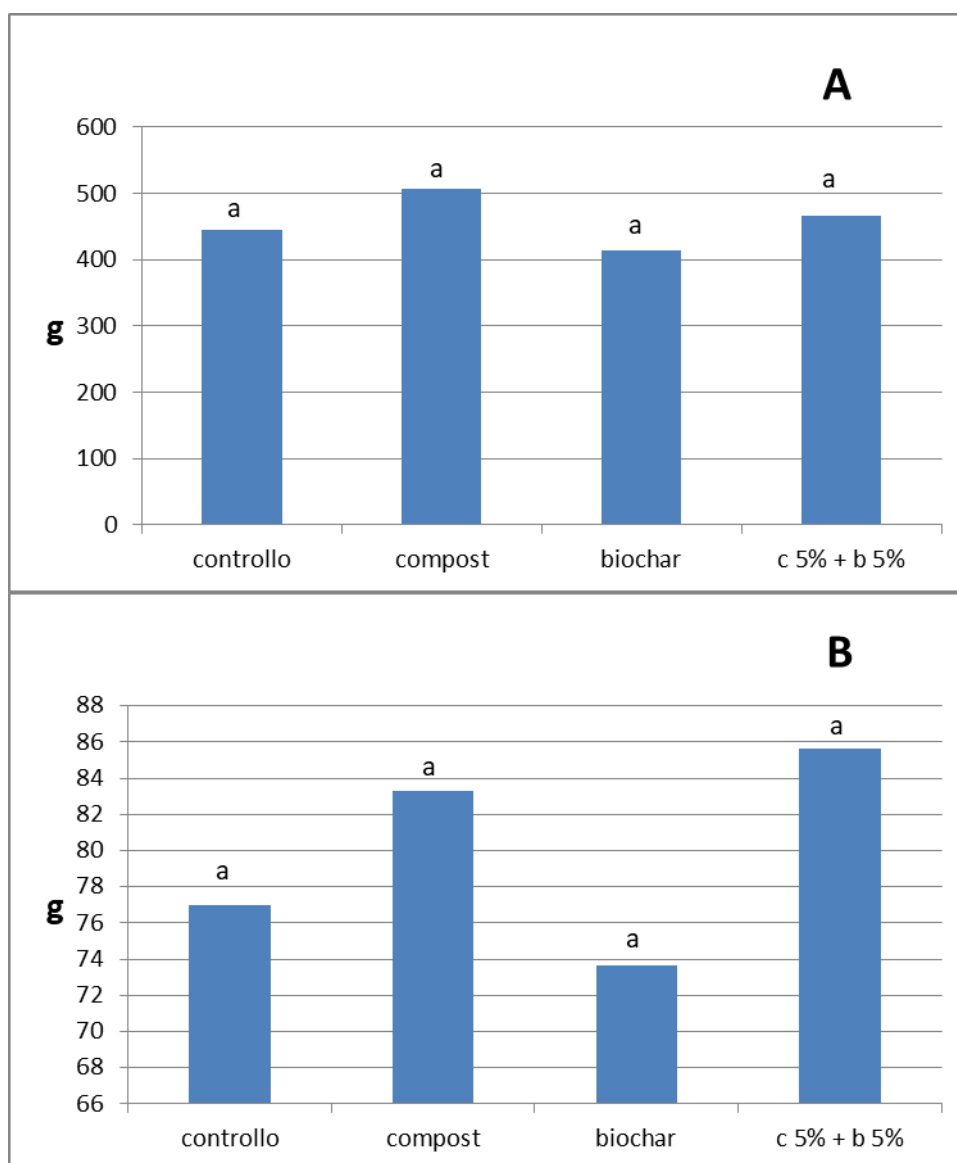


Figura 5. Effetto di ammendanti su *Sedum reflexum* coltivato in casse a 365 giorni dal trapianto. **A:** peso fresco, **B:** peso secco. Le differenze tra medie caratterizzate da lettere diverse sono significative per $P = 0.05$ (Duncan's test).

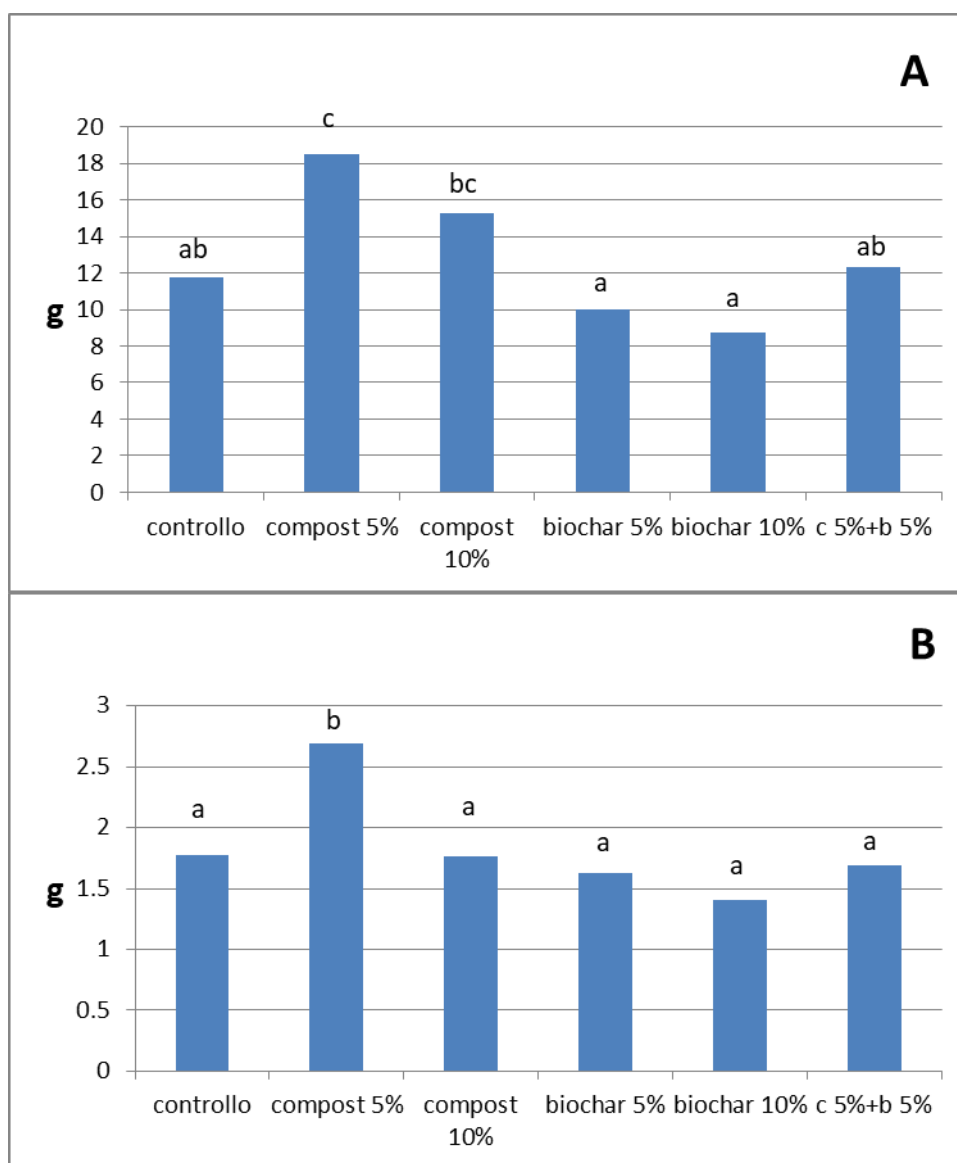
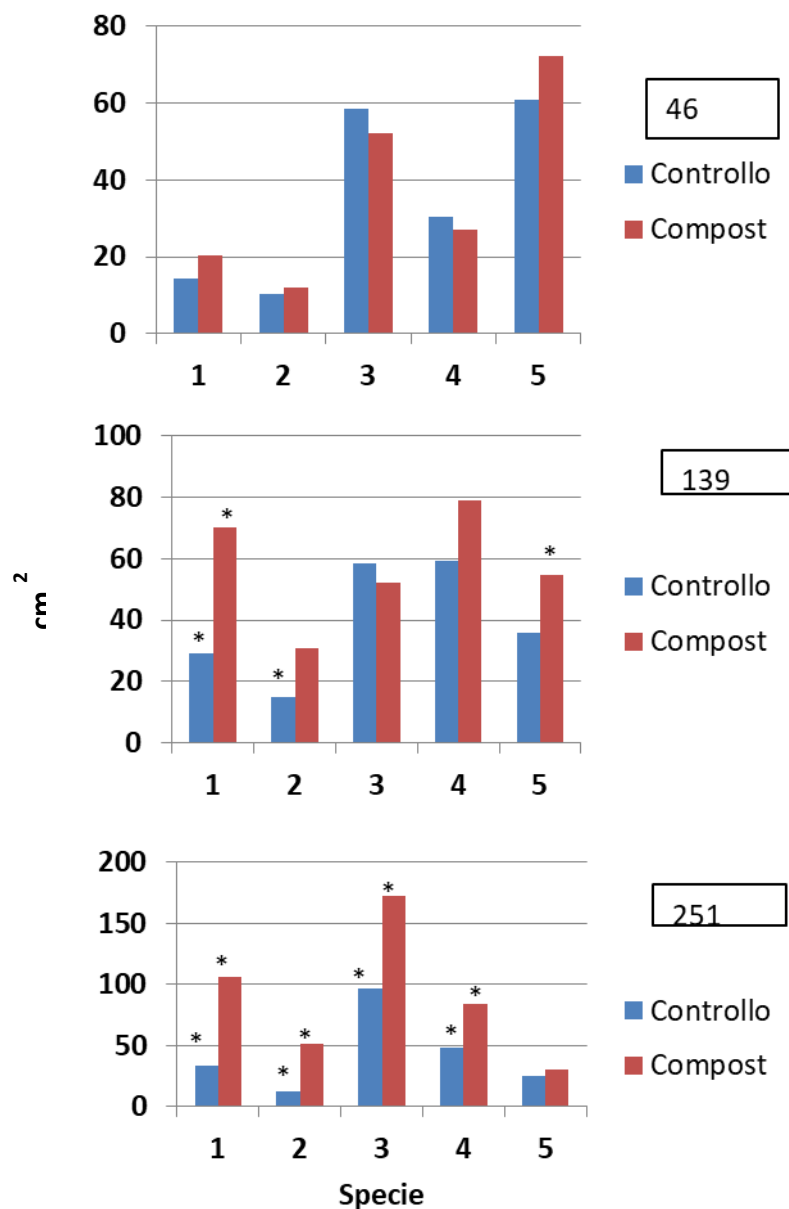


Figura. 6. Effetto del trattamento con compost, biochar e compost + biochar su *Sedum acre* coltivato in vasi a 120 giorni dal trapianto. **A:** peso fresco. **B:** peso secco. Le differenze tra medie caratterizzate da lettere diverse sono significative per $P = 0.05$ (Duncan's test).

4.2 Valutazione di crescita in colture miste

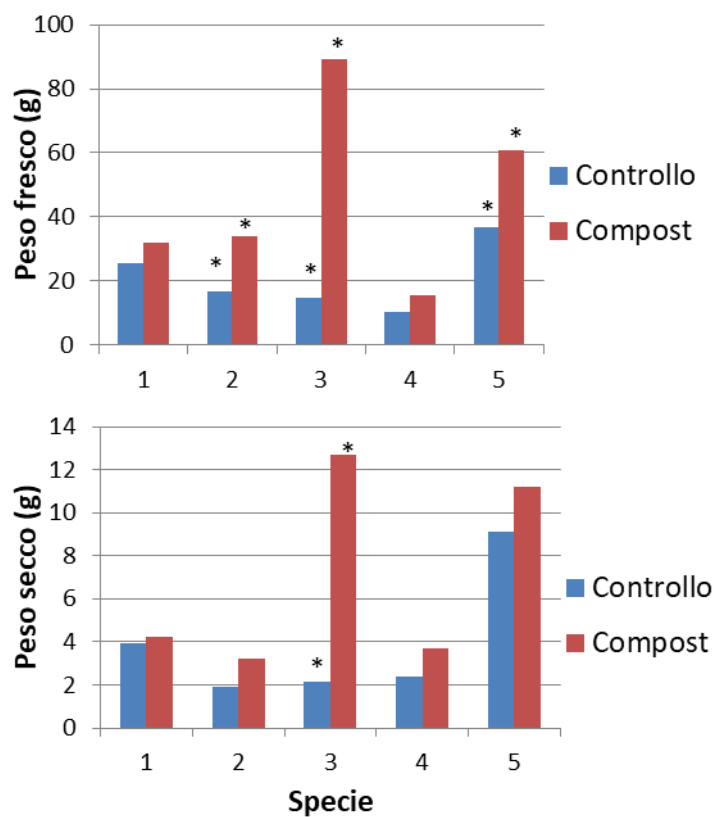
4.2.1 Moduli di coperture estensive con *Crassulaceae*

La Figura 7 riporta i risultati della crescita tappezzante di 5 specie in coltura mista e l'effetto dell'aggiunta di compost al substrato a tempi diversi dal trapianto. L'aggiunta di compost mostra un incremento della superficie coperta per *Sedum reflexum*, *Sedum palmieri*, *Sedum acre* e *Sedum spurium* sia a 139 che a 251 giorni, anche se risulta statisticamente significativo solo nell'ultima osservazione. Tali dati indicano che l'effetto positivo del compost sulla crescita tappezzante delle specie a sviluppo prostrato diventa significativo a 251 giorni, in quanto con l'aumentare del periodo di coltivazione, va esaurendosi l'apporto della concimazione minerale inizialmente presente nel substrato. La Figura 8 mostra i valori di peso fresco e secco delle 5 specie dopo 251 giorni e mostra un effetto positivo del compost con differenze significative per il peso fresco di *S. palmieri*, *S. acre* e *Sempervivum tectorum* e per il peso secco in *S. acre*. Figura 9 mostra per ogni specie l'incremento della crescita a 5 tempi diversi valutato come rapporto tra la superficie coperta al momento di ogni osservazione e quella della prima osservazione (14 giorni). I dati indicano un effetto positivo del compost sulle capacità di ripresa delle singole specie dopo lo stress invernale (osservazioni a 139 e 251 giorni). La specie *Sempervivum tectorum*, caratterizzata da crescita a rosetta, non ha presentato incremento di superficie di copertura in seguito all'aggiunta di compost ma un incremento significativo di peso.



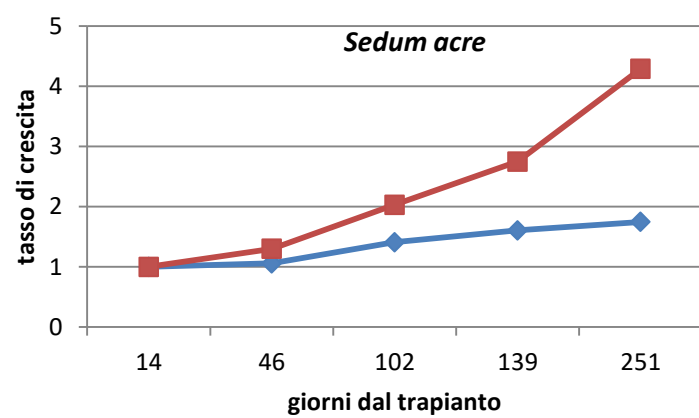
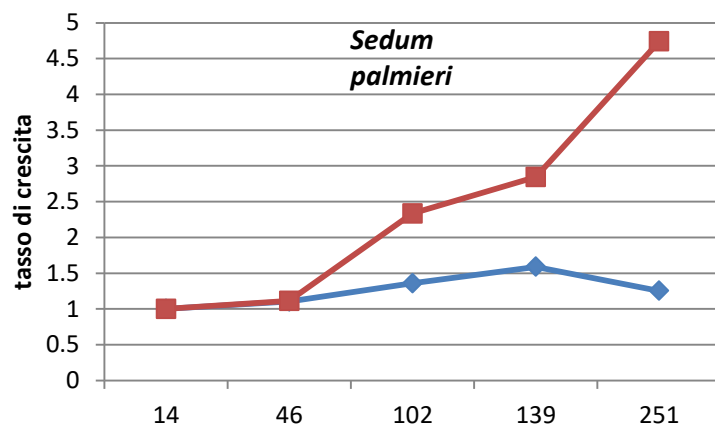
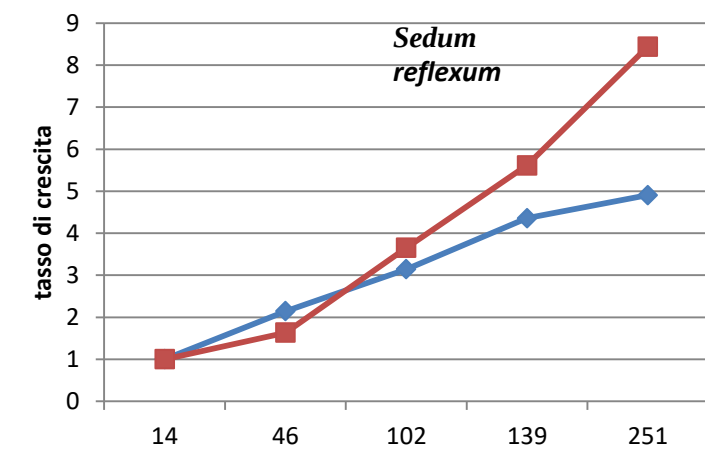
*Differenze significative per ogni coppia di valori ($P = 0.05$, Independent t-Test)

Figura. 7. Superficie di copertura di 5 accessioni di Crassulaceae in substrati con e senza aggiunta di compost a 46, 139 e 251 giorni dal trapianto. Specie: 1 = *Sedum reflexum*, 2 = *Sedum palmieri*, 3 = *Sedum acre*, 4 = *Sedum spurium*, 5 = *Sempervivum tectorum*



* Differenze significative per ogni coppia di valori ($P = 0.05$, Independent t-Test)

Figura 8. Peso fresco e secco di accessioni di Crassulaceae, coltivate con e senza compost, a 251 giorni dal trapianto. Specie: 1 = *Sedum reflexum*, 2 = *Sedum palmieri*, 3 = *Sedum acre*, 4 = *Sedum spurium*, 5 = *Sempervivum tectorum*



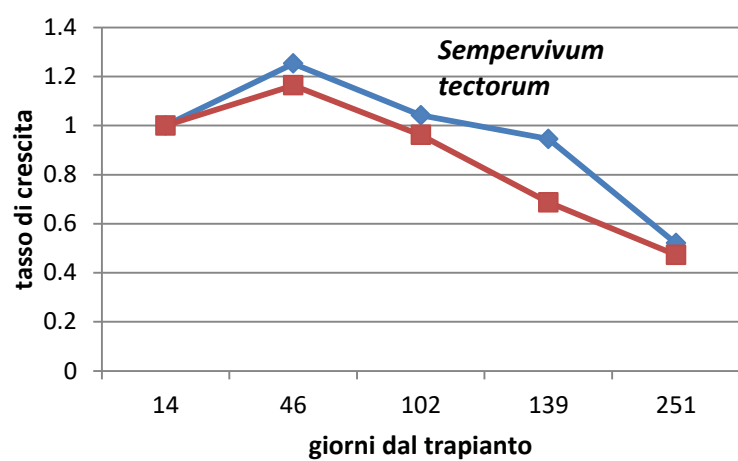
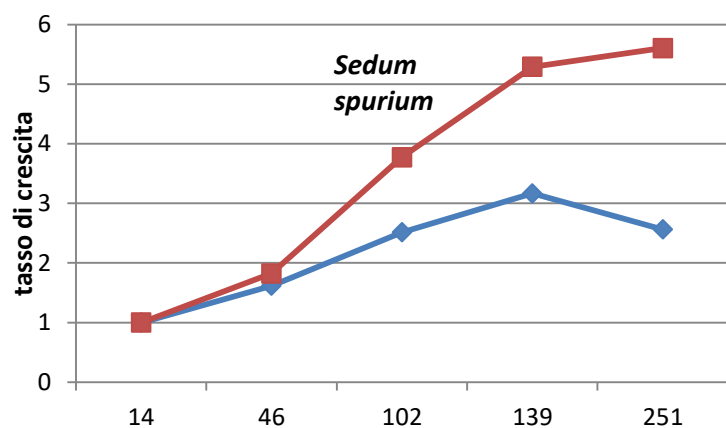
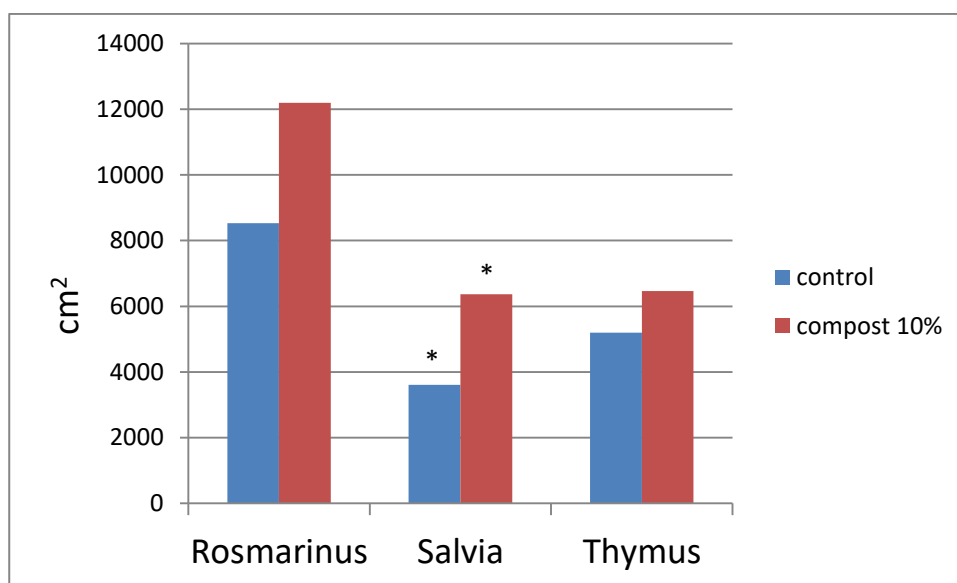


Figura 9. Valutazione della crescita tappezzante delle accessioni di Crassulaceae a 5 intervalli dal trapianto. L'ordinata riporta il rapporto tra la misura della superficie di ogni osservazione e il valore della prima (tasso di crescita) — controllo — compost

4.2.2 Moduli di coperture semi- intensive con specie arbustive (*Lamiaceae*)

I risultati della crescita delle specie di *Lamiaceae* dopo 128 giorni dal trapianto è riportato in Figura 10 e mostra per ogni specie un incremento della superficie media di copertura in seguito all'aggiunta di compost 10% vol/vol. Le differenze tra medie risultano statisticamente significative nel trattamento rispetto al controllo per *Salvia officinalis*.

Anche se i risultati delle singole specie non risultano sempre statisticamente significativi, l'aggiunta di compost ha provocato un aumento complessivo della copertura del substrato da parte delle piante. Infatti, le piante cresciute in substrato contenente compost hanno raggiunto una copertura quasi completa della superficie del substrato disponibile (98 %) mentre le piante del controllo hanno raggiunto una copertura del 68 %. Probabilmente la mancanza di significatività nelle differenze riscontrata nelle misure delle specie *Thymus vulgaris* e *Rosmarinus officinalis* sono dovute al metodo empirico non invasivo di misurazione utilizzato ed alla forma irregolare delle piante.



* Differenze significative per ogni coppia di valori ($P = 0.05$, Independent t-Test)

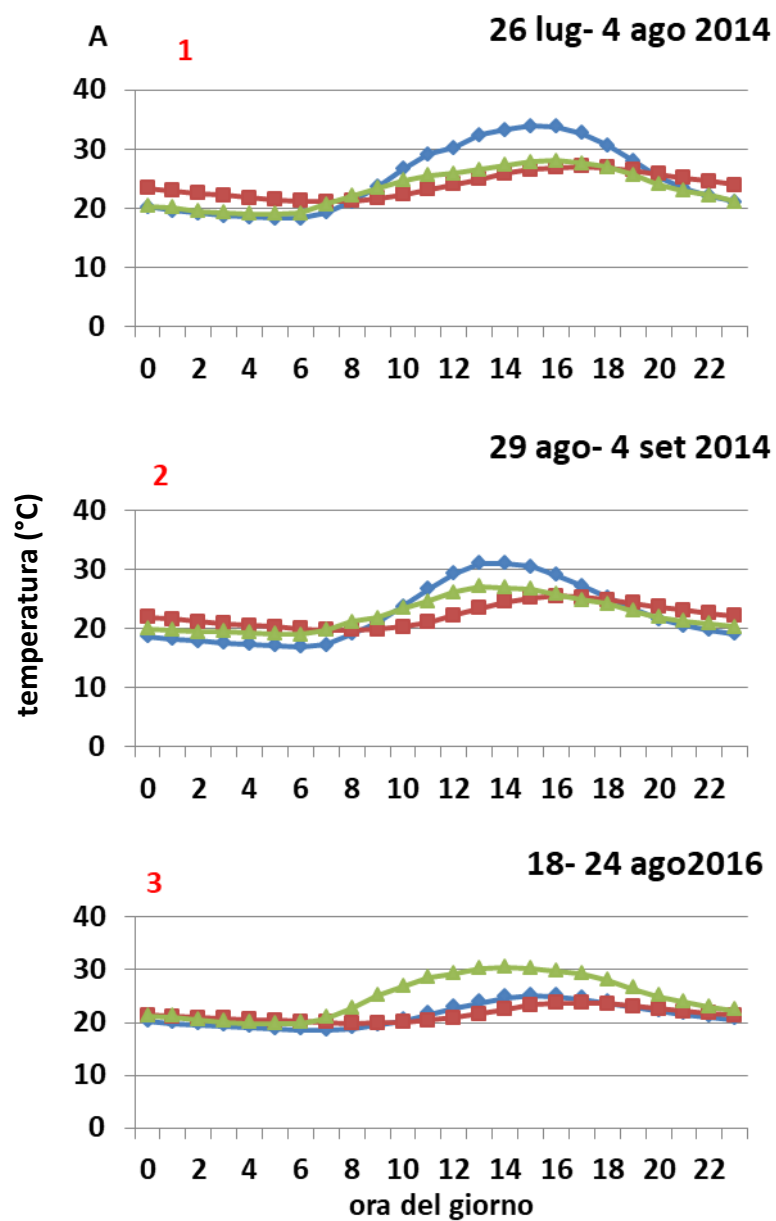
Figura 10. Superficie media di copertura di piante aromatiche a 128 giorni dal trapianto in substrati con e senza compost.

4.3 Valutazione dei parametri ambientali e termici dei moduli

All'inizio della sperimentazione, in base alle schede tecniche dei materiali, il carico dei moduli sui solai è stato valutato in kg 67,13/ m² e 98,63/ m² per l'estensivo e intensivo leggero rispettivamente, mentre i valori di saturazione di H₂O sono stati valutati in kg 112,13/m² e 168,13/m² rispettivamente. Le misure dell'umidità dei substrati nella primavera - estate 2014 hanno dimostrato che il carico a saturazione di H₂O non è stato mai raggiunto in quanto il massimo accumulo idrico rilevato è stato del 20%, rientrando nei limiti della norma UNI 11235. Ciò è stato dovuto alle elevate capacità di drenaggio del sistema nelle condizioni meteorologiche del periodo di valutazione.

Le valutazioni dei parametri termici relativi al modulo estensivo e le temperature atmosferiche nei periodi estivi sono riportate nella Figura 11 (A e B). Ogni grafico riporta per un periodo di riferimento, le temperature orarie medie dell'intercapedine sotto la struttura, del substrato (Fig. 11A) e le temperature medie di irraggiamento sulla superficie delle piante (Fig. 11B), rispetto alla temperatura atmosferica. Le osservazioni di due periodi dell'estate 2014, dopo 3, 7 settimane dall'impianto e di un periodo dell'estate 2016, dopo 25 mesi, hanno mostrato nelle ore più calde una diminuzione della temperatura nell'intercapedine sotto la struttura rispetto alla temperatura atmosferica. Le corrispondenti temperature del substrato sono risultate più elevate rispetto alla temperatura atmosferica nelle osservazioni del 2014 e minori soltanto nel 2016. La temperatura emessa dalle strutture (irraggiamento) è risultata sempre superiore rispetto alla temperatura atmosferica. La Figura 11C riporta i valori massimi giornalieri dei parametri termici per 3 periodi settimanali nel 2014 e 3 nel 2016 mentre la Tabella 3 riporta i valori medi massimi dei periodi corrispondenti. Nelle osservazioni del 2014, la temperatura massima dell'intercapedine è risultata inferiore a quella atmosferica di 1,13°C nel periodo 26 luglio - 4 agosto e di 4, 23 °C nel periodo 2 - 8 ottobre mentre i substrati hanno mostrato temperature più elevate o uguali. Le osservazioni del 2016 hanno mostrato nell'intercapedine valori massimi medi inferiori da 5,28 °C a 6,74 °C rispetto alla temperatura atmosferica ed anche i corrispondenti valori dei substrati sono stati sempre minori (da 4,07 °C a 6,61 °C). Negli stessi periodi di riferimento, la differenza tra la temperatura massima di irraggiamento e la temperatura atmosferica è andata diminuendo in relazione all'età dell'impianto (da 15,57 °C a 7,68 °C nei due periodi del 2014 e 6,99 °C nel 2016). Le diminuzioni delle temperature medie di intercapedine, substrato e dell'irraggiamento rispetto alle massime temperature atmosferiche risultano strettamente dipendenti dallo stadio di crescita delle piante valutato come superficie di copertura e riportato in Figura 8. Infatti, al momento della prima

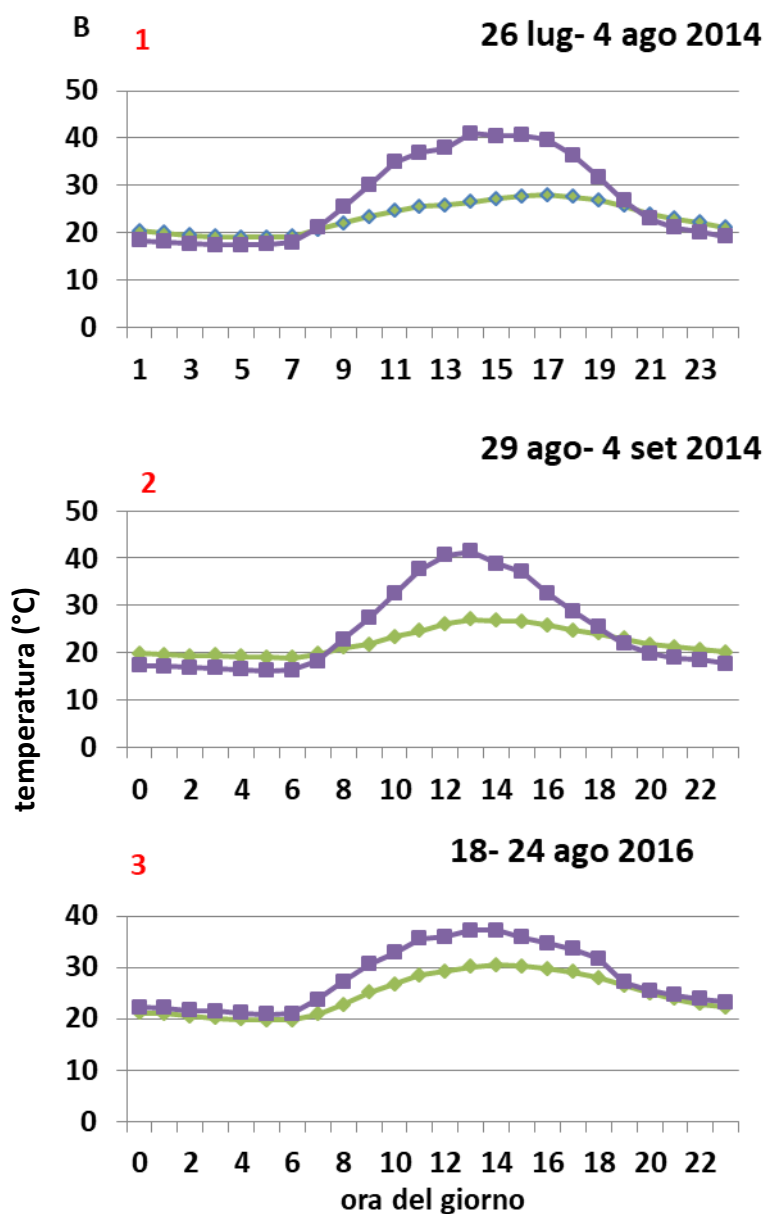
osservazione nel 2014, dopo 3 settimane dall'impianto, la copertura complessiva da parte delle piante è stata valutata come il 7% della superficie e ha raggiunto il 30% dopo 12 settimane, mentre al momento delle osservazioni del 2016, dopo 24 – 25 mesi dall'impianto, la copertura è stata valutata come il 100% della superficie disponibile. Questi dati dimostrano l'importanza della crescita e percentuale di copertura da parte delle piante sulla riduzione delle emissioni di calore da parte della superficie dell'edificio. Ciò fa ipotizzare che l'introduzione su larga scala di coperture verdi possa ridurre l'effetto "isola di calore" riscontrato negli ambienti urbani.



■ Temperatura atmosferica

■ Temperatura del substrato

■ Temperatura dell'intercapedine tra la superficie del terrazzo e la struttura verde



Temperatura atmosferica

Temperatura sulla superficie della vegetazione

Figura. 11. Misura della temperatura atmosferica e delle temperature relative al modulo di verde estensivo in tre periodi a diversa distanza dal trapianto. Ogni valore rappresenta la media oraria del periodo indicato. A: misure della temperature dell'intercapedine e del substrato. **B:** Misura delle temperature emesse dalla superficie vegetale. Copertura delle piante nei periodi di rilevamento: **1**= 7%, **2**= 30%, **3**= 100%.

Tabella 3. Temperature medie massime del modulo estensivo in periodi estivi durante la crescita delle piante del modulo.

Periodo	T_a (max)	ΔT max		
		$T_a - T_s$	$T_a - T_i$	$T_a - T_v$
2014				
26/07-04/08	28,30	-6,78	1,13	-15,57
29/08-04/09	27,23	-4,07	1,80	-14,95
02/10-08/10	24,90	0,38	4,23	-7,68
2016				
29/06-05/07	31,19	4,07	5,68	-8,13
23/07-29/07	31,59	6,61	5,28	-7,97
18/08-24/08	30,63	5,48	6,74	-6,99

Ta: Temperatura atmosferica

Ts: Temperatura del substrato

Ti: Temperatura dell'intercapedine tra la superficie del terrazzo e la struttura verde

Tv: Temperatura sulla superficie della vegetazione

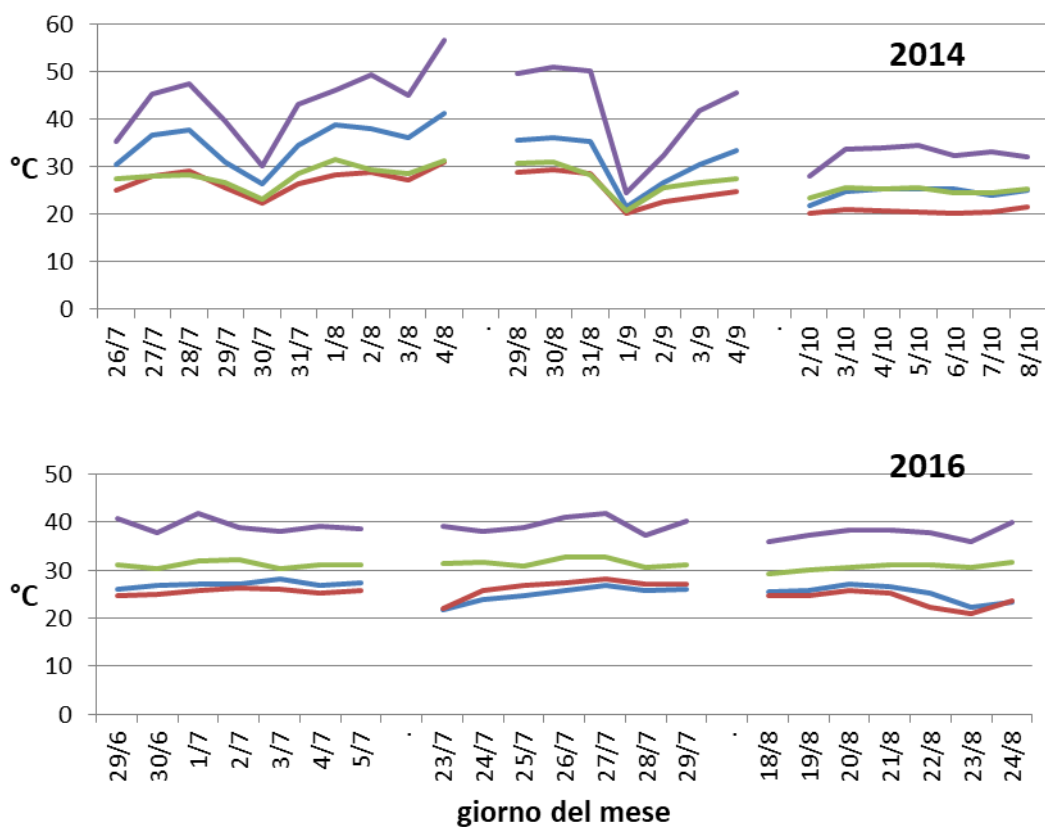


Figura 11 C. Valori massimi giornalieri dei parametri termici per 3 periodi durante l'estate.

- Temperatura atmosferica
- Temperatura del substrato
- Temperatura dell'intercapedine tra la superficie del terrazzo e la struttura verde
- Temperatura sulla superficie della vegetazione

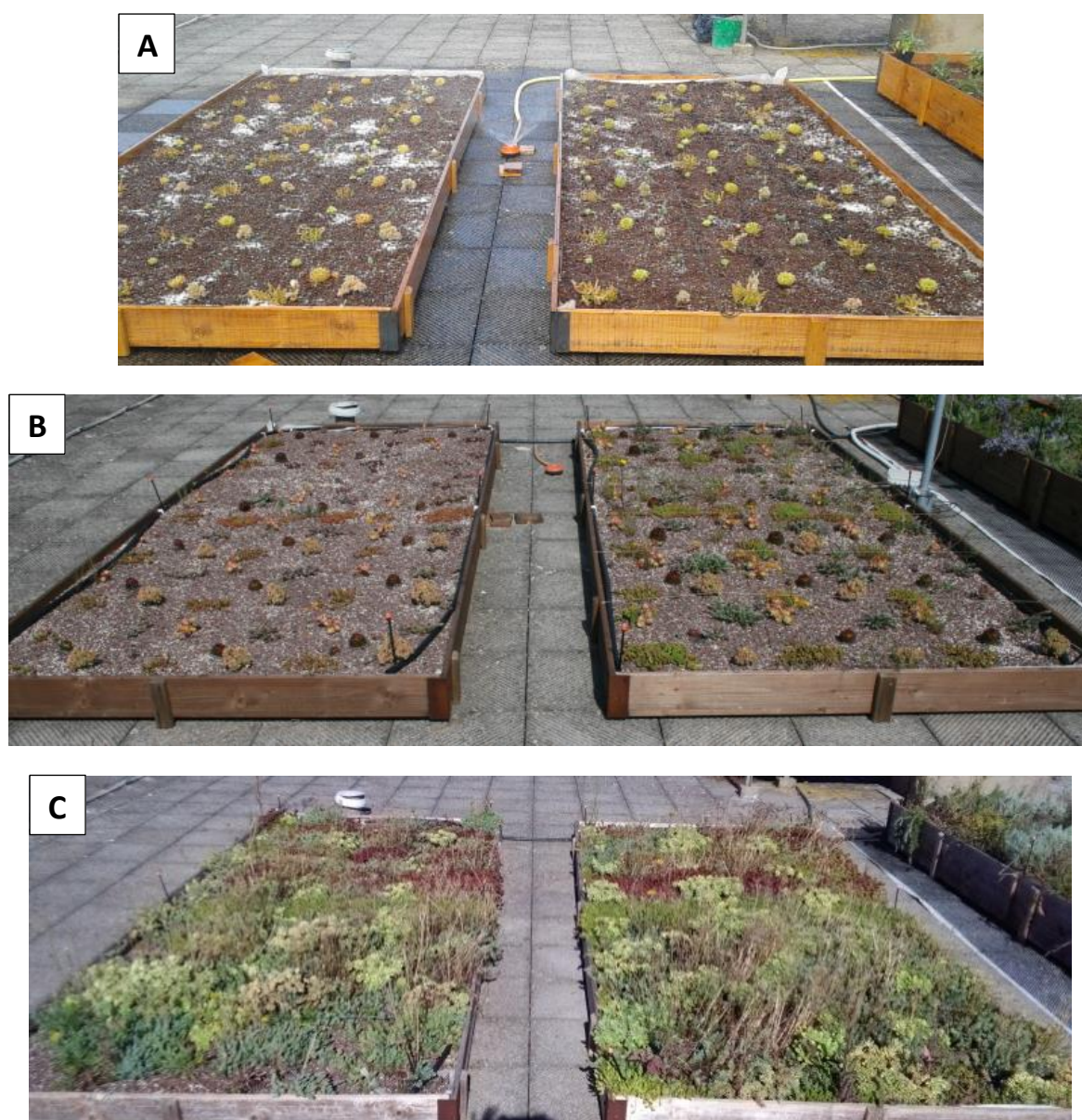


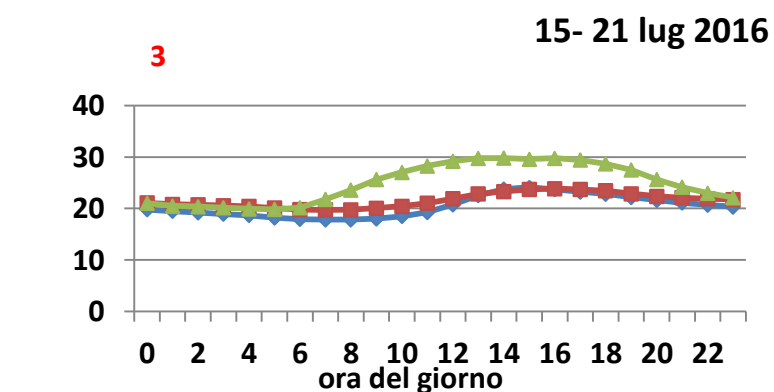
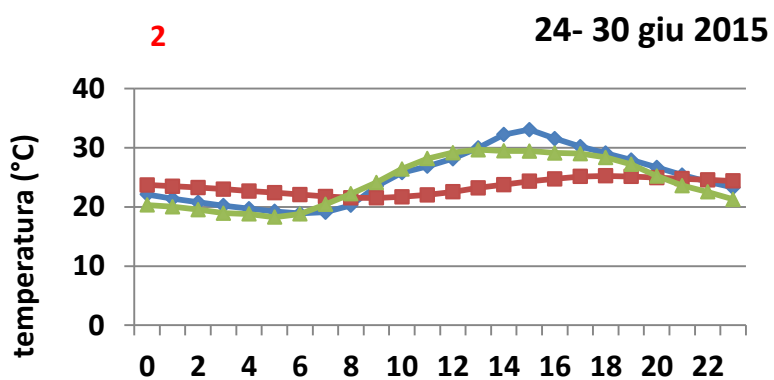
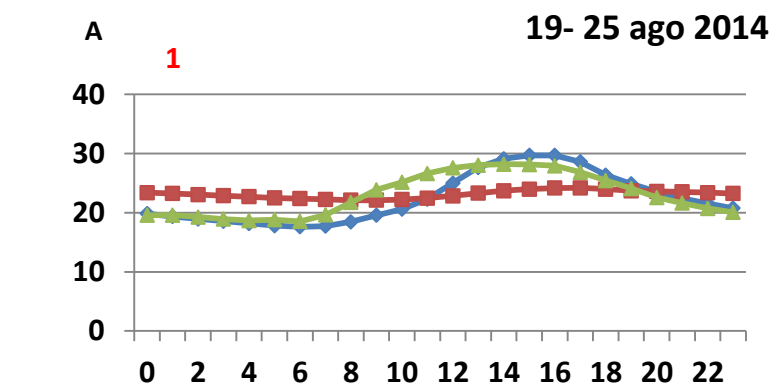
Foto 3. Moduli di verde estensivo con compost (destra) e senza compost (sinistra) a tempi diversi dal trapianto. **A:** 3 settimane, copertura delle piante 7%; **B:** 7 settimane, copertura 30% e **C:** 25 mesi dall'impianto, copertura 100%.

Le valutazioni dei parametri termici orari relativi al modulo semi - intensivo con piante di timo e lavanda in alcuni periodi estivi sono riportate nella Figura 12 (A e B). Le osservazioni eseguite rispettivamente dopo 3 settimane (estate 2014), 12 mesi (estate 2015) e dopo 24 mesi (estate 2016) hanno mostrato nelle ore più calde una diminuzione della temperatura nell'intercapedine sotto la struttura rispetto alla temperatura atmosferica. La temperatura del substrato è risultata più elevata rispetto alla temperatura atmosferica nelle osservazioni del 2014 e 2015 ma più bassa nel 2016 negli orari di massima insolazione. Tabella 4 riporta i valori medi massimi delle temperature nei periodi corrispondenti. Nella prima osservazione è stata riscontrata nell'intercapedine una diminuzione massima rispetto alla temperatura atmosferica di 4,26 °C mentre il substrato ha mostrato una temperatura più elevata di 1,3 °C. Nelle osservazioni del 2015 e 2016 sono state riscontrate diminuzioni massime nell'intercapedine di 5 °C e 5,32 °C rispettivamente mentre la temperatura del substrato ha mostrato valori più bassi rispetto all'atmosfera solo nel 2016. Le diminuzioni delle temperature di intercapedine e substrato rispetto alle massime temperature atmosferiche sembrano, anche in questa struttura, dipendenti dallo stadio di crescita delle piante valutato come percentuale di copertura del substrato. Infatti, la copertura da parte delle piante era del 55% dopo 3 settimane e il 90% dopo 12 mesi. Al momento dell'osservazione del 2016 era presente una copertura del 100% in quanto alcune delle piante originali erano morte e successivamente sostituite con piante aromatiche simili mentre *Sedum reflexum* era stato utilizzato per riempire la superficie scoperta. Negli stessi periodi, la temperatura emessa dalle strutture (irraggiamento) è risultata sempre superiore rispetto all'atmosferica. La differenza tra la temperatura massima di irraggiamento e la temperatura atmosferica ha mostrato valori simili nelle osservazioni del 2015 e 2016 (6,15 °C e 7,07 °C rispettivamente), corrispondenti ai valori di copertura massimi, come riportato nella Figura 12B.

Una valutazione dei parametri termici relativa al modulo semi - intensivo coltivato con piante di rosmarino, salvia e timo per il periodo 7 - 14 luglio 2016 a 24 mesi dall'impianto, è riportata nella Figura 13. Nel periodo di osservazione la copertura da parte delle piante è stata valutata come il 90% della superficie totale e l'altezza media è risultata cm 20. Nelle ore più calde le temperature medie massime dell'intercapedine e del substrato sono state sempre inferiori rispetto alla temperatura atmosferica con differenze rispettivamente di 4,45 °C e 6 °C. Anche in questo caso la percentuale di copertura da parte delle piante ha avuto un ruolo significativo nella riduzione della temperatura sulla superficie dell'edificio sotto la copertura verde.

I risultati riscontrati sono in accordo con le osservazioni di altri autori sull'efficacia delle coperture verdi nella riduzione delle temperature sulla superficie dell'edificio. In ambiente mediterraneo rivestono particolare interesse le sperimentazioni eseguite nella stagione calda in Grecia su un edificio da Niochau et al. (2001). I dati sperimentali hanno rilevato una diminuzione della temperatura sulla superficie fino a 10 °C in presenza di un tetto verde con differenze relative allo stato della vegetazione ed alla presenza o meno dello strato di coibentazione che a seconda del suo spessore minimizza l'effetto del tetto verde. Negli stessi periodi gli autori hanno riscontrato una diminuzione della temperatura massima interna all'edificio di circa 2 °C ed una diminuzione delle fluttuazioni diurne di temperatura. Numerosi lavori hanno valutato la funzione dei tetti verdi sulla riduzione delle temperature interne degli edifici. Le capacità dei tetti verdi di riduzione dei flussi di calore sono state dimostrate in diverse zone climatiche e sono sempre risultate dipendenti anche dagli elementi strutturali dell'edificio (Sun et al. 2013; Pandey et al., 2012). Qin et al. (2012), in Singapore, hanno riscontrato una diminuzione della temperatura superficiale di 7°C corrispondente ad una riduzione della temperatura interna di 0,5 °C. Mulkherjee et al. (2013) hanno evidenziato che l'efficienza nella mitigazione delle temperature interne da parte del tetto verde è significativa nei periodi caldi quando i solai non possiedono uno strato isolante. Un interessante studio condotto da La Roche e Berardi (2014), utilizzando moduli appositamente costruiti e diverse combinazioni di membrane isolanti e tetti verdi, ha confermato l'efficacia della mitigazione termica dei tetti verdi negli ambienti interni in assenza di coibentazione. Fang ha valutato l'effetto della morfologia delle piante in tetti verdi e dimostrato che una copertura del 70% con piante di *Shefflera arboricola*, con foglie dello spessore di mm 2.25 ha dato una riduzione termica dell'80%. L'effetto dell'abbassamento di temperatura dovuta ai tetti verdi sulle temperature degli ambienti interni in relazione alla copertura vegetale, al substrato ed agli elementi strutturali è oggetto di valutazione di modelli matematici, uno dei quali è il FASST, sviluppato dal US Army Corps of Engineers (Sailor 2008). In climi caldi e aridi gli studi modellistici di Sailor et al. (2010) hanno indicato una relazione tra la riduzione della temperatura esterna dovuta ai tetti verdi e l'abbassamento della temperatura interna. I tetti verdi sono considerati efficienti tecnologie per ridurre le variazioni delle temperature interne degli edifici e studi hanno valutato il loro effetto sulla riduzione del consumo di energia per la climatizzazione (Castleton et. al. 2010). Nelle condizioni climatiche della Grecia, Niochau et al. (2001), utilizzando il programma per simulazioni Transient System Simulation Program (TRNSYS), hanno valutato un risparmio energetico dovuto alla presenza del tetto verde dal 37 % al 40% a seconda della superficie coperta nel caso di edifici senza coibentazione ma notevolmente più basso (dal 7% al 2%) nel caso della presenza di coibentazione. Studi sperimentali più recenti in città

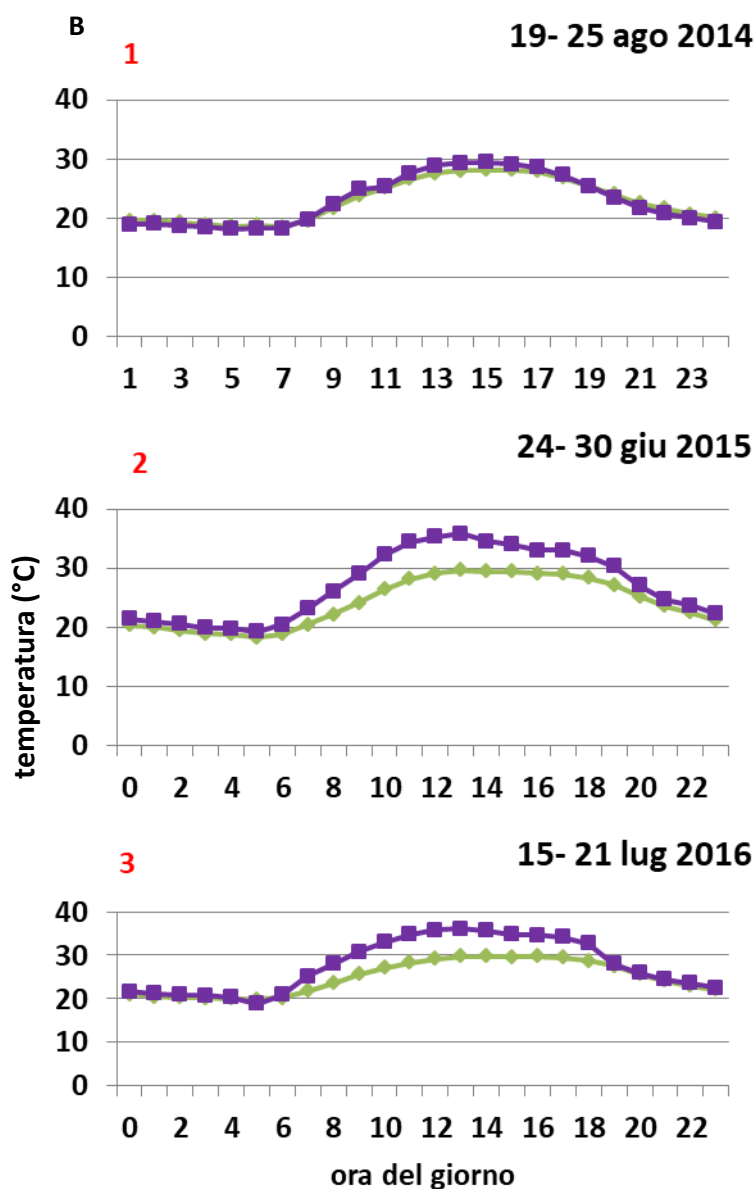
greche hanno confermato che l'installazione di tetti verdi contribuisce al risparmio energetico per la climatizzazione (Spala et al., 2008).



Temperatura atmosferica

Temperatura del substrato

Temperatura dell'intercapedine tra la superficie del terrazzo e la struttura verde



Temperatura atmosferica

Temperatura sulla superficie della vegetazione

Figura. 12. A: Misura della temperatura atmosferica e delle temperature relative al modulo di verde intensivo in tre periodi a diversa distanza dal trapianto. Ogni valore rappresenta la media oraria del periodo indicato. **B:** Misura delle temperature emesse dalla superficie vegetale. Copertura delle piante nei periodi di rilevamento: **1** = 55%, **2** = 90%, **3** = 100%. Giorni dal trapianto: **1** = 50, **2** = 365, **3** = 750.

Tabella 4. Temperature medie massime del modulo semi-intensivo nei periodi estivi riportati in Figura 12

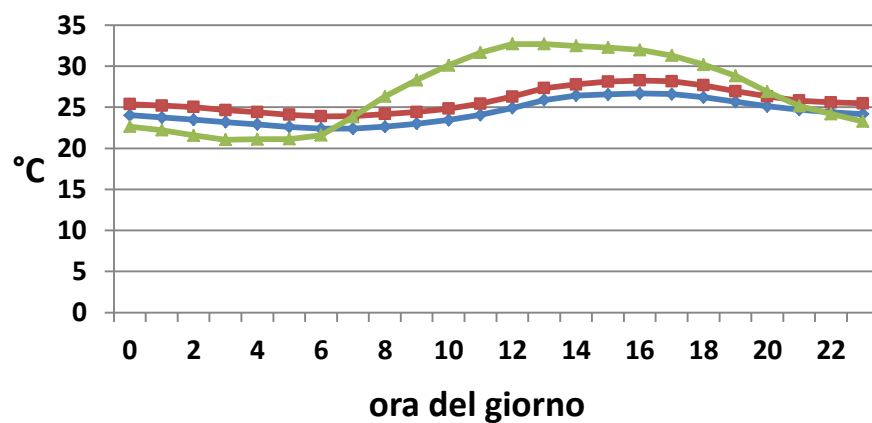
Periodo	T_a (Max)	ΔT Max		
		$T_a - T_s$	$T_a - T_i$	$T_a - T_v$
2014				
19/8-25/8	28.52	-1.30	4.26	-0.9
2015				
24/6_30/6	30.37	-2.75	5.0	-6.15
2016				
15/7-21/7	29.45	5.33	5.32	-7.07

Ta: Temperatura atmosferica

Ts: Temperatura del substrato

Ti: Temperatura dell'intercapedine tra la superficie del terrazzo e la struttura verde

Tv: Temperatura sulla superficie della vegetazione



Temperatura atmosferica

Temperatura del substrato

Temperatura dell'intercapedine tra la superficie del terrazzo e la struttura verde

Figura 13. Media delle temperature orarie giornaliere rilevate nel modulo semi- intensive realizzato con *Thymus vulgaris*, *Salvia officinalis*, *Rosmarinus officinalis* e *Sedum reflexum* nel periodo 7- 14 luglio 2016 a 24 mesi dall'impianto. Copertura vegetale: 90%



Foto 4. Modulo di verde semi- intensivo a diversi intervalli dal trapianto: **A:** 6 settimane (copertura 55%), **B:** 12 mesi (copertura 90%) e **C:** 24 mesi (copertura 100%) dal trapianto.

5. CONCLUSIONI

La selezione di genotipi indigeni di Crassulaceae ed il loro utilizzo in coltura mista con specie di collezione ha permesso la realizzazione di strutture di coperture verdi estensive di rapida crescita e resistenti nel tempo ai fattori ambientali nei climi mediterranei. L'utilizzo di compost e biochar, derivanti da riciclo di rifiuti organici, nei substrati "soilless", ha prodotto in generale un incremento dei parametri di crescita delle piante. L'utilizzo degli ammendanti oggetto di studio può essere considerato una metodologia sostenibile in quanto riduce la richiesta di fertilizzanti chimici da parte delle piante, l'impatto ambientale e riduce i costi connessi al mantenimento delle strutture verdi.

Inoltre, i moduli di coperture a verde hanno mostrato buoni risultati in termini di riduzione della temperatura superficiale sia nei moduli di tipo estensivo che semi - intensivo. Il modulo a verde estensivo ha mostrato ottimi risultati sia dopo pochi mesi dall'impianto, che nel secondo e nel terzo anno di rilevazione dati. Ciò è dovuto alla rapida crescita delle specie di Crassulaceae utilizzate che hanno prodotto un denso strato di coltre vegetale ed una completa copertura del substrato. Come effetto, sia la temperatura massima del substrato che la temperatura dell'intercapedine al di sotto del modulo hanno raggiunto valori inferiori alla temperatura atmosferica fino a 7 °C nelle condizioni climatiche estive.

Il confronto fra i dati rilevati nei tre diversi moduli (uno estensivo e due semi - intensivi) coltivati con specie diverse permette di concludere che la diminuzione di temperatura riscontrata nell'intercapedine è dipendente dalla percentuale di copertura da parte delle piante piuttosto che dallo spessore del substrato e l'altezza delle piante.

Il modulo realizzato con cinque specie di Crassulaceae, pur avendo un substrato di cm 8 e altezza media delle piante di cm 10, ha presentato una veloce capacità di copertura ed un'elevata produzione di biomassa e si è dimostrato il più interessante per la semplicità di realizzazione e la resistenza delle piante. Nei periodi più caldi ha prodotto una riduzione della temperatura dell'intercapedine paragonabile o superiore a quella dei moduli semi - intensivi aventi profondità del substrato cm 18 e altezza media delle piante di cm 20. Il modulo estensivo, inoltre, ha presentato una sopravvivenza delle piante del 100%, non ha risentito delle variazioni climatiche e non ha richiesto manutenzione rispetto ai moduli semi - intensivi dove è stato necessario sostituire alcune piante dopo un anno dall'impianto.

La percentuale di copertura da parte delle piante piuttosto che l'altezza o il tipo di struttura sembra essere il fattore principale per la mitigazione della temperatura. Infatti nel periodo estivo del secondo anno dell'impianto, quando le piante hanno raggiunto la completa copertura, il modulo estensivo coltivato con un insieme di *Sedum* su un substrato di cm 8 ha presentato una riduzione della temperatura comparabile a quella rilevata nei semi-intensivi. Le piante utilizzate nel modulo estensivo, caratterizzate da propagazione vegetativa e sviluppo prostrato, hanno mostrato una veloce capacità di copertura e sopravvivenza agli stress rispetto alle piante di Lamiaceae utilizzate nel modulo semi- intensivo, che in alcuni casi non hanno superato le variazioni climatiche e sono state sostituite entro il secondo anno. Oltre a ciò, il minore spessore del substrato ha reso l'impianto estensivo più economico e di minore impatto sulle strutture.

RINGRAZIAMENTI

Desidero innanzitutto ringraziare il Professor Massimo Cecchini per la disponibilità e per le numerose ore dedicate a questo lavoro. Inoltre, ringrazio sentitamente la Dott.ssa Rita Di Bonito per i preziosi insegnamenti, la disponibilità ed il tempo dedicatomi durante questi tre anni. Intendo poi ringraziare la Dott.ssa Germina Giagnacovo per la fornitura del materiale vegetale e la supervisione nella conduzione degli esperimenti. Ringrazio, per l'opportunità concessa, il Dott. Carlo Alberto Campiotti, responsabile del progetto: Ecosistemi Vegetali per l'Efficienza Energetica ed il Risparmio di Energia negli Edifici Urbani, nell'ambito dell'Accordo di Programma ENEA-MiSE (Ricerca di Sistema Elettrico) 2012-14. Infine, ho desiderio di ringraziare la mia famiglia per il sostegno che mi ha dato durante questo percorso.

BIBLIOGRAFIA

Ahmadi H, Arabi R, Fatahi L. Thermal Behavior of Green Roofs In Different Climates. Special Issue of Curr World Environ 2015;10 (Special Issue May 2015). doi : <http://dx.doi.org/10.12944/CWE.10.Special-Issue1.110>

Bates A.J, J.P. Sadler, R. Mackay, Vegetation development over four years on two green roofs in the UK, Urban Forestry & Urban Greening 12 (2013) 98–108.

Benvenuti S (2014) Wildflower green roofs for urban landscaping, ecological sustainability and biodiversity. Landscape and urban planning 124: 151-161

Benvenuti, S.& Bacci, D., "Initial agronomic performances of Mediterranean xerophytes in simulated dry green roofs", Urban Ecosystems, vol. 13, 2010, p.349-363

Bevilacqua P, Mazzeo D, Bruno R, Arcuri N (2016) Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area. Energy and Buildings 122 63-79

Branneisen, S. (2003), The benefits of biodiversity from green roofs- key design consequences. In Proceedings of the First North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities, Chicago, May 29-30, 2003. The cardinal group, Toronto, pp. 323-329.

Brannesein, S. (2004), Green roofs: How nature returns to the city. Acta Hort. 643:289-293

Campiotti C.A, 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

Caneva, G., Kumbaric, A., Savo, V., Casalini, R., 2015. Ecological approach in selecting extensive green roof plants: a data-set of Mediterranean plants. Plant Biosystems 149, 374–383.

Castleton HF, Stovin V, Beck SBM, Davison JB (2010). Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit. Energy and buildings; 42:1582-91

Clark MJ and Zheng Y (2013) Plant Nutrition Requirements for an Installed Sedum-Vegetated Green Roof Module System: Effects of Fertilizer Rate and Type on Plant Growth and Leachate Nutrient Content HortScience vol. 48 no. 9 1173-1180

Clark, M.J., Zheng, Y. (2012) Evaluating fertilizer influence on overwintering survival and growth of *Sedum* species in a fall-installed green roof. HortScience 47:1–7.

Connelly, M., and K. Liu. 2005. Green roof research in British Columbia: An overview, p. 416–432. In Proc. of 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities, Washington, DC. 4–6 May 2005. The Cardinal Group, Toronto.

Cook- Patton, SC, Bauerle TL (2012) Potential benefits of plant diversity on vegetated green roofs: a literature review. Journal of Environmental Management 106: 85-92

Deliberazione n. 1/2014 Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare- Comitato verde pubblico, Roma 14 Aprile 2014

DeNardo, J.C., A.R. Jarrett, H.B. Manbeck, D.J. Beattie, and R.D. Berghage. 2005. Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. Trans. ASAE 48:1491–1496.

Dunnet N. and Kingsbury N.(2004). Planting green roofs and living walls, Oregon: Timber press

Dunnett N. e Kingsbury N., Planting green roof and living walls, 2008

El Bachawati M, Manneha R, Belarbib R, El Zakhemaa H (2016). Real-time temperature monitoring for Traditional gravel ballasted and Extensive green roofs: A Lebanese case study. Energy and Buildings 133 (2016) 197–205

Emilsson T, (2008), Vegetation development on extensive vegetated green roofs: Influence of substrate composition, establishment method and species mix. Ecological Engineering 33:265-77

Eumorfopoulou E, Aravantinos D. The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. Energ Buildings. 1998;27:29–36.

Ferrante, P., La Gennusa, M., Peri, G., Rizzo, G., Scaccianoce, G., (2016). Vegetation growth parameters and leaf temperature: Experimental results from a six plots green roofs' system

FLL-Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., "Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen. Richtlinien für Dachbegrünungen (Guideline for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof Sites, Bonn, Germany.)", 2008

- Francis R. A, J. Lorimer. (2011), Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management*, 92 (6), pp. 1429-1437
- Getter, K.L. and D.B. Rowe. (2006). The role of green roofs in sustainable development. *HortScience* 41(5):1276-1285.
- Getter, K.L., Rowe, D.B., Andresen, J.A., Wichman, I.S., (2011): Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate. *Energy and Buildings*
- Getter, K.L., Rowe, D.B. (2009). Substrate depth influences sedum plant community on a green roof. *HortScience* 44 (2), 401-407.
- Giagnacovo, G., Biagiotti, D., Di Bonito, R., Mascioli, C., and Campiotti, C.A. (2014). Selezione di ecotipi spontanei di Crassulaceae per la realizzazione di tetti verdi in ambiente mediterraneo. Paper presented at: X Convegno Nazionale sulla Biodiversità, 3-5 Sept 2014 (Roma, Italy: CRA-Centro di Ricerca per lo Studio delle Relazioni tra Pianta e Suolo).
- Hoseini G., Berardi U, Dahlan N et al. (2013) The essence of future smart houses: from embedding ICT to adapting to sustainability principles. *Renewable e Sustainable Energy reviews* 24, 593-607
- <http://www.architetto.info/news/green-building/coperture-a-verde-cosa-prevede-la-nuova-norma-tecnica-uni/>
- ISPRA, Verde pensile: prestazioni di sistema e valore ecologico. Manuali e Linee Guida 78/ 2012
- Kolb, W. 2004. Good reasons for roof planting: Green roofs and rainwater. *Acta Hortic.* 643:295–300.
- La Roche P, U Berardi -, 2014. Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and buildings* 82:492-504
- Li J-F, Wai OWH, Li YS, Zhan J-m, Ho YA, Li J, et al 2010. Effect of green roof on ambient CO2 concentration, *Building and Environment* 45:2644-51
- Liesecke, H.J., and H. Borgwardt. 1997. Abbau von luftschadstoffen durch extensive dachbegrünungen (Degradation of air pollutants by extensive green roofs). *Stadt und Grün.* 46:245–251

MacDonagh, LP, Hallyn, NM, Rolph S (2006) Midwestern USA plant communities+ design= bedrockbluff prairie green roofs. Paper presented at the Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Boston MA.

Mert EKŞİ and Adnan UZUN (2013) Investigation of thermal benefits of an extensive green roof in Istanbul climate. Academic journals Vol. 8(15), pp. 623-632, 18

Monterusso M.A., Rowe D.B., Rugh C.L. (2005). Establishment and persistence of Sedum spp. and native taxa for green roof applications. HortScience 40:391-396

Moran, A., B. Hunt, and G. Jennings. 2004. A North Carolina field study to evaluate green roof runoff quantity, runoff quality, and plant growth, p. 446–460. In Proc. of 2nd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities, Portland, OR. 2–4 June 2004. The Cardinal Group, Toronto.

MORAU D, LIBELLE T, GARDE F (2012) Performance Evaluation of Green Roof for Thermal Protection of Buildings In Reunion Island. Energy Procedia 14 (2012) 1008-1016

Mukherjee S, P. La Roche, K. Konis, J.H. Choi, Thermal performance of green roofs: a parametric study through energy modeling in different climates, in: Passive Low Energy Architecture Conference PLEA 2013, Munich, Germany, 2013.

Nagase, A., and Dunnett, N., (2010): Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs, effects of watering and diversity Landsc. Urban Plan., 97 (2010), pp. 318-327

Niachou A., K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou, Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance, Energy and Buildings 33 (7) (2001) 719–729.

Norma UNI 11235:2007 Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde.

Norma UNI 11235:2015 “Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde”

Oberndorfer E., Ludholm J., Bass B., Coffman R.R., Doshi H., Dunnett. N. et al. (2007) Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions and service. BioScience 57:823-833

- Oberndorfer, E., J. Lundholm, B. Bass, M. Connelly, R. Coffman, H. Doshi, N. Dunnett, S. Gaffin, M. Köhler, K. Lui, and B. Rowe. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioScience* 57(10):823-833.
- Olszewski, M.W., Holmes, M.H., and Young, C.A. (2010). Assessment of physical properties and stonecrop growth in green roof substrates amended with compost and hydrogel. *HortTechnology* 20, 438–444
- Ondoño, S., Bastida, F., and Moreno, J.L. (2014). Microbiological and biochemical properties of artificial substrates: A preliminary study of its application as Technosols or as a basis in Green Roof Systems. *Ecol. Eng.* 70, 189–199 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.05.003>.
- Pandey S., Hindoliya DA, Mod R. (2012) Experimental investigation on green roofs over buildings. *International journal of low- carbon Technologies*, 1:0-44
- Peck, S.W., C. Callaghan, M.E. Kuhn, and B. Bass. 1999. Greenbacks from green roofs: Forging a new industry in Canada. Canada Mortgage and Housing Corporation. Ottawa, Canada.
- Pignatti S. (1982) - Flora d'Italia – Edagricole
- Provenzano ME, Cardarelli M, Crasso M, Colla G. 2010a. Evaluation of potential green roof plant species in a Mediterranean climate. London: World Green Roof Congress.
- Provenzano ME, Cardarelli M, Saccardo F, Colla G, Battistelli A, Proietti S. 2010b. Evaluation of perennial herbaceous species for their potential use in a green roof under Mediterranean climate conditions. Second International Conference on Landscape and Urban Horticulture, 9–13 June 2009, Bologna.
- Qin X., X. Wu, Y.M. Chiew, Y. Li, A green roof test bed for stormwater management and reduction of urban heat island effect in Singapore, *British Journal of Environment & Climate Change* 2 (4) (2012) 410–420.
- Ranson S. L., Thomas M., (1960) Crassulacean acid metabolism. *Annual Review of Plant Physiology*. 11 (1): 81-110. doi: 10.1146/annurev.pp.11.060160.000501
- Roof-Greening Working Group (2008) Guidelines for the planning, execution and upkeep of green roof sites. FLL, Bonn, Germany

- Sailor D.J., T.B. Elley, M. Gibson (2011), Exploring the building energy impacts of green roof design decisions—a modeling study of buildings in four distinct climates, *Journal of Building Physics* 35 (4) (2011) 372–391.
- Sailor DJ, (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings* 40:1466-78
- Savi, T., Dal Borgo A, L. Love V, Andri, S., Tretiach, M., a, Nardini, A., (2016): Drought versus heat: What's the major constraint on Mediterranean green roof plants
- Schroll, E., Lambrinos, J., Sandrock, D., 2009. Irrigation requirements and plant survival on northwest green roofs. Paper presented at the Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, Atlanta, GA.
- Snodgrass E. C. e Snodgrass L. L., *Green Roof Plants, A Resource and Planting Guide*, 2006
- Spala A, Bagiorgas HS, Assimakopoulos MN, Kalavrouziotis J, Matthopoulos D, Mihalakakou G (2008) 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* 33:173-7
- Sun T, E. Bou-Zeid, Z.H. Wang, E. Zerba, G.H. Ni, Hydrometeorological determinants of green roof performance via a vertically-resolved model for heat and water transport, *Building and Environment* 60 (2013) 211–224.
- Susca, T.,S.R. Gaffin, G.R. Dell’Osso (2011) Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs *Environ. Pollut.*, 159 (2011), pp. 2119-2126
- Sutton, R., 2014. Aesthetics for green roofs and green walls. *Journal of Living Architecture*. 1(2): 1-20. [http://greenroofs.org/resources/JOLA2014Volume1\(Issue2\)Sutton](http://greenroofs.org/resources/JOLA2014Volume1(Issue2)Sutton)
- Vahdati N, Tehranifar A, Kazemi F (2017) Assessing chilling and drought tolerance of different plant genera on extensive green roofs in an arid climate region of Iran. *Journal of Environmental Management* 192: 215-223
- Van Mechelen C., Dutoit Th., Hermy M., (2014) Mediterranean open habitat vegetation offers great potential for extensive green roof design. *Landscape and Urban Planning* 121:81-91
- VanWoert, N.D., D.B. Rowe, J.A. Andresen, C.L. Rugh, R.T. Fernandez, and L. Xiao. 2005a. Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope, and media depth. *J. Environ. Qual.* 34:1036–1044.

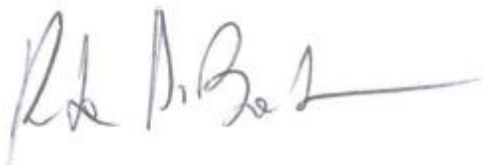
Wong, N.H., Y. Chen, C.L. Ong, and A. Sia. 2003. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment* 38:261–270.

Yang J., Yu Q., Gong P., (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in *Atmospheric Environment* 42, 7266-7273

I tutors: Prof. Massimo Cecchini

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M. Cecchini', written over a horizontal line.

Dott.ssa Rita Di Bonito

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'R. Di Bonito', written in a cursive style.