

**C.A. CAMPIOTTI, P. DE ROSSI, L. GATTI,
G. GIAGNACOVO, A. LATINI, S. MARIANI,
M. SPERANDEI**

Dipartimento Unità per l'Efficienza Energetica
Laboratorio SIST-NORD
Centro Ricerche Casaccia

S. PACE

Dipartimento Unità per l'Efficienza Energetica
Laboratorio SIST-NORD
Centro Ricerche Portici

A. CAMPIOTTI

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Tesiista
Centro Ricerche Casaccia

R. DI BONITO, A. MARONE

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Laboratorio BBC-PBE
Centro Ricerche Casaccia

C. BIBBIANI

Dipartimento di Scienze Veterinarie
Università di Pisa

I. BLANCO

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche ed Ambientali
Università del Salento (Lecce)

L. CONSORTI

Centro Interuniversitario di Ricerca per lo Sviluppo Sostenibile
Università di Roma "La Sapienza"

F. FANTOZZI, C. GARGARI

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi,
del Territorio e delle Costruzioni
Università di Pisa

R. MULEO

Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali
Università della Tuscia (Viterbo)

E. SCHETTINI, F. CONVERTINO, G. VOX

Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali
Università degli Studi di Bari Aldo Moro

GLI ECOSISTEMI VEGETALI PER LA RIGENERAZIONE ECOLOGICA DELLE CITTÀ

RT/2021/13/ENEA

ENEA

AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

C.A. CAMPIOTTI, P. DE ROSSI, L. GATTI,
G. GIAGNACOVO, A. LATINI, S. MARIANI,
M. SPERANDEI

Dipartimento Unità per l'Efficienza Energetica
Laboratorio SIST-NORD
Centro Ricerche Casaccia

S. PACE

Dipartimento Unità per l'Efficienza Energetica
Laboratorio SIST-NORD
Centro Ricerche Portici

A. CAMPIOTTI

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Tesiista
Centro Ricerche Casaccia

R. DI BONITO, A. MARONE

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Laboratorio BBC-PBE
Centro Ricerche Casaccia

C. BIBBIANI

Dipartimento di Scienze Veterinarie
Università di Pisa

I. BLANCO

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche ed Ambientali
Università del Salento (Lecce)

L. CONSORTI

Centro Interuniversitario di Ricerca per lo Sviluppo Sostenibile
Università di Roma "La Sapienza"

F. FANTOZZI, C. GARGARI

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi,
del Territorio e delle Costruzioni
Università di Pisa

R. MULEO

Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali
Università della Tuscia (Viterbo)

E. SCHETTINI, F. CONVERTINO, G. VOX

Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali
Università degli Studi di Bari Aldo Moro

GLI ECOSISTEMI VEGETALI PER LA RIGENERAZIONE ECOLOGICA DELLE CITTÀ

RT/2021/13/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

GLI ECOSISTEMI VEGETALI PER LA RIGENERAZIONE ECOLOGICA DELLE CITTÀ

a cura del laboratorio DUEE-SIST-NORD

Ricerca finanziata dall'Accordo di Programma MiSE-ENEA
"Ricerca di Sistema Elettrico" (RdS)

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano
l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion
of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

GLI ECOSISTEMI VEGETALI PER LA RIGENERAZIONE ECOLOGICA DELLE CITTÀ

C.A. Campiotti, P. De Rossi, L. Gatti, G. Giagnacovo, A. Latini, S. Mariani, M. Sperandei, S. Pace, A. Campiotti, R. Di Bonito, A. Marone, C. Bibbiani, I. Blanco, L. Consorti, F. Fantozzi, C. Gargari, R. Muleo, E. Schettini, F. Convertino, G. Vox

Riassunto

Il Rapporto Tecnico riporta alcuni risultati dell'attività di ricerca, sulla tematica "Sistemi verdi per la rigenerazione ecologica delle città", condotta dal gruppo afferente al Laboratorio DUEE-SIST-NORD nell'ambito del Programma italiano "Ricerca di Sistema Elettrico" (RdS). La sperimentazione si è svolta principalmente sull'edificio F92 denominato "Scuola delle Energie" presso il CR ENEA Casaccia, nel quale sono stati implementati dei prototipi di "sistemi verdi" quali tetto, parete e serra bioclimatica "verdi". Il Rapporto Tecnico è strutturato nelle due seguenti parti.

Nella prima parte, viene trattato il contributo del verde per l'efficientamento energetico degli edifici. Sono inclusi un capitolo sulla metodologia dell'analisi del ciclo di vita (LCA) orientata all'aumento della sostenibilità ambientale attraverso tali infrastrutture verdi in città; un capitolo sulle tecniche di Remote Sensing & Geographic Information System (GIS) per valutarne l'efficienza ambientale, ed un capitolo sugli strumenti normativi cogenti e volontari per la loro implementazione a livello nazionale ed Europeo.

Nella seconda parte, vengono trattati alcuni tra i più importanti benefici per l'ambiente, e quindi per la società, riconosciuti ai sistemi verdi in città, dovuti alle proprietà fisiologiche delle piante. Nei diversi capitoli vengono argomentati i numerosi servizi ecosistemici (SE), incluse le potenzialità di tali sistemi di mitigare l'effetto isola di calore in città, migliorando il clima locale, e di attenuare l'inquinamento dell'aria ambiente, migliorando la qualità dell'aria che si respira in città. Si sottolinea anche il ruolo del verde nella connessione ecologica tra le aree naturali volte a garantire la conservazione della biodiversità.

Parole chiave: Sistemi verdi, tetto verde, parete verde, efficienza energetica, mitigazione del cambiamento climatico, rigenerazione ecologica, biodiversità.

Abstract

The Technical Report reports some results of the research activity, on "greenery systems for the urban ecological regeneration", carried out by the DUEE-SIST-NORD Laboratory group within the Italian Program "Electric System Research" (RdS). The experimentation took place mainly on the so-called "School of Energy" F92 building, at ENEA Casaccia RC, where of "green systems" prototypes for a green roof, wall and bioclimatic greenhouse have been implemented. This Technical Report is structured into two sections.

In the first section, the contribution of greenery to the increase of energy efficiency in buildings is discussed. A chapter on the life cycle analysis (LCA) methodology, aimed at increasing environmental sustainability through green infrastructures in the city, and a chapter on Remote Sensing & Geographic Information System (GIS) techniques, for assessing their environmental efficiency, have been included here. Furthermore, a chapter is dedicated to the existing regulatory tools, either mandatory as voluntary, which sustain the implementation of these plant systems in cities at both the national and the European levels.

In the second section, some of the most important benefits provided by the green systems in cities to the environment and to the people are discussed. In the various chapters, the numerous ecosystem services (ES) are discussed, including the potential of these green systems to mitigate the urban heat island effect thus improving the local climate, and to mitigate ambient air pollution thus improving the air quality in cities. In addition, the key role played by urban greenery systems in the ecological connections among natural areas for ensuring the conservation of biodiversity is also emphasized.

Keywords: Building green infrastructures, green roof, green wall, energy efficiency, climate change mitigation, ecological regeneration, biodiversity.

PREFAZIONE

Il Sesto Rapporto IPCC ha messo in evidenza che l'aumento della temperatura dell'aria di soli 0,9°C, registrato a partire dalla rivoluzione industriale, è all'origine dei cambiamenti climatici che, a livello mondiale, stanno mettendo a rischio la vita dei cittadini in termini di infrastrutture, alloggi, servizi sanitari, lavoro e salute. Soprattutto nelle città, dove le stime riportano che entro il 2050 vivrà l'80% della popolazione, l'aumento dell'anidride carbonica (CO₂) viene ritenuto tra i principali responsabili alla base del cambiamento climatico. Da qui la necessità di inserire le città tra i luoghi dove avviare prioritariamente iniziative e interventi per contrastare gli impatti negativi del riscaldamento globale (isole e ondate di calore sempre più frequenti nei mesi estivi, eccesso di consumi di energia fossile, inquinamento, perdita di biodiversità. Secondo studi della Commissione Europea, l'energia elettrica per la climatizzazione estiva, nelle diverse tipologie di edifici (pubblici, residenziali e commerciali), rappresenta ormai non meno del 30% dei consumi complessivi e le previsioni mostrano una tendenza in crescita. Nel 2013, la Commissione europea ha pubblicato la "Strategia per le infrastrutture verdi, Capitale naturale dell'Europa" per sostenere azioni di sviluppo, ricerca e innovazione mirate alla realizzazione di sistemi di "rinaturazione" delle aree urbane. Tra le possibili soluzioni naturali, l'impiego della vegetazione sugli edifici risulta particolarmente efficace per contrastare il riscaldamento globale e le emissioni di anidride carbonica (CO₂). Le piante, mediante la traspirazione consumano energia sotto forma di calore latente per effettuare i cambiamenti di fase da acqua a vapore acqueo per mantenere una temperatura fogliare adatta ai processi metabolici mentre con la fotosintesi sequestrano la CO₂ atmosferica e quindi favoriscono la decarbonizzazione delle città. In ultima analisi, gli edifici dotati di vegetazione riducono la domanda di energia elettrica per la climatizzazione estiva, favoriscono il sequestro di inquinanti dall'atmosfera, attenuano il rumore negli edifici e allo stesso tempo aumentano la biodiversità urbana. Il presente rapporto illustra l'attività di ricerca che il Laboratorio Regioni Area Settentrionale del Dipartimento Unità per l'Efficienza Energetica, in collaborazione con le Università di Pisa, Bari e Viterbo, ha sviluppato a partire dal 2015, nell'ambito del programma Ricerca di Sistema elettrico finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico, per valorizzare l'impiego del verde parietale e dei tetti verdi sugli edifici come elementi innovativi per migliorare la sostenibilità energetica ed ambientale del settore edile.

Carlo Alberto Campiotti

ENEA - DUEE SIST NORD

INDICE

Parte I - ECOSISTEMI VEGETALI: EFFICIENZA ENERGETICA, LCA, TECNICHE DI REMOTE SENSING & GIS, NORMATIVA	7
1 IL VERDE PER LA SOSTENIBILITÀ ENERGETICA E AMBIENTALE DEGLI EDIFICI (a cura di <i>Carlo Alberto Campiotti, Alessandro Campiotti, Luciano Consorti, Patrizia De Rossi, Lorenzo Gatti, Maria Sperandei, Germina Giagnacovo, Arianna Latini</i>)	8
1.1 Scambi energetici tra l'edificio e l'ambiente	8
1.2 Prototipo di tetto verde, caso studio ENEA	15
1.3 Prototipo di verde parietale, caso studio ENEA	20
2 EFFETTI DELLE PARETI VERDI SUL REGIME TERMICO DELL'INVOLUCRO DELL'EDIFICIO (a cura di <i>Evelia Schettini, Fabiana Convertino, Ileana Blanco, Giuliano Vox</i>)	26
2.1 Realizzazione di un prototipo di edificio con parete verde a microclima controllato presso il campo sperimentale dell'Università di Bari	36
2.2 Principali effetti rilevati della facciata verde	46
3 LCA PER SISTEMI VEGETALI QUALI COMPONENTI EDILIZI (a cura di <i>Caterina Gargari, Fabio Fantozzi, Carlo Bibbiani</i>)	58
3.1 Uno sguardo alla ricerca sugli elementi verdi	58
3.2 La sostenibilità degli elementi verdi in edilizia	60
3.3 LCA applicata ai tetti verdi	63
3.4 Il metodo	64
3.1 I risultati delle valutazioni di impatto per le sei tipologie di copertura a verde	66
3.1.1 COPERTURA A VERDE ESTENSIVO - TIPO A.....	66
3.1.2 COPERTURA A VERDE ESTENSIVO - TIPO B.....	70
3.1.3 COPERTURA A VERDE INTENSIVO - TIPO C.....	72
3.1.4 COPERTURA A VERDE INTENSIVO - TIPO D ed E.....	75
3.1.5 COPERTURA A VERDE INTENSIVO - TIPO F	77
3.1.6 COPERTURA A VERDE ESTENSIVO - TIPO G	80
3.2 Analisi dei Medium a confronto	82
4 VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA AMBIENTALE DI INFRASTRUTTURE VERDI ATTRAVERSO TECNICHE DI REMOTE SENSING & GIS (a cura di <i>Stefania Pace</i>)	92
4.1 Principi di Telerilevamento Termico	94
4.2 Il concetto di temperatura radiometrica, emissività, LST (Land Surface Temperature)	95
4.3 Dati satellitari disponibili	96
4.4 Calcolo della Land Surface Temperature	102
4.5 Softwares per l'elaborazione delle immagini	106
5 LA LEGISLAZIONE SUL VERDE: INDAGINE A LIVELLO UE E NAZIONALE (a cura di <i>Patrizia De Rossi, Susanna Mariani, Lorenzo Gatti, Alessandro Campiotti, Luciano Consorti, Carlo Alberto Campiotti</i>).....	110

5.1	Indagine a livello UE.....	110
5.2	Indagine a livello nazionale.....	112
5.3	Gli incentivi fiscali	116
6	SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DEGLI EDIFICI: CERTIFICAZIONE VOLONTARIA E INDICI DI VALUTAZIONE (a cura di <i>Patrizia De Rossi, Alessandro Campiotti, Luciano Consorti</i>).....	123
6.1	Le certificazioni	123
6.1.1	BREEAM.....	124
6.1.2	LEED.....	125
6.1.3	GREEN BUILDING COUNCIL (GBC) ITALIA.....	126
6.2	Indici per valutare la riduzione dell’impatto edilizio.....	127
6.2.1	PROTOCOLLO ITACA	127
6.2.2	INDICE R.I.E.	127
	Parte II - ECOSISTEMI VEGETALI: BIODIVERSITÀ E MITIGAZIONE AMBIENTALE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI	129
7	II VERDE PENSILE E LA RIGENERAZIONE ECOLOGICA PER LA SALVAGUARDIA DELLA BIODIVERSITÀ IN AMBIENTE URBANO (a cura di <i>Antonella Marone</i>).....	130
7.1	Ripristino della connettività ecologica.....	131
7.2	Riduzione/compensazione della perdita degli habitat	134
7.3	Aumento della biodiversità	138
7.4	Verde pensile come strumento per la “rigenerazione” ecologica in ambiente urbano	143
8	QUALI PIANTE PER UN TETTO VERDE MEDITERRANEO? I SUGGERIMENTI DELLA RICERCA (a cura di <i>Rita Di Bonito</i>).....	148
8.1	Caratteristiche del substrato del tetto verde	148
8.2	Il valore ecologico del tetto verde	150
8.3	Le sperimentazioni in ambiente Mediterraneo	152
9	PIANTE SPONTANEE SUI TETTI VERDI PER EFFICIENTAMENTO ENERGETICO DEGLI EDIFICI CON SALVAGUARDIA DELLA NOSTRA BIODIVERSITA’ DI FLORA E FAUNA (a cura di <i>Susanna Mariani, Arianna Latini, Lorenzo Gatti, Patrizia De Rossi</i>).....	162
9.1	Favorire la biodiversità e la salvaguardia degli impollinatori tramite i tetti verdi in città.....	162
9.2	Caso studio ENEA	164
9.2.1	IDENTIFICAZIONE DI SPECIE ADATTE AI TETTI VERDI PER LA SALVAGUARDIA DEGLI IMPOLLINATORI	164
9.2.2	ANALISI COMPARATIVA DELLE DUE SPECIE DI ECHIUM SUL TETTO VERDE ENEA.....	168
9.2.3	VANTAGGIO DELLE FORME ANNUALI NELL’AFFRONTARE LE AVVERSITÀ DELLA STAGIONE ESTIVA.....	171

9.2.4	RUOLO DELLA MANUTENZIONE DEL VERDE TRAMITE SFALCIO NEL DECLINO DI BIODIVERSITÀ	173
9.2.5	PROTEZIONE DELLA BIODIVERSITÀ VEGETALE E SALVAGUARDIA DELLE API.....	174
9.2.6	L'OPZIONE PER UN TETTO VERDE SPONTANEO E SECCO.....	175
10	ARCHITETTURA VERDE COME STRATEGIA DI MITIGAZIONE/ADATTAMENTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO: ATTIVITÀ SULLA CONCENTRAZIONE DI CO₂ ATMOSFERICA (a cura di <i>Maria Sperandei, Arianna Latini, Patrizia De Rossi, Lorenzo Gatti, Rosario Muleo</i>)	178
10.1	Criteria per la scelta di specie vegetali idonee al sequestro di carbonio	179
10.2	Caso studio ENEA nel C.R. Casaccia: CO₂ assorbita dalle essenze vegetali.....	184
11	BILANCIO IDROLOGICO DEL SISTEMA CONTINUO SUOLO-PIANTA-ARIA E L'EFFETTO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE DELLE PIANTE SUL RAFFRESCAMENTO DELLE CITTÀ (a cura di <i>Arianna Latini, Patrizia De Rossi, Susanna Mariani, Lorenzo Gatti, Germina Giagnacovo</i>).....	191
11.1	Il “continuum” suolo-pianta-aria	191
11.2	L'evapotraspirazione delle piante.....	192
11.3	Raffrescamento per evapotraspirazione tramite i tetti verdi	193
11.4	Metodi di misura per l'evapotraspirazione.....	196
11.4.1	LISIMETRO	196
11.4.2	METODI EMPIRICI PER LA STIMA DELL'ET.....	198
11.5	Caso studio ENEA nel CR Casaccia: capacità evapotraspirativa delle essenze vegetali.....	201
12	ALBEDO DELLE SUPERFICI VEGETALI E BENEFICI DELL'INVERDIMENTO URBANO NELLA RIDUZIONE DELL'ISOLA DI CALORE NELLE CITTÀ (a cura di <i>Arianna Latini, Lorenzo Gatti, Germina Giagnacovo, Rosario Muleo, Patrizia De Rossi</i>)	207
12.1	La proprietà dell'albedo delle superfici.....	207
12.2	Caso studio ENEA nel CR Casaccia: sperimentazione sull'albedo	212
12.3	Miglioramento genetico delle piante per fronteggiare la siccità	220

**Parte I - ECOSISTEMI VEGETALI: EFFICIENZA ENERGETICA, LCA,
TECNICHE DI *REMOTE SENSING* & *GIS*, NORMATIVA**

1 IL VERDE PER LA SOSTENIBILITÀ ENERGETICA E AMBIENTALE DEGLI EDIFICI

(a cura di Carlo Alberto Campiotti, Alessandro Campiotti, Luciano Consorti, Patrizia De Rossi, Lorenzo Gatti, Maria Sperandei, Germina Giagnacovo, Arianna Latini)

L'Unione Europea, ai fini della riduzione dei consumi di riscaldamento e di raffreddamento, con la COM(2013) 249 *final* "Infrastrutture verdi – Rafforzare il capitale naturale in Europa" e successivamente con la Direttiva Efficienza energetica (UE) 2018/844, ha sottolineato l'importanza per l'edilizia di coltri vegetali, giardini pensili, corridoi verdi, piantumazioni di siepi ed alberi, come soluzioni naturali che integrate negli edifici e nell'ambiente urbano delle città possono contribuire a migliorare l'efficienza energetica degli edifici. Il rapporto della *GlobalAbc* (www.globalabc.org), sottolinea come l'impiego di tecniche di raffreddamento passivo, i.e.: impiego diffuso della vegetazione nelle aree urbane, potrebbe generare risparmi pari al 25% dell'energia elettrica totale usata per il raffreddamento degli edifici. L'integrazione dei sistemi vegetali sugli edifici, in particolare, riduce la radiazione solare incidente e conseguentemente i consumi di energia elettrica e le emissioni di gas ad effetto serra (CO₂, CH₄, Fluorurati, vapore acqueo) dovuti al condizionamento estivo degli edifici (Dimitrijevic et al., 2018; Hewitt et al., 2020). Secondo stime recenti mostrano che l'inverdimento del 35% della superficie urbana dell'UE (ovvero più di 26.000 km²) eviterebbe fino a 55,8 Mton CO₂ equivalente di emissioni di gas serra, riducendo la domanda di energia per il raffreddamento degli edifici in estate fino a 92 TWh all'anno, con un valore attuale netto (VAN) di oltre 364 miliardi di euro (Quaranta et al., 2021).

1.1 Scambi energetici tra l'edificio e l'ambiente

La termodinamica ci ricorda che "il flusso di calore può avvenire spontaneamente in una sola direzione: dal corpo più caldo al corpo più freddo". È noto che sono tre i modi principali con cui avviene la propagazione del calore: conduzione, convezione ed irraggiamento. Per un involucro edilizio immerso in un ambiente reale, in particolare, i tre meccanismi intervengono tutti nel fenomeno di scambio termico che, per semplicità, si suppone avvenga in condizioni stazionarie. La *conduzione termica* è un processo di propagazione del calore tra corpi in contatto diretto o tra le particelle di un corpo aventi diversa temperatura. Particelle strutturali di una parte più calda del corpo interagiscono con moto disordinato con le

particelle circostanti cedendo a quest'ultime parte della loro energia cinetica. Questo processo si diffonde gradualmente lungo tutto il corpo sino al raggiungimento dell'uguaglianza della temperatura. La *convezione* è un processo di trasmissione del calore dovuto a spostamenti di volumi non uniformemente riscaldati di liquidi, di gas oppure di polveri. La trasmissione del calore per convezione è sempre accompagnata dal trasporto di massa. La trasmissione di calore per irraggiamento, invece, comporta la trasformazione dell'energia di un corpo riscaldato in onde elettromagnetiche che si propagano nello spazio ma possono essere assorbite da altri corpi trasformandosi di nuovo in calore. Di seguito sono brevemente descritti gli scambi termici tra l'edificio, la radiazione solare e l'ambiente circostante (Parolini et al. 1983; Bianchi e Carratù, 2005).

Scambio per conduzione

La conduzione termica viene determinata dal moto termico delle microparticelle. Il fenomeno di conduzione termica si manifesta nei corpi solidi, nei liquidi, a condizione che non nascano correnti convettive e nei gas immobili. Nella teoria della conduzione termica, il mezzo viene considerato *continuo* e la trasmissione del calore per conduzione è dovuto dalla differenza di temperatura in seno al mezzo. In accordo con l'ipotesi Fourier, la quantità di calore dQ che attraversa un elemento della superficie dS nell'unità di tempo dt è proporzionale al gradiente di temperatura dt/dn :

$$dQ = \lambda \frac{dt}{dn} \cdot dS$$

λ - coefficiente di conducibilità termica λ (W/m°C)

dt/dn : gradiente di temperatura, è una misura dell'intensità della variazione di temperatura in direzione della normale alla superficie isoterma.

Scambio per convezione

La trasmissione di calore per convezione è accompagnata da uno spostamento nello spazio di volumi di fluido (liquido o di gas) non uniformemente riscaldati. In accordo con la legge di Newton-Richman la quantità di calore Q trasportata dal fluido alla parete è proporzionale

alla superficie di scambio ed alla differenza di temperatura fra la parete solida T_s e la temperatura del fluido T_{air} , da cui:

$$q_c = h_c A (T_s - T_{air})$$

dove:

q_c : potenza termica convettiva (W)

A: l'ampiezza di area attraverso cui si scambia calore (m^2)

T_s : temperatura sulla superficie

T_{aria} : temperatura dell'aria, a distanza sufficiente dalla superficie

h_c : coefficiente di trasmissione di calore ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

Scambio per irraggiamento

E' fondamentale tener conto di una legge basilare, detta legge di Stefan-Boltzmann, la quale stabilisce che la potenza irradiata da un corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura assoluta. Per i corpi reali (o "corpi grigi") si ha:

$$q_i = \sigma \varepsilon A T^4$$

q_i : potenza termica irradiata dalla superficie (W)

A: ampiezza di area attraverso cui si irraggia calore (m^2)

T: temperatura assoluta espressa (K)

σ : costante di Stefan-Boltzmann ($W/m^2 \text{ } K^4$)

ε : emissività della superficie

Per rendere conto della realtà si usa moltiplicare la costante σ per l'emissività ε , che dipende dalla superficie del corpo preso in considerazione oltre che dalla sua temperatura ed è compresa fra 0 (per i corpi *idealmente bianchi*) e 1 (per i corpi *idealmente neri*). Generalmente si è interessati a conoscere lo scambio netto per irraggiamento tra l'involucro edilizio ed i corpi circostanti (supposti tutti mediamente collocati ad una temperatura T_{surr}): infatti l'involucro irraggia verso l'esterno ed è irraggiato dai corpi circostanti. Tale scambio coinvolge la legge di Stefan-Boltzmann, con le sue quarte potenze della temperatura, ma si semplifica normalmente in una relazione che coinvolge una differenza di temperature alla prima potenza:

$$q^{\text{rad}} = \sigma \varepsilon A (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \approx h_r A (T_s - T_{\text{surr}})$$

q^{rad} : potenza netta per irraggiamento (W)

T_s : temperatura della superficie (K)

T_{surr} : temperatura dell'ambiente circostante distante che racchiude l'edificio (in K); in genere si assume che $T_{\text{surr}} = T_s$ per superfici verticali (pareti), mentre $T_{\text{surr}} = T_s - 4 \text{ K}$ per superfici orizzontali (tetti)

A: ampiezza di area attraverso cui si scambia calore per irraggiamento (m^2)

h_r : coefficiente di trasferimento netto del flusso di calore per irraggiamento (si calcola tenendo conto sia dell'emissività ε che della costante di Stefan-Boltzmann σ , e si esprime in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

Scambio combinato di calore

Usualmente i due effetti di scambio di calore verso la superficie di un edificio, quello dovuto a convezione e quello dovuto ad irraggiamento, si sommano assieme e si rappresentano in maniera semplificata con un'unica equazione:

$$q = q_c + q^{\text{rad}} = h_c A (T_s - T_{\text{aria}}) + h_r A (T_s - T_{\text{surr}}) = h_e A (T_s - T_0) =$$

$$h_e A (T_s - T_{\text{air}}) + A \Delta q$$

dove:

$h_e = h_c + h_r$ coefficiente combinato di trasferimento del flusso di calore

$T_0 = (h_c T_{\text{aria}} + h_r T_{\text{surr}}) / h_e$. Se $T_{\text{surr}} = T_{\text{aria}}$, ne consegue che $T_0 = T_{\text{aria}}$

Δq : termine correttivo di potenza termica per il bilancio termico se $T_{\text{surr}} \neq T_{\text{aria}}$

A: ampiezza di area attraverso cui si scambia calore per irraggiamento (m^2)

Il valore di h_e usualmente impiegato è pari a 2, mentre abbiamo:

25 $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$, per scambi di pareti verticali verso l'esterno dell'edificio

8.3 $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$, per scambi di pareti verticali verso l'interno dell'edificio

8.3 $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$, per scambi di pareti orizzontali verso l'alto

6 $\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$, per scambi di pareti orizzontali verso il basso

Temperatura Sol-Air

Un bilancio energetico completo sulla superficie, che riporti lo scambio combinato di calore e tenga conto dell'irraggiamento solare G, produce la seguente relazione:

$$q = h_e A (T_s - T_{air}) + A \Delta q - \alpha AG,$$

in cui

α : coefficiente di assorbimento (per la radiazione solare) della superficie;

G: radiazione globale incidente sulla superficie; si mette il segno meno perché nella relazione precedente si suppone positiva la potenza uscente, mentre la G è entrante.

Trasmittanza termica

La proprietà specifica di ogni elemento strutturale si definisce trasmittanza termica (U) e rappresenta il “flusso di calore che passa da un fluido ad un altro attraverso una parete di 1 mq di superficie e Δt dei due fluidi = 1 K (1 Kelvin)”. La sua unità di misura è il (W/m²K).

La trasmittanza termica è una grandezza fisica che rappresenta il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria in un tempo unitario, sottoposta ad una differenza di temperatura unitaria. La “U” è legata alle caratteristiche del materiale che costituisce la struttura e alle condizioni di scambio termico (convezione, irraggiamento, conduzione interna). La trasmittanza termica si assume pari all’inverso della sommatoria delle resistenze termiche degli strati della parete (Norma UNI 7357/74). Per il calcolo della trasmittanza termica dei componenti opachi è necessario conoscere:

- le proprietà termofisiche dei materiali, ricavate dai dati di accompagnamento della marcatura CE oppure dalla norma UNI 10351 o dalla UNI EN 1745;
- le resistenze termiche di murature e solai, ricavate dai dati di accompagnamento della marcatura CE oppure dalla norma UNI 10355 o dalla UNI EN 1745;
- i coefficienti superficiali di scambio termico e le resistenze termiche delle intercapedini d’aria conformi ai valori stabiliti dalla UNI EN ISO 6946.

Noti i dati, di cui sopra, si ricava il valore della trasmittanza U con le seguenti relazioni:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

$$R_T = R_{si} + R_1 + \dots \dots R_N + R_{se}$$

$$R_i = \frac{d}{\lambda}$$

dove:

R_{si} : resistenza superficiale interna [m^2K/W]

R_i : resistenza termica di ciascun strato [m^2K/W]

R_{se} : resistenza superficiale esterna [m^2K/W]

con:

d : spessore dello strato componente [m]

λ : coefficiente di conducibilità termica [W/mK]

Il flusso termico q trasmesso tra i due fluidi in cui è immersa la parete è esprimibile tenendo conto della trasmittanza U che, in definitiva, rappresenta il coefficiente globale di scambio termico. Per una generica superficie (orizzontale oppure verticale) avente una superficie S ed un salto termico tra i due fluidi (aria) che essa separa pari a $(T_1 - T_2)$, possiamo scrivere:

$$q = U \cdot S \cdot (T_1 - T_2)$$

La relazione di cui sopra è valida sotto alcune ipotesi semplificative:

- il flusso termico è misurato in W (sistema SI)
- regime stazionario
- superficie piana ad estensione infinita
- materiale componente perfettamente omogeneo isotropo
- facce esterne isoterme (temperatura costante)

La superficie esterna di un edificio si riscalderà (o si raffredderà) come risultato di scambio di calore di tipo convettivo (con l'aria circostante) e per irraggiamento (con le superfici dei corpi circostanti e col sole nelle ore diurne), mentre l'ambiente interno risentirà del trasferimento di calore per effetto conduttivo (dalla superficie esterna a quella interna o viceversa) e per convezione e irraggiamento (dalla superficie interna all'ambiente interno). La fonte degli scambi termici è la radiazione solare, che a causa delle variazioni nel tempo (stagioni, giornata) e nello spazio determina il clima nelle diverse aree geografiche. L'apporto solare assorbito e non riemesso verso l'atmosfera per convezione e per irraggiamento nell'infrarosso, va a riscaldare l'edificio (Figura 1).

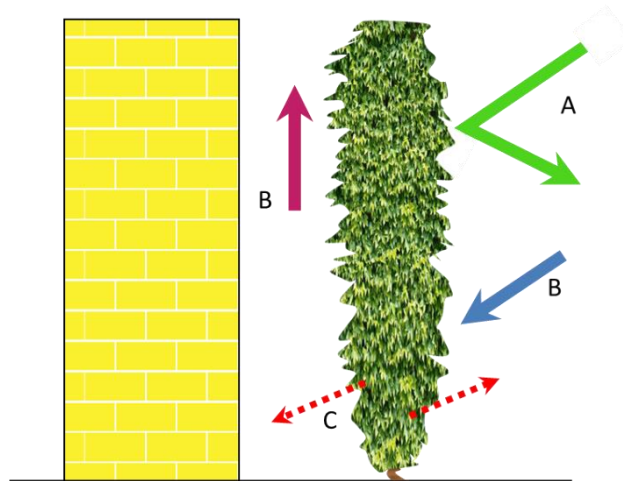


Figura 1 - Schema di un edificio dotato di coltre vegetale distanziata dalla facciata. La radiazione solare incidente viene riflessa ed assorbita dalla vegetazione che genera una riduzione della radiazione riemessa sotto forma di onda lunga (calore) dalla vegetazione. A) Riflessione della radiazione visibile nella banda del verde, B) Assorbimento della radiazione solare nella banda blu-violetto e in quella del rosso impiegata nei processi di evapotraspirazione, C) Radiazione infrarossa riemessa. La radiazione infrarossa riemessa è inferiore poiché parte dell'energia luminosa.

I parametri rilevanti ai fini dei flussi termici legati alla radiazione solare sono:

- Riflettanza solare (albedo): è la frazione ri-emessa dall'irradiazione solare ($<2.5\mu\text{m}$) rispetto a quella incidente. Il suo valore è dato dal rapporto tra la quantità di energia riflessa da una superficie e l'energia totale incidente. Maggiore è l'albedo, minore la quantità di energia immagazzinata dal corpo e minore la sua temperatura superficiale.
- Emissività termica (ϵ): è il rapporto tra l'emissione di calore della superficie mediante irraggiamento termico nell'infrarosso ($>2.5\mu\text{m}$) e la massima emissione teorica (corpo nero). Maggiore è l'emissività, maggiore la quantità di energia che il corpo è in grado di rilasciare sotto forma di calore (radiazione infrarossa). L'emissività è un parametro compreso fra 0 (tutta l'energia è riflessa) e 1 (1 = corpo nero, tutta l'energia è assorbita).
- Indice di Riflessione Solare (*Solar Reflectance Index*, SRI): è il parametro che esprime la capacità di un materiale di respingere il calore solare coniugando i valori di riflettanza ed emittanza. È definito in modo tale da risultare 0 per il nero standard e 100 per il bianco. I materiali con più elevato valore di SRI riducono le temperature superficiali delle coperture.

In ultima analisi, per ridurre il riscaldamento estivo di un edificio è necessario che la sua superficie esterna possieda elevata capacità di riflettere l'irradiazione solare e di cedere

energia all'atmosfera per irraggiamento termico nell'infrarosso. Un flusso minore di calore nelle pareti esterne significa che le temperature superficiali delle pareti esterne risultano ridotte. Il flusso di calore attraverso le pareti dell'edificio dall'esterno verso l'interno viene influenzato dalla differenza di temperatura tra l'aria interna e la temperatura superficiale delle facciate esterne, verticali e orizzontali dell'edificio. Pertanto, la temperatura superficiale delle pareti esterne rappresenta un indice del calore che può fluire negli ambienti dell'edificio e per aumentarne la temperatura. Le coltri vegetali collocate a copertura di superfici dell'edificio, soprattutto nei periodi estivi contribuiscono a mantenere temperature meno elevate del tetto e delle facciate esterne e quindi favoriscono la riduzione del flusso di calore verso l'interno (Campiotti et al., 2018). Tra i benefici associati ai sistemi vegetali abbiamo:

- diminuzione del calore apportato dalla radiazione solare dovuto al consumo di energia con i fenomeni della evapotraspirazione e della fotosintesi clorofilliana;
- aumento dell'isolamento delle superfici vegetate dell'edificio che in estate consente di mantenere una temperatura superficiale inferiore rispetto a quelle non vegetate.

Le considerazioni energetiche sull'impiego della vegetazione negli edifici si possono sintetizzare in un maggiore isolamento termico dell'edificio. Più in dettaglio:

- regime invernale: maggiore isolamento termico delle facciate in condizioni di "asciutto": la capacità di isolamento del verde diminuisce con la presenza di acqua;
- regime estivo: il verde agisce come isolante termico in condizioni di "asciutto" oltre che come estrattore naturale di calore dall'ambiente poiché le piante accumulano calore che viene dissipato per evapotraspirazione e per fotosintesi.

1.2 Prototipo di tetto verde, caso studio ENEA

La realizzazione del tetto verde ha previsto una tipologia di sistema multistrato verde pensile intensivo leggero denominato Geoplast (Figure 2 e 3) (Campiotti et Al., 2015). Secondo la norma UNI/TS 11300-1, i valori delle trasmittanze termiche sono risultati pari a 0,35 per il tetto non vegetato e a 0,31 per il tetto vegetato (Tabella1).

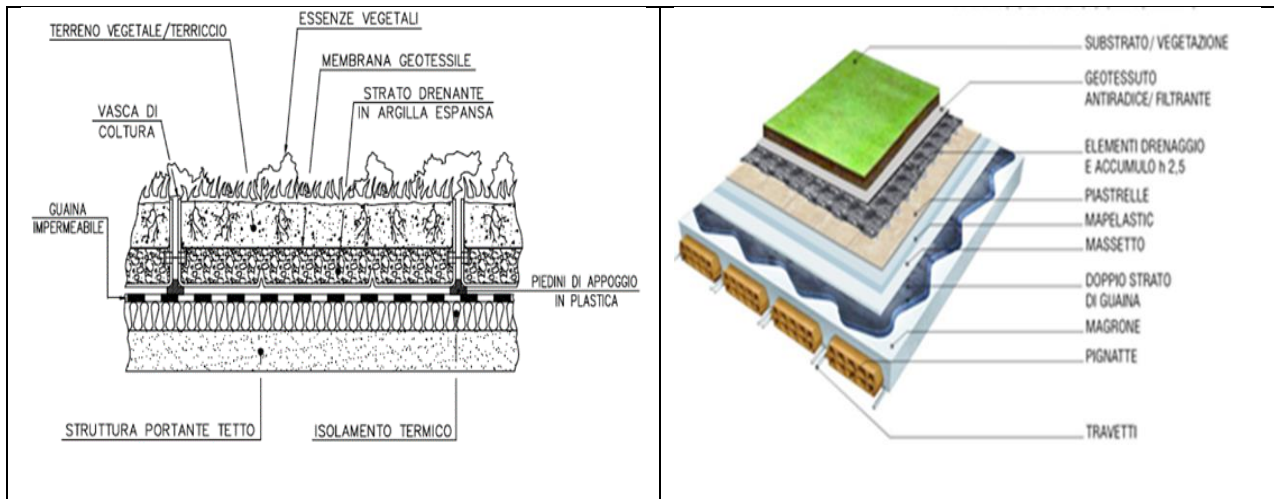


Figura 2 – Caratteristiche della stratigrafia del tetto verde.



Figura 3 - Tetto verde sperimentale.

STRATIGRAFIA					
DESCRIZIONE		SPESSORE	CONDUTTIVITA'	RESISTENZA	TRASMITTANZA
		(m)	[λ]	TERMICA [R]	TERMICA [τ]
			W/mK	m ² K/W	W/m ² K
Solaio	Resistenza termica interna			0,100	
	Intonaco interno		0,015	0,240	0,063
	Pignatta *		0,180		0,300
	Isolante termico		0,080	0,035	2,286
	Massetto in cls		0,050	1,490	0,034
	Guaina imp. Bituminosa		0,004	0,150	0,027
	Piastrelle		0,012	0,800	0,015
	Resistenza termica esterna				0,040
RESISTENZA TERMICA STRUTTURA [Rstruttura]				2,864	
TRASMITTANZA TERMICA STRUTTURA [Ustruttura]					0,35
Verde	Strato di geotessile non tessuto (TNT)		0,132	0,366	0,361
	Manto sintetico in PVC, tipo HarpoPlan ZD UV				
	Sistema multistrato verde**				
RESISTENZA TERMICA VERDE [Rgreen]				0,361	
TRASMITTANZA TERMICA GREEN [Ugreen]					2,77
RESISTENZA TERMICA TOTALE [Rtotale]				3,225	
TRASMITTANZA TERMICA TOTALE [Utotale]					0,31
* Pignatta - UNI 10355				PERCENTUALE di guadagno	11,19%
** Sistema estensivo con spessore di sub strato medio pari a 13 cm					

Tabella 1 - Descrizione della stratigrafia del tetto verde in relazione all'inserimento del verde.

L'attività progettuale ha previsto lo studio relativo all'influenza della vegetazione rispetto alle temperature superficiali della tipologia di tetto vegetato (coperto) e non vegetato (scoperto). La Tabella 2 mostra i parametri e le formule prese in considerazione per la valutazione delle curve riferite alla temperatura superficiale e ai flussi termici.

<p>I flusso termico è stato calcolato con la relazione:</p> $q = U \cdot S \cdot \Delta T \cdot t \quad [W \cdot h]$ <p>con:</p> <p>q = Flusso termico (KWh/m2);</p> <p>U = Trasmittanza (W/m²K);</p> <p>S = Superficie (m²);</p> <p>ΔT = Differenza di temperatura tra tetto scoperto e coperto (°C);</p> <p>T = Tempo (1 h).</p>	<p>Parametri tetto</p> <p>TS11 = temperatura superficiale tetto coperto.</p> <p>TS12 = temperatura superficiale tetto scoperto.</p> <p>Tint (temperatura interna) = 26 °C.</p> <p>Differenza (TS11-Tint).</p> <p>Differenza (TS12-Tint).</p> <p>Intervallo temporale tra due misure = 1 hr.</p> <p>Trasmittanza termica tetto coperto = 0,31 W/m²K.</p> <p>Trasmittanza termica tetto scoperto = 0,35 W/m²K.</p> <p>Flusso termico tetto coperto (kWh/m²).</p> <p>Flusso termico tetto scoperto (kWh/m²).</p> <p>Variazione flusso termico (kWh/m²).</p>
---	---

Tabella 2 - Parametri e procedura utilizzati per la stima dei flussi termici

Le figure sotto riportate mostrano le differenze in termini di temperatura superficiale delle due tipologie di tetto, rispettivamente tetto vegetato (coperto) e tetto non vegetato (scoperto) (Figure 4, 4a e 5). Risulta evidente come l'effetto del verde oltre a ridurre le temperature superficiali, che si mantengono intorno alla temperatura di "comfort" di 26 °C, secondo la UNI/TS 11300-1, evita le forti variazioni di temperatura che, invece, sono presenti nella tipologia di tetto privo di vegetazione che mostra "picchi" di temperatura che sfiorano i 50 °C nelle ore più calde (Figure 3, 3a). Alla riduzione di temperatura superficiale si associa una riduzione dei flussi termici "entranti" nell'edificio (Figura 4).

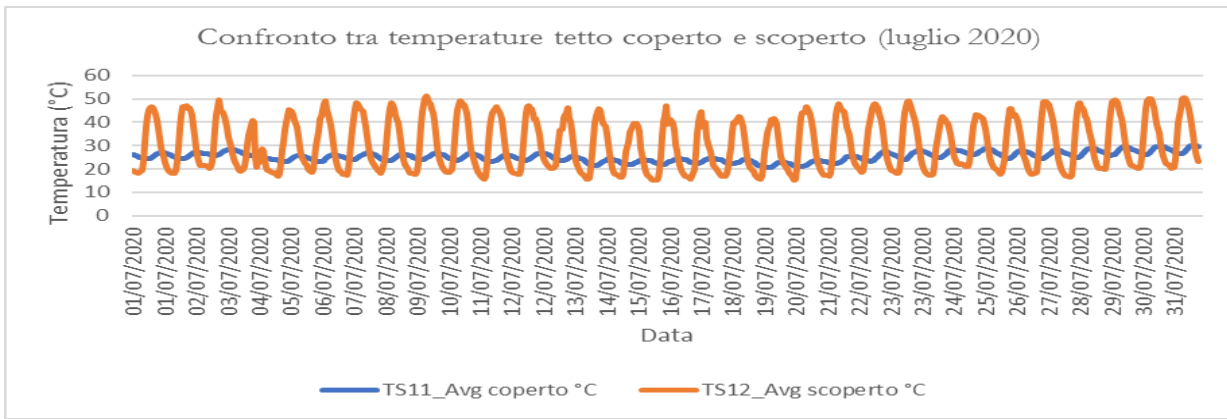


Figura 4 - Confronto tra le temperature superficiali del tetto coperto (vegetato) e scoperto (non-vegetato).

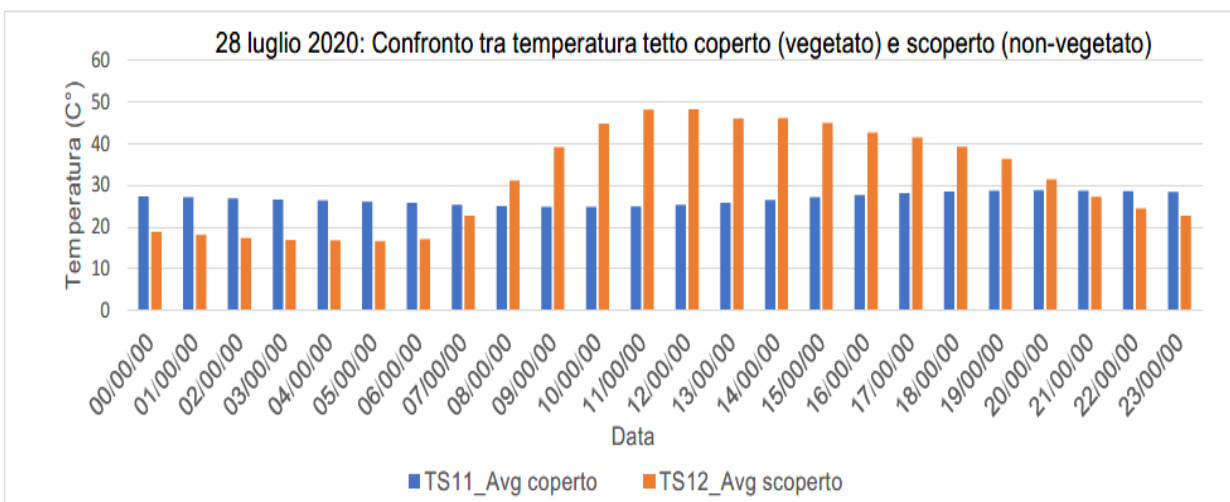


Figura 4a – Confronto temperature superficiali nell’arco di 24 ore (28 luglio 2020).

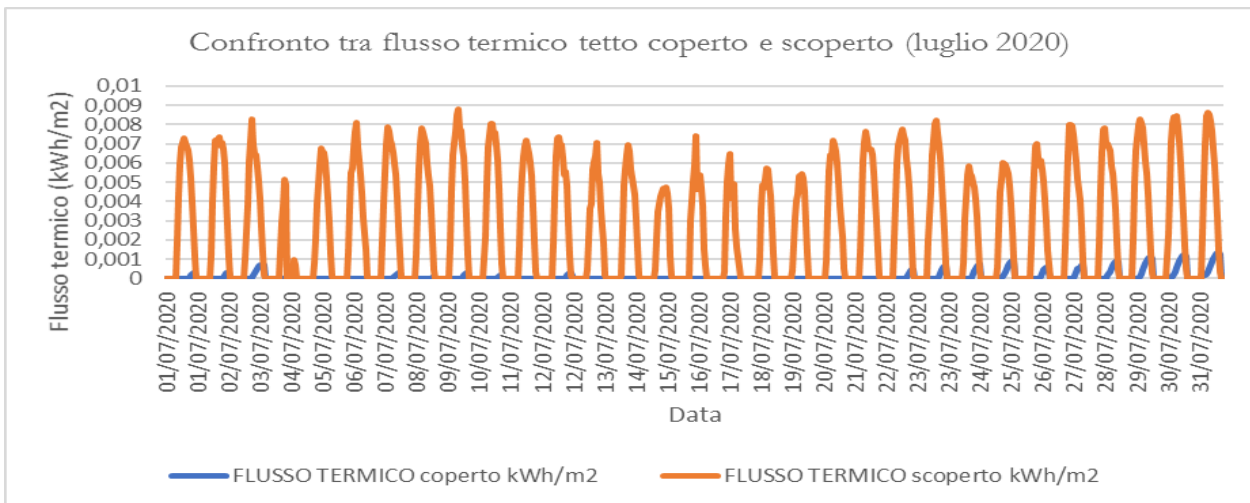


Figura 5 - Confronto tra i valori dei flussi termici “entranti” nell’edificio prototipo in relazione alla presenza

(coperto) o assenza (scoperto) di vegetazione sul tetto.

L'influenza della vegetazione sulla temperatura superficiale del tetto dell'edificio viene confermata dalla forte significatività della regressione lineare ($R^2=0,80$) (Figura 6).

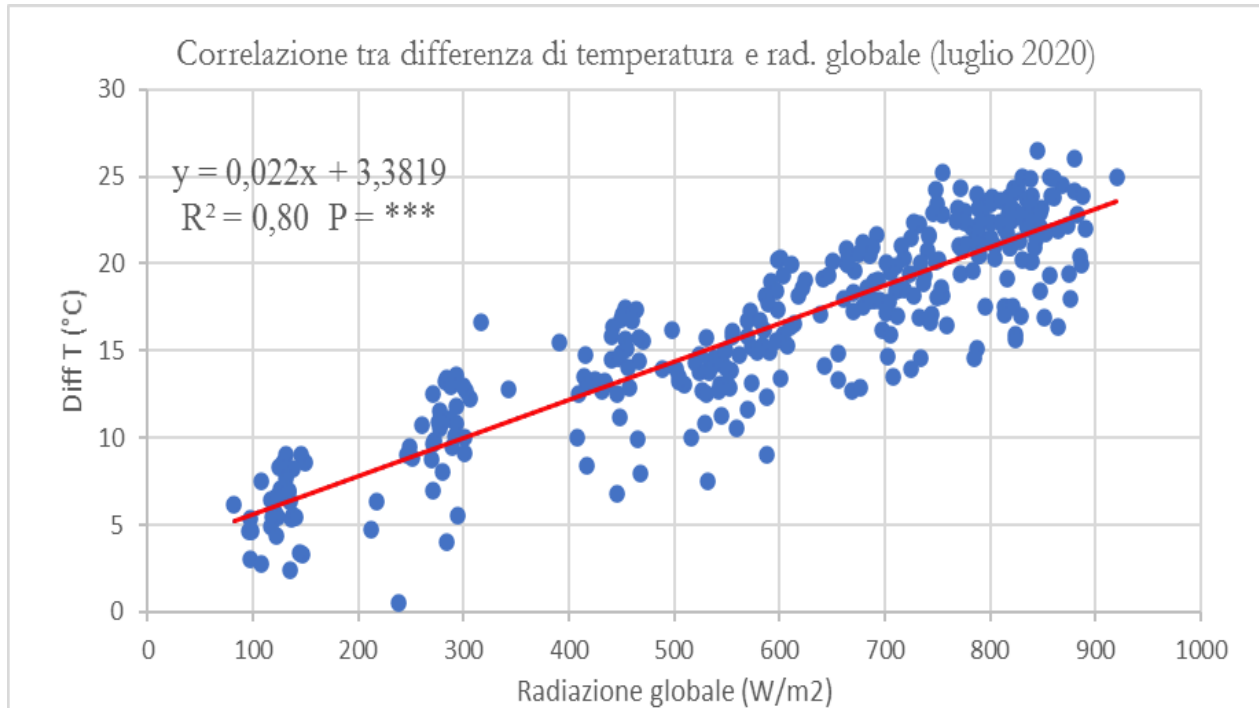


Figura 6 - Curva di regressione tra la differenza di temperatura superficiale tra tetto non vegetato e vegetato rispetto alla radiazione globale incidente. I dati si riferiscono all'arco temporale tra le ore 9:00 e le ore 19:00.

1.3 Prototipo di verde parietale, caso studio ENEA

Il sistema di verde verticale è stato realizzato sulla base di un impianto costituito da una struttura d'acciaio auto-sostenibile, ancorata a terra sulle facciate di Sud-Est e di Sud-Ovest, dotata di una grata metallica disposta a 60 cm dalle pareti dell'edificio (Figura 7).

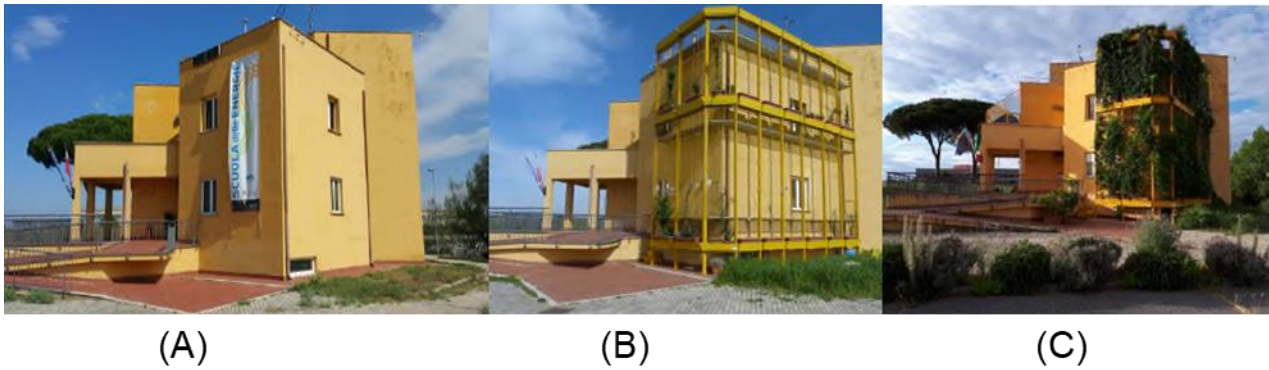


Figura 7 - Edificio prototipo: privo di struttura (A), con struttura (B), con vegetazione (C)

Per consentire l'operatività e i rilievi scientifiche, la struttura è stata dotata di passaggi metallici orizzontali su tre altezze (Campiotti et Al., 2015). I dati di seguito riportati si riferiscono principalmente allo studio della facciata di sud-ovest. Come per il tetto verde, il calcolo relativo alla stima dei flussi termici è stato effettuato con la relazione seguente:

$$q = U \cdot S \cdot \Delta T \cdot t \quad [W \cdot h]$$

Sono stati considerati i seguenti dati di input:

Temperatura facciata priva dalla coltre vegetale [T]:	°C
Temperatura facciata protetta dalla coltre vegetale [T]:	°C
Temperatura <i>comfort</i> interna [T]:	fissata 26 °C (299,15 K)
Trasmittanza parete [U]:	0,80 W/m ² K
Area di riferimento [S]:	1 m ²
Intervallo temporale [t] tra due misure consecutive:	1 h

Sulla base dei dati dell'edificio prototipo, sono state calcolate la trasmittanza termica delle facciate prive di vegetazione (Tabella 4) le temperature superficiali (Figura 8) e le variazioni dei flussi termici (Figura 9), in accordo con la presenza o l'assenza della vegetazione.

		Descrizione	Spessore	Conductività [λ]	Resistenza termica [R]	Trasmittanza termica (U)
			(m)	W/mK	m^2K/W	$W/m^2 K$
Rsi	Parete	Resistenza termica interna			0,100	
1		Intonaco interno	0,020	0,650	0,031	
2		Mattoni forati	0,080	0,230	0,348	
3		Intercapedine aria	0,055	0,260	0,212	
		Malta di calce e cemento	0,005			
4		Mattoni forati	0,120	0,230	0,522	
		Intonaco esterno	0,020	0,650	0,031	
5		Resistenza termica esterna				0,04
	RESISTENZA TERMICA STRUTTURA [Rstruttura]				1,243	
	TRASMITTANZA TERMICA STRUTTURA [Ustruttura]					0,80

Tabella 3 - Stratigrafia della parete dell'edificio prototipo.

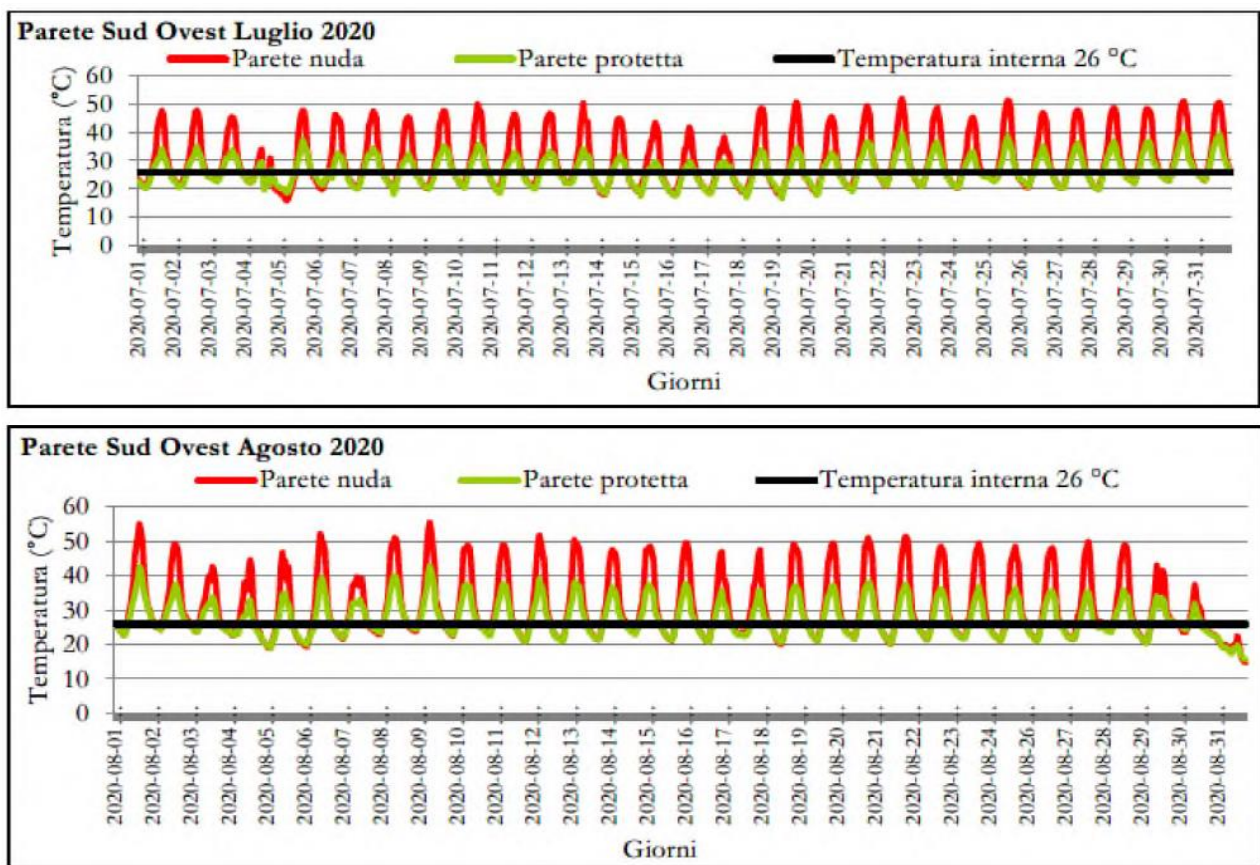


Figura 8 - Confronto tra le temperature superficiali della facciata vegetata (parete protetta) e non vegetata (parete nuda).

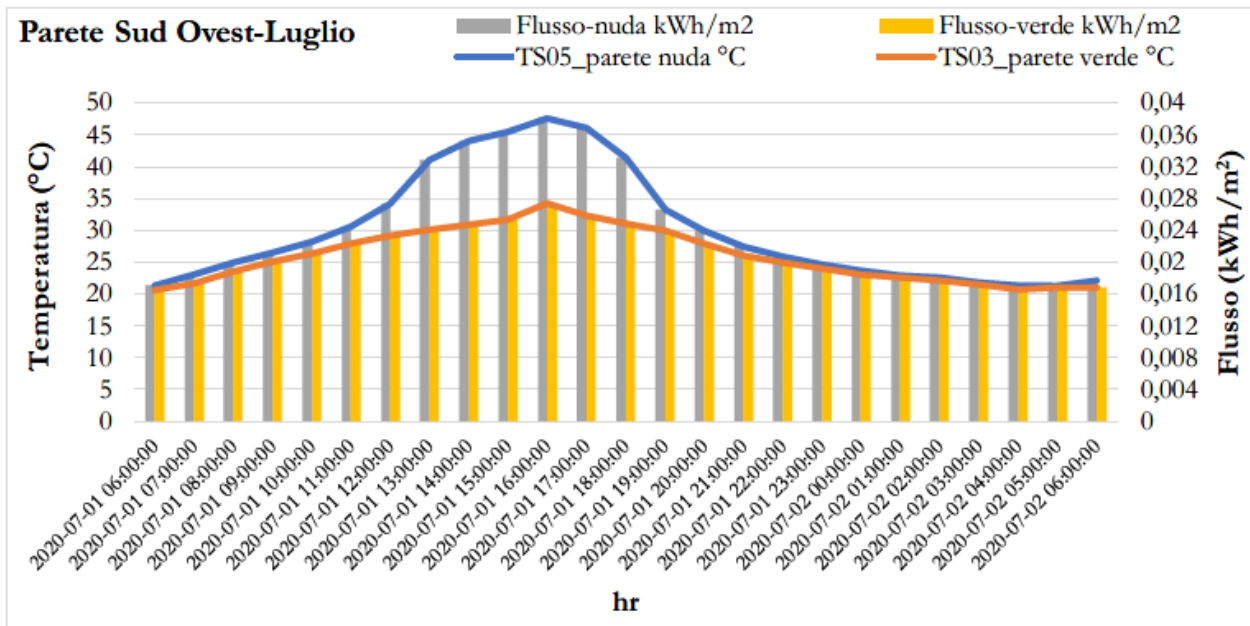


Figura 9 - Sud Ovest: Temperatura superficiale e flussi termici entranti in relazione alla facciata non vegetata (parete nuda) e vegetata (parete verde).

La curva di regressione sotto riportata, nonostante il valore moderato del coefficiente di determinazione ($R^2 = 0,5$), conferma il legame che si stabilisce tra la presenza della vegetazione e la riduzione della radiazione solare incidente sull'edificio prototipo (Figura 10).

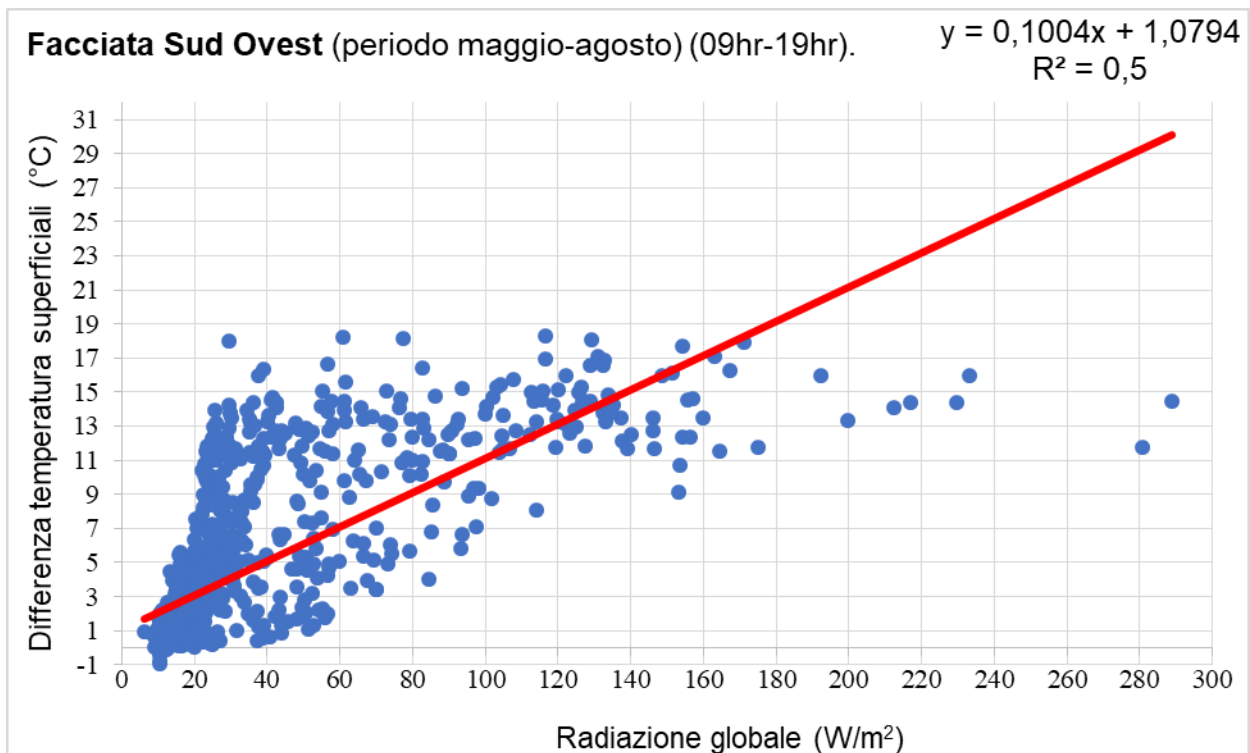


Figura 10 - Curva di regressione tra radiazione solare e differenza delle temperature superficiali tra facciata non vegetata (parete nuda) e vegetata (parete verde).

Conclusioni

Un maggiore inverdimento delle aree urbane è allineato con la politica del “Green Deal” della Commissione europea, fortemente concentrata sul risparmio di energia fossile e sull’abbattimento delle emissioni di CO₂. Una maggiore diffusione del verde è raccomandata anche dal recente G20 tenutosi in Italia, come strategia naturale e di basso costo per migliorare la sostenibilità energetica ed ambientale delle città. Dal 2015, nel Centro Casaccia dell’ENEA, è stata avviata un’attività di ricerca nell’ambito del Programma Ricerca di Sistema Elettrico (RDS), finanziata dal Ministero dello Sviluppo Economico, per lo studio degli aspetti biologici, agronomici ed energetici del verde sugli edifici. Il piano di ricerca ha previsto la realizzazione un edificio prototipo sul quale è stato realizzato un sistema di inverdimento sia verticale (pareti verdi) che orizzontale (tetto verde). I risultati sono annualmente pubblicati con pubblicazioni e rapporti tecnici diffusi sulla rete internet.

Bibliografia

- Campiotti C., Consorti L., Giagnacovo G., Latini A., Puglisi G., Scoccianti M., Viola C. 2015. Caratterizzazione di tipologie di sistemi vegetali per migliorare l'efficienza energetica degli edifici nella città metropolitana. Report RdS/PAR2015/141.
- Campiotti C.A., Giagnacovo G., Latini A., Margiotta F., Nencini L., Pazzola L., Scoccianti M. 2018. L'uso della vegetazione per aumentare l'efficienza energetica degli edifici e l'impiego di sistemi di climatizzazione rinnovabile: estensione dei risultati. Report RdS/PAR2018/107.
- Direttiva 2018/844.Modifica della direttiva 2010/31 sulla prestazione energetica nell'edilizia.
- European Commission. Infrastrutture verdi - Rafforzare il capitale naturale in Europa. COM(2013) 249 final.
- DimitriJjevic D., Živkovic P., Brankovic J., Dobrnjac M., Stevanovic Z. 2018. Air pollution removal and control by green living roofs systems. Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering Tome XI [2018] | Fascicule 1 [January – March].Hewitt, C.N., Ashworth, K. & MacKenzie, A.R. 2020. Using green infrastructure to improve urban air quality (GI4AQ). *Ambio* 49, 62–73 (2020).
- Francesco Bianchi, Roberto Carratù. 2005. La trasmissione del calore. Editore: Aracne. EAN: 9788879997454. ISBN: 8879997459.
- Parolini G., Del Monaco A., Fontana D.M., Fondamenti di Fisica Tecnica. Ed. Utet, 1983.
- Quaranta, E., Dorati, C. & Pistocchi, A. 2021. Water, energy and climate benefits of urban greening throughout Europe under different climatic scenarios. *Sci Rep* 11, 12163 (2021).
- UNI EN ISO 6946: 2018 “Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo”.
- UNI EN 13370: 2018. La norma fornisce i metodi di calcolo dei coefficienti di trasferimento del calore e dei flussi termici degli elementi di edifici in contatto con il terreno, compresi le solette appoggiate al terreno, le solette su vespaio e i piani interrati. <http://store.uni.com/catalogo/uni-en-iso-13370-2018>.
- UNI/TS 11300-1. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: https://www.de-mas.it/wp-content/uploads/UNI_TS_11300_prestazioni-energetiche-edifici.pdf.
- GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction 2020-2050 Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector. www.globalabc.org.

2 EFFETTI DELLE PARETI VERDI SUL REGIME TERMICO DELL'INVOLUCRO DELL'EDIFICIO (a cura di Evelia Schettini, Fabiana Convertino, Ileana Blanco, Giuliano Vox)

Durante il periodo estivo nelle aree urbane si rilevano temperature superiori rispetto a quelle registrate nelle zone periferiche, suburbane e rurali circostanti, e tale differenza può essere anche superiore ai 5 °C (Rowe, 2011; Kanechi *et al.*, 2014; Karlessi *et al.*, 2009; Karlessi *et al.*, 2011). Questo fenomeno di riscaldamento urbano, conosciuto con il nome di “isola di calore urbana” (Figura 1), dipende principalmente dalla cementificazione delle città e dalla scelta dei materiali da costruzione utilizzati, ma anche dalla presenza di canyon urbani, dall’elevata densità degli edifici, dalla riduzione di aree verdi e dal calore generato dalle attività umane (Gentle *et al.*, 2011; Gladis e Schumann, 2011; Joudi *et al.*, 2013; Prado e Ferreira, 2005).

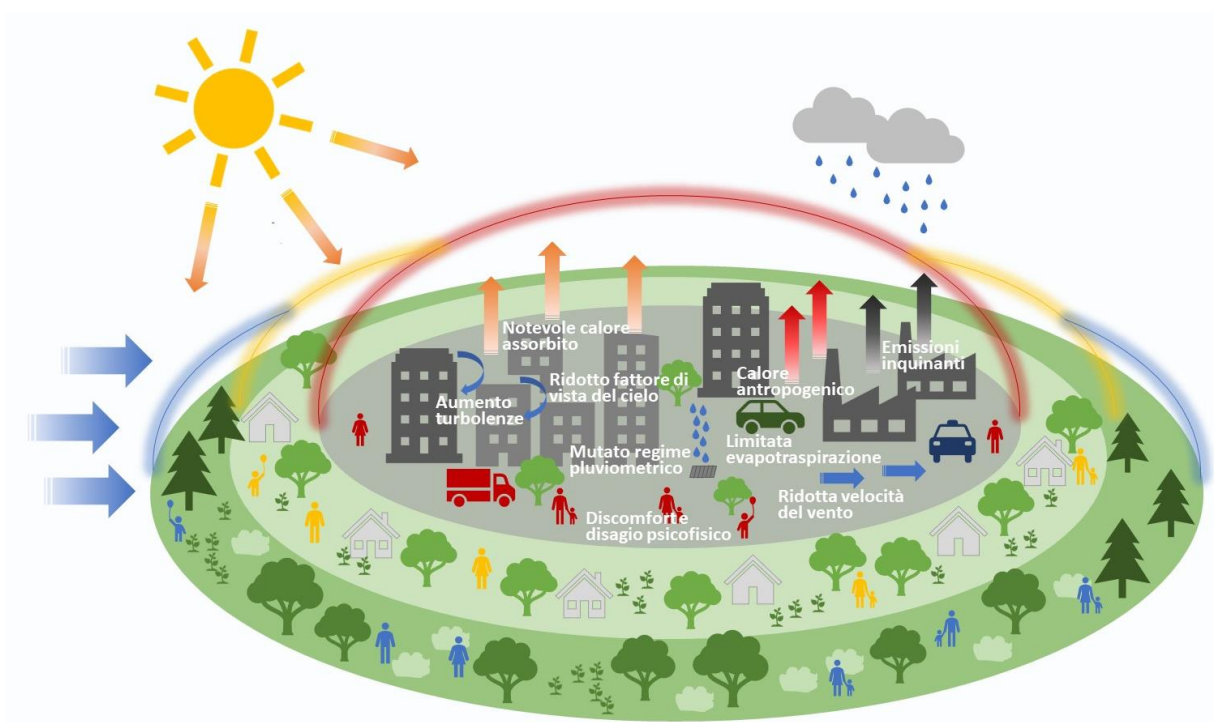


Figura 1 - Isola di calore urbana: principali cause ed effetti.

La cementificazione, cioè la copertura permanente del suolo con materiali quali asfalto o calcestruzzo per la costruzione di strade, case, ospedali, scuole ed edifici, è la forma più evidente e diffusa di copertura artificiale del suolo. Altre forme di copertura artificiale sono

relative all'asportazione del suolo per escavazione, alla compattazione del suolo dovuta alla presenza di impianti industriali, infrastrutture, manufatti, depositi permanenti di materiale o per il passaggio di mezzi di trasporto (ISPRA, 2020). In Italia il consumo di suolo continua a crescere: nel 2019 le nuove coperture artificiali hanno riguardato altri 57.5 chilometri quadrati di territorio, rispetto al 2018 (Figura 2). Nel 2019, in 14 regioni italiane è stato superato il 5% di suolo consumato complessivo con il valore percentuale più elevato in Lombardia (12.05%), Veneto (11.87%) e Campania (10.30%). In Emilia-Romagna, Friuli-Venezia Giulia, Lazio e Puglia è stato consumato suolo tra l'8 e il 10%. La Valle d'Aosta è l'unica regione rimasta sotto la soglia del 3% (ISPRA, 2020).

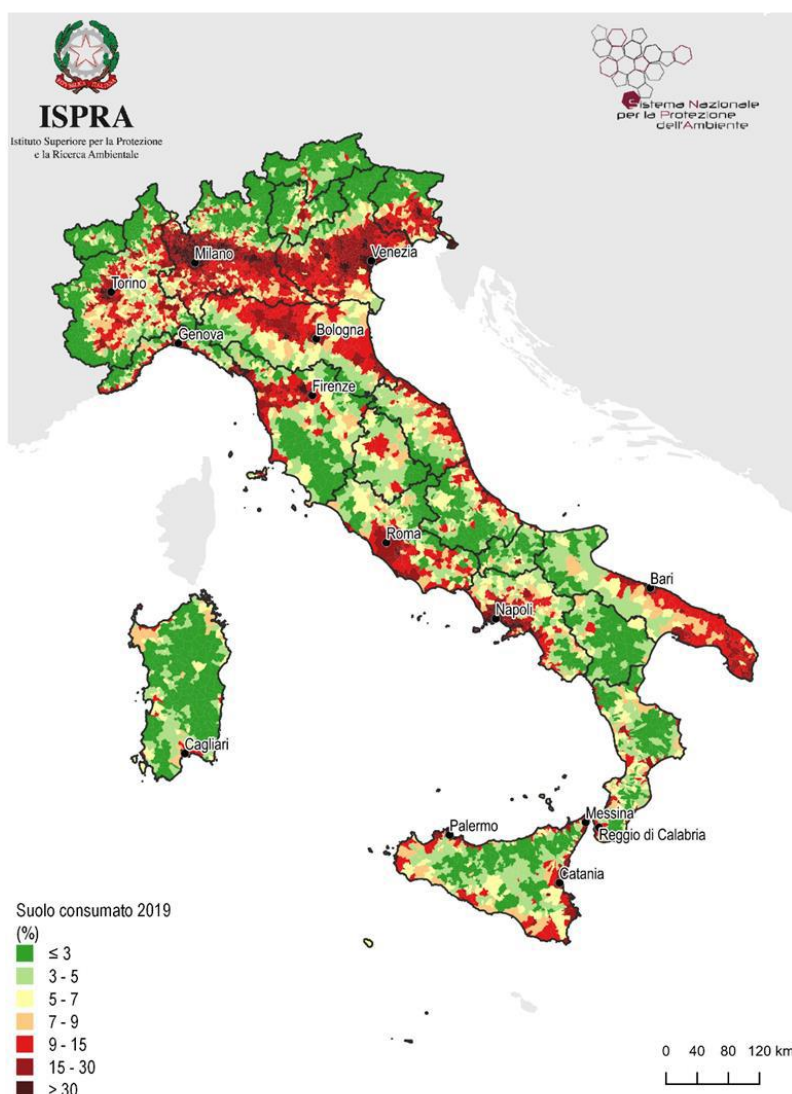


Figura 2 - Stima del suolo consumato a livello comunale in Italia nel 2019 (fonte: https://www.snpambiente.it/wp-content/uploads/2020/07/Estratto_Rapporto_consumo_di_suolo_2020-1.pdf).

I materiali da costruzione sono generalmente poco riflettenti a causa delle loro caratteristiche termiche e radiative e, pertanto, sono caratterizzati da una minore albedo rispetto alle superfici che caratterizzano le aree rurali (Berdahl e Bretz, 1997; Bretz e Akbari, 1997; Bretz et al., 1998). L'albedo evidenzia la proprietà riflettente di una superficie quando è investita dalla radiazione solare. La vegetazione spontanea o coltivata ha un'albedo dell'ordine del 0.25-0.30 mentre le superfici asfaltate possono raggiungere valori di albedo pari a 0.05 (Figura 3). Allo stesso tempo i materiali da costruzione hanno la capacità di assorbire un'elevata percentuale di radiazione solare incidente: questa, immagazzinata a causa dell'elevata inerzia termica, viene rilasciata per irraggiamento sotto forma di calore durante le ore notturne.

La presenza di canyon urbani ostacola l'asportazione di calore per convezione (Alexandri e Jones, 2008). Nelle ore notturne l'aria che ristagna all'interno dei canyon si raffredda molto lentamente rispetto alle adiacenti aree rurali perché l'energia infrarossa irraggiata nell'ambiente dalle superfici che delimitano il corridoio stradale, anziché disperdersi liberamente nello spazio, viene in gran parte catturata e più volte riflessa dagli edifici presenti ai lati opposti della strada.

La diminuzione delle aree verdi urbane è causa di minori zone di ombra, della riduzione della possibilità di intercettare la radiazione solare e di trattenere l'acqua piovana da parte delle piante, di abbassare la temperatura dell'aria grazie all'evapotraspirazione del sistema pianta-substrato di coltivazione. Il riscaldamento urbano è anche funzione dell'inquinamento atmosferico, della velocità e della direzione del vento (Oke *et al.*, 1991; Jo *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2013; Synnefa *et al.*, 2006; Uemoto *et al.*, 2010; Zinzi *et al.*, 2012). Inoltre l'effetto del vento, che favorisce un ricambio d'aria e un conseguente raffrescamento, è spesso smorzato a causa dell'elevata densità di edifici, che schermano molte aree dai moti ventosi.



Figura 3 - Albedo per alcuni materiali costruttivi usati in ambito urbano.

Calore è anche prodotto dalle attività antropogeniche e dai consumi energetici che esse comportano: attività industriali, traffico veicolare, impianti di condizionamento, produzione e consumo di energia elettrica. Gli alti livelli di inquinamento associati alle attività umane alterano le proprietà radiative dell'atmosfera (Santamouris, 2012; Gago et al., 2013). Il calore connesso a tali attività ha valori medi annui compresi tra 15 e 50 W m⁻² nelle aree urbane delle nostre latitudini, mostrando valori più alti di giorno e in inverno.

La mutata natura del territorio urbano genera, inoltre, un cambiamento del regime pluviometrico della zona in quanto i materiali strutturali non hanno la capacità di trattenere l'acqua piovana. Ne consegue una minore evaporazione, che riduce ulteriormente il raffreddamento dell'aria in prossimità del terreno. Temperature più elevate ed una maggior concentrazione di agenti inquinanti nell'atmosfera favoriscono anche lo sviluppo di temporali estivi.

Il fenomeno dell'isola di calore urbana può risultare dannoso per la salute di persone malate, di anziani e di bambini: quando le temperature dell'aria in città sono costantemente elevate nel corso delle 24 ore, l'organismo umano non riesce a riprendersi durante le ore notturne dalle condizioni di calore estremo a cui è stato sottoposto durante il giorno (Kalkstein e Davis, 1989; Petralli et al., 2006). L'effetto combinato del riscaldamento urbano e dei fenomeni di riscaldamento globale e l'aumento di intensità, frequenza e durata delle ondate di calore amplificheranno lo stress termico (Figura 4) e il disagio nell'ambiente urbano con un peggioramento delle condizioni di benessere fisico e psicologico della popolazione (Saaroni et al., 2018). Il riscaldamento urbano induce un maggiore utilizzo dei sistemi di condizionamento dell'aria degli edifici con un notevole aumento dei consumi di energia per il raffreddamento e un aumento della domanda dell'energia elettrica durante le ore di picco

(Karlessi et al., 2009; Karlessi et al., 2011; Jaffal et al., 2012). Gli impianti di condizionamento estivo emettono inoltre quantità non trascurabili di calore nell'aria esterna mediante i sistemi di raffreddamento a pompa di calore. L'intensità del riscaldamento urbano è prevedibilmente in aumento nei prossimi anni sia in Italia che nel mondo. In Italia, attualmente circa il 75% della popolazione risiede in aree urbane (Istat, 2020).

La mitigazione del fenomeno dell'isola di calore urbana dovrebbe essere associata a una pianificazione a lungo termine per uno sviluppo sostenibile delle aree urbane (Saaroni et al., 2018). Modifiche dell'ambiente fisico urbano potrebbero essere attuate mediante la realizzazione di infrastrutture verdi (Solecki et al., 2005; Gago et al., 2013).

Col termine infrastrutture verdi urbane (Figura 5) si fa riferimento a elementi di vegetazione localizzati quali spazi verdi pubblici e privati, pianificati e non pianificati, come vegetazione nativa residua, parchi, giardini, alberi da strada, campi sportivi, campi da golf, e opzioni più ingegnerizzate quali verde orizzontale e verticale (Norton et al., 2015; Raji et al., 2015; Cameron et al., 2014). Al fine di produrre cibo in maniera sostenibile, proteggere l'ambiente e le comunità urbane, possono far parte delle infrastrutture verdi urbane gli orti sociali, gli orti comunitari, gli orti realizzati sui tetti degli edifici, le serre urbane, i paesaggi edibili e le foreste in zone periurbane non gestite e residuali (Russo et al., 2017).

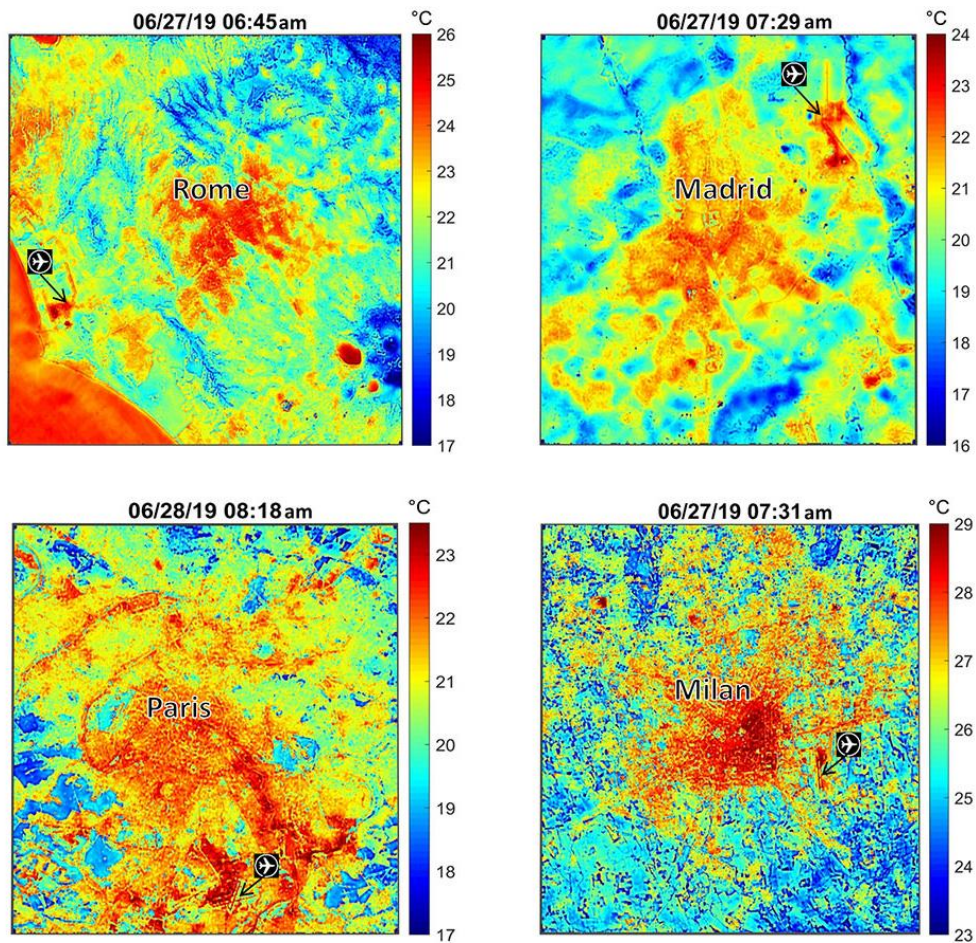


Figura 4 - Mappe della temperatura superficiale di quattro città europee durante un'ondata di calore tracciate dalla Stazione Spaziale ECOSTRESS della NASA (fonte: <https://www.jpl.nasa.gov/images/ecostress/20190702/PIA23148.jpg>).



Figura 5 - Infrastrutture verdi urbane.

La scelta di quale tipo di infrastruttura verde urbana realizzare è influenzata dal clima della regione, dalle caratteristiche delle specie vegetali e del suolo, dalla disponibilità di acqua, ma anche dalle norme comunitarie e dai valori culturali (Norton et al., 2015).

La realizzazione di infrastrutture verdi in un contesto urbano è una strategia sostenibile al fine di mitigare gli impatti dell'urbanizzazione contribuendo a migliorare il clima urbano, riducendo la temperatura dell'aria urbana, la massima temperatura e le estreme escursioni termiche superficiali, in particolare nelle regioni caratterizzate dal clima mediterraneo (Norton et al., 2015; Pérez et al., 2014; Tan et al., 2014; Vox et al., 2015; Vox et al., 2017). La presenza di verde può contribuire alla riduzione dell'inquinamento atmosferico: la riduzione delle temperature superficiali delle pareti degli edifici contribuisce a una riduzione del consumo energetico dell'edificio e, dunque, si ha una riduzione del fenomeno del riscaldamento urbano con una conseguente riduzione dell'inquinamento atmosferico (Berardi et al., 2014; Fernandez-Canero et al., 2013; Gagliano et al., 2015). Le piante agiscono come biofiltri: assorbono alcuni contaminanti, rimuovono le sostanze inquinanti e trattengono particelle sospese nell'aria (Fernandez-Cañero et al., 2013; Feng e Hewage, 2014). Le piante assorbono maggiori quantitativi di inquinanti quando si trovano in fase di crescita rispetto al periodo di riposo vegetativo (Rowe, 2011). Un metro quadrato di verde è in grado di assorbire le emissioni di particolato di una vettura emesse durante un anno (Rowe, 2011).

La presenza di infrastrutture verdi contribuisce anche all'isolamento acustico e all'assorbimento del rumore (Berardi et al., 2014; Rowe, 2011), riducendo la riflessione del suono fino a 3 dB e migliorando l'isolamento acustico fino a 8 dB (IGRA, 2020).

Il verde urbano svolge anche una serie di servizi ecosistemici come il miglioramento estetico dell'ambiente per vivere e lavorare, il miglioramento dell'habitat per invertebrati, uccelli, erbe e piante, la promozione della biodiversità (Cameron et al., 2014; Fernandez-Cañero et al., 2013). Mitiga, inoltre, il problema dei picchi di flusso dell'acqua piovana, assorbendone una parte e rallentandone il deflusso al fine di aiutarla a fluire verso i canali di scolo (Kohler e Poll, 2010; Cameron et al., 2012). La vegetazione intercetta le precipitazioni intense trattenendo nella chioma parte dell'acqua piovana; l'acqua trattenuta nel substrato evaporerà o sarà ceduta di nuovo nell'atmosfera (Rowe, 2011; IGRA, 2020). Il deflusso delle acque viene ridotto dal 50% al 100% in funzione del tipo di infrastruttura verde utilizzata, della specie vegetale, della pendenza, della composizione e della profondità del substrato, dell'intensità e della durata della pioggia (Rowe, 2011; IGRA, 2020). La qualità delle acque piovane di deflusso può essere influenzata positivamente dalla presenza del verde in quanto il substrato di coltivazione può assorbire e filtrare le sostanze inquinanti trasportate dalle

acque piovane. La qualità dell'acqua di deflusso sarà funzione della composizione e della profondità del substrato, del tipo di pianta utilizzata, delle caratteristiche costruttive e impiantistiche dell'infrastruttura verde, delle operazioni colturali eseguite (concimazione, fertirrigazione, ecc), dell'intensità della pioggia, delle fonti di inquinamento della zona, e delle proprietà fisiche e chimiche degli inquinanti (Rowe, 2011).

L'adozione di strategie di inverdimento urbano risulta interessante anche per la possibilità di migliorare l'efficienza energetica degli edifici: riducendo il ricorso a sistemi di raffrescamento attivo degli edifici e pertanto riducendone il consumo energetico in estate; aumentando l'isolamento termico in inverno; migliorando il microclima interno e la temperatura dell'aria interna degli edifici (Vox et al., 2018; Gago et al., 2013; Jim e Tsang, 2011; Köhler e Poll, 2010; Cheng et al., 2010; Perini et al., 2011; Pérez et al., 2011; Cheng et al., 2010; Jaffal et al., 2012; Köhler e Poll, 2010; Kolokotsa et al., 2013; Sfakianaki et al., 2009; Convertino et al., 2020). Una riduzione della temperatura interna pari a 0.5 °C può corrispondere ad un abbattimento dell'8% dell'utilizzo di energia elettrica per condizionamento (Dunnet e Kingsbury, 2004).

Tra le forme di inverdimento urbano ci sono i sistemi di verde verticale. Le infrastrutture verdi verticali per gli edifici sono classificate in facciate verdi (green façade) e muri verdi viventi (living wall) (Perez et al., 2011; Perini et al., 2011; Francis e Lorimer, 2011; Jim e He, 2011; Kontoleon e Eumorfopoulou, 2010). Le facciate verdi sono generalmente realizzate utilizzando piante rampicanti, che possono essere radicate nel terreno alla base della costruzione o disposte in vasi situati a diverse altezze della facciata; il verde cresce direttamente sulle pareti (Figura 6a) o su strutture di sostegno (Figura 6b) (Perez et al., 2011; Francis e Lorimer, 2011; Kontoleon e Eumorfopoulou, 2010). I limiti di questa tecnologia sono lo spazio ridotto a livello del suolo e il potenziale di crescita verticale delle piante; l'altezza massima della maggior parte delle piante rampicanti è 20 m (Kohler, 2008). La crescita delle piante rampicanti direttamente sulle pareti può danneggiare i muri o costituire un ostacolo durante la ristrutturazione edilizia (Kontoleon e Eumorfopoulou, 2010). Una soluzione tecnologica a questo problema può essere l'uso di grigliati metallici, reti, tralicci modulari, da utilizzare come elementi di supporto per le piante rampicanti (Perez et al., 2011; Kontoleon e Eumorfopoulou, 2010). Questi elementi di supporto possono essere montati direttamente sulla parete verticale o su strutture indipendenti con supporti multipli che permettono il mantenimento e l'integrità della costruzione (Perez et al., 2011; Kontoleon

e Eumorfopoulou, 2010). Se la struttura di supporto è posizionata a una certa distanza dalla facciata dell'edificio, si ha la formazione di una intercapedine di aria che permette di incrementare i benefici energetici derivanti dall'applicazione del sistema verde.

I muri verdi viventi sono realizzati con vasi o pannelli modulari, talvolta precoltivati, che sono fissati ad un supporto verticale o sulla struttura muraria; ogni vaso o pannello contiene il substrato di coltivazione (Figura 6c-d) (Perez et al., 2011; Perini et al., 2011; Francis e Lorimer, 2011; Kontoleon e Eumorfopoulou, 2010). Ogni pannello è modulare e può essere unito ad altri per rivestire superfici parietali molto estese. L'ancoraggio alla facciata avviene fissando al muro tramite viti una serie di bande metalliche disposte in successione, in modo che ogni modulo possa essere fissato ad esse per mezzo di viti lungo i suoi lati superiori ed inferiori. Ciascun pannello consente una facile circolazione del flusso dell'acqua al suo interno senza trasportare via il terriccio di coltivazione.

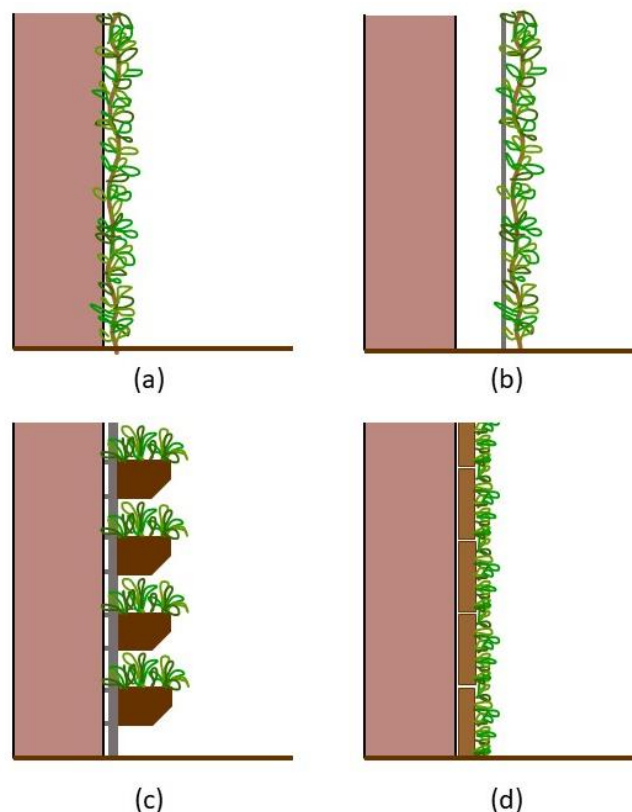


Figura 6 - Sistemi di verde verticale applicati alle chiusure verticali degli edifici: facciata verde diretta (a), facciata verde indiretta (b), muro verde realizzato con vasi modulari (c), muro verde realizzato con pannelli modulari (d).

Un altro aspetto da considerare nei sistemi di inverdimento verticale per gli edifici, che fungono anche da sistemi di risparmio energetico passivo, è la specie vegetale utilizzata.

Le piante utilizzate per le facciate verdi possono essere specie decidue o sempreverdi, ma nelle pareti viventi le piante sono, generalmente, sempreverdi. Questo fatto ha una forte influenza sulle prestazioni termiche di ogni sistema. Quando si usano piante perenni sia i periodi che necessitano di raffrescamento sia quelli di riscaldamento sono influenzati dallo strato di copertura di vegetazione. Quando, invece, si usano piante decidue solo il periodo estivo è interessato, dal momento che le funzioni svolte dallo strato verde vengono meno durante il periodo invernale e, ad esempio, la radiazione solare riesce a raggiungere le pareti dell'edificio.

La tecnica che prevede il posizionamento della vegetazione sulle facciate di edifici ha visto un crescente interesse nel mondo (Cheng et al., 2010; Jim e Tsang, 2011; Köhler e Poll, 2010; Perini et al., 2011; Pérez et al., 2011; Cameron et al., 2014; Campiotti et al., 2013; Norton et al., 2015; Tan et al., 2014; Francis e Lorimer, 2011). In Germania, una buona ricerca di base in merito alle performance ambientali delle facciate verdi ha portato allo sviluppo di norme e linee guida. Sebbene siano disponibili dati per alcune aree, soprattutto relativi alla Germania ed al Nord America, la maggior parte di tali dati non sono trasferibili a condizioni climatiche specifiche di altri paesi. Gli studi effettuati sono stati sviluppati per regioni aventi clima freddo e con condizioni climatiche favorevoli allo sviluppo della vegetazione mentre pochi dati sono disponibili per l'ambiente climatico mediterraneo caratterizzato sia da estati calde sia dalla scarsità di acqua (Fioretti et al., 2010). Nelle regioni del Mediterraneo, la diffusione della suddetta tecnologia "verde" è purtroppo limitata a causa della scarsa conoscenza dei suoi benefici e delle sue specifiche caratteristiche, e anche per la mancanza di incentivi statali (Fernandez-Cañero et al., 2013). Nonostante l'interesse crescente, vi è ancora una carenza di dati quantitativi che possano illustrare compiutamente sia i materiali che le tecniche o i contributi positivi che le infrastrutture verdi possono davvero fornire per l'efficienza e il risparmio energetico degli edifici, ai suoi occupanti, ed alla società.

Nell'ambito di ricerche condotte in collaborazione con l'ENEA, l'Università degli Studi di Bari Aldo Moro – Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT) ha svolto attività di ricerca aventi come obiettivo la progettazione di edifici ricoperti con essenze vegetali che assicurino un microclima ideale all'interno e che consentano di contenere i costi energetici in ambiente climatico mediterraneo. Una prova sperimentale è stata effettuata

presso l'Università di Bari, al fine di superare la mancanza in letteratura di dati sperimentali, relativamente alla regione mediterranea, per un periodo sufficientemente esteso.

2.1 Realizzazione di un prototipo di edificio con parete verde a microclima controllato presso il campo sperimentale dell'Università di Bari

Il gruppo di ricerca del Dipartimento DISAAT ha realizzato un prototipo di edificio con parete verde a microclima controllato in scala presso il centro didattico sperimentale "Martucci" dell'Università di Bari sito in Valenzano (Bari; 41°05' N, 16° 53' E, 124 m s.l.m.). Le condizioni climatiche sono tipicamente mediterranee, i.e. il clima è particolarmente secco nel periodo estivo e mite in quello invernale e le precipitazioni piovose si concentrano nel periodo che va dall'autunno alla primavera.

Il prototipo sperimentale ha la parete verde orientata a sud. Il blocco sperimentale ha una pianta rettangolare, con dimensioni esterne pari a 4.20 m x 1.50 m, ed un'altezza interna media di 2.30 m (Figura 7). Esso è stato pensato e realizzato privilegiando soluzioni costruttive a secco. Le diverse pareti del prototipo sperimentale sono state realizzate utilizzando materiali diversi in funzione delle diverse funzioni a cui devono assolvere.

Un cordolo in calcestruzzo armato è stato realizzato come base per la parete a sud, mentre il riempimento della restante superficie è stato fatto con pietrisco, che funge anche da allettamento per la pavimentazione costituita da mattoni con ciottoli.

La parete rivolta a sud è stata realizzata con laterizi forati, tecnologia costruttiva piuttosto diffusa negli edifici residenziali esistenti in Puglia. Il mattone forato utilizzato ha le seguenti dimensioni: 20 cm di spessore, 25 cm di altezza e 25 cm di lunghezza (Figura 8a). Le caratteristiche termiche del mattone forato sono: conducibilità equivalente λ del blocco pari a 0.223 W m⁻¹ K⁻¹ e della muratura (con giunti orizzontali, in malta cementizia, di spessore 7 mm; senza intonaco) pari a 0.235 W m⁻¹ K⁻¹; trasmittanza termica della muratura, con giunti orizzontali interrotti di spessore 7 mm, in malta generica (densità pari a 1700 kg m⁻³ e λ pari a 0.73 W m⁻¹ K⁻¹) più un doppio strato di 1.5 cm di intonaco interno (λ pari a 0.54 W m⁻¹ K⁻¹) e 1.5 cm intonaco esterno (λ pari a 0.73 W m⁻¹ K⁻¹) pari a 0.934 W m⁻² K⁻¹; massa superficiale (senza intonaco) pari a 142 kg m⁻², calore specifico pari a 1000 J kg⁻¹ K⁻¹.

La parete esposta a sud è stata suddivisa in tre parti termicamente sconnesse mediante l'inserimento di pannelli termoisolanti, in polistirene espanso estruso (Figura 9). I pannelli in

polistirene sono caratterizzati da uno spessore pari a 50 mm e da conduttività termica λ pari a 0.033 W m⁻¹K⁻¹.

Al fine di rendere stabile il muro a sud sono stati realizzati dei rinforzi laterali e interni, utilizzando mattoni forati del tipo 8 cm x 25 cm x 25 cm (Figura 8b e Figura 9).

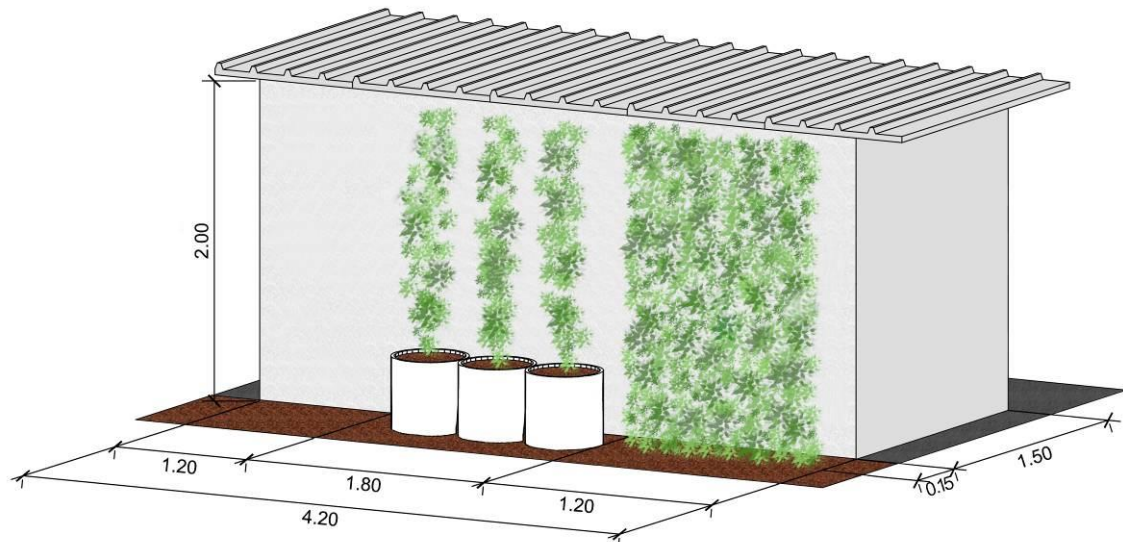


Figura 7- Dimensioni del prototipo di parete verde realizzato presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.



(a)



(b)

Figura 8 - Mattoni forati usati per la realizzazione del prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari: a) mattoni forati a 24 fori usati per la realizzazione della parete rivolta a sud; b) mattoni forati a 10 fori usati per la realizzazione dei rinforzi.

Il muro a sud, caratterizzato dunque da uno spessore di 20 cm, è stato intonacato e presenta esternamente una colorazione bianca, anch'essa caratteristica peculiare degli edifici in clima mediterraneo.

La struttura portante è di tipo metallico, realizzata ricorrendo alla soluzione a tubi e giunti (Figura 9). Sono stati utilizzati telai ad arco, aventi altezza utile pari a 2 m e larghezza pari a 1.05 m, correnti (lunghezza pari a 1.85 m), diagonali (lunghezza pari a 2.3 m) e tubi innocenti, tenuti insieme da morsetti orientabili. Alla base dei montanti sono stati posti dei piedi regolabili.

Le pareti esterne orientate a nord, est e ovest, e la copertura del volume sono state realizzate in pannelli coibentati costituiti da uno strato di poliuretano espanso di spessore pari a 4 cm e strato di supporto esterno e interno in lamiera verniciata di bianco/grigio (Figura 10). I pannelli coibentati sono caratterizzati da una trasmittanza termica pari a $0.54 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. I pannelli utilizzati per le chiusure verticali presentano una superficie esterna liscia, mentre quelli utilizzati per la copertura sono grecati esternamente e sono stati posti in opera con una opportuna pendenza.



Figura 9 - Prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari: struttura portante metallica interna, parete rivolta a sud e rinforzi laterali, separazione delle sezioni realizzata con pannelli termoisolanti in polistirene espanso (in azzurro).



Figura 10 - Particolare della parete laterale esposta ad est e della copertura del prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.

Il volume interno del prototipo è climatizzato con un condizionatore portatile monoblocco a pompa di calore (ELLISSE hp, Olimpia Splendid) al fine di controllare e fissare le condizioni microclimatiche interne (Figura 11). Il condizionatore scelto ha una capacità nominale di raffrescamento e riscaldamento pari a 2.4 kW ed è in grado di raffrescare e riscaldare l'ambiente a seconda delle stagioni. Le temperature sono state settate a 22 °C e 26°C, rispettivamente nel periodo freddo e nel periodo caldo.



(a)



(b)

Figura 11 - Prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari: a) interno con condizionatore, data logger e sonde; b) porta per accedere all'interno.

La parete a sud è suddivisa in tre parti: due sono dotate di verde verticale, la terza è stata lasciata nuda e costituisce la parete di controllo rispetto a cui confrontare il comportamento delle altre due (Figura 12). La soluzione tecnologica proposta per la parete verde è del tipo facciata verde a doppia pelle. Lo strato verde è stato realizzato anteposando alla parete, ad una distanza pari a circa 15 cm da essa, una rete metallica che funge da supporto per la vegetazione costituita dal *Rhynchospermum Jasminoides*, una specie rampicante sempreverde che ben si adatta alle condizioni climatiche del sito. La differenza tra le due porzioni di parete dotate di verde verticale è legata al fatto che, la porzione centrale è caratterizzata da piante collocate all'interno di tre vasi, mentre in quella di estremità le piante sono radicate direttamente nel terreno (Figura 12). Le piante in vaso sono state trapiantate successivamente rispetto alle piante nel terreno, essendo queste già presenti nell'area sperimentale prima della realizzazione del prototipo.

Nel campo sperimentale è presente strumentazione tecnica necessaria alla misurazione e alla registrazione dei parametri fisico-tecnici utili a monitorare il comportamento energetico del prototipo.

La stazione meteorologica per la rilevazione dei dati climatici della zona sperimentale (Figura 13) ha un sistema di acquisizione dati costituito da un data logger (CR10X, Campbell, Logan, USA) e da sensori per la misurazione della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria esterna, della radiazione solare incidente sulla superficie verticale, della velocità e direzione del vento. I dati climatici sono registrati ogni 60 s dal data logger e memorizzati come valori medi ogni 15 minuti. La radiazione solare incidente sulla superficie verticale è misurata con un piranometro (modello 8-48, Eppley Laboratorio, Newport, RI, USA) nell'intervallo di lunghezze d'onda 0.3-3 μm . La temperatura e l'umidità relativa dell'aria esterna sono misurate con sonde Hygroclip-S3 (Rotronic, Zurigo, Svizzera) e le sonde sono state schermate dalla radiazione solare. Per misurare la velocità e la direzione del vento è utilizzato un sensore Young Wind Sentry 03002 (Wind Sentry 03002 Data Sheet, R. M. Young Company 1999). I campi di misura sono 0-50 m s⁻¹ per la velocità del vento e 0-360° per la direzione del vento.



Figura 12 - Parete esposta a sud: a destra parete ricoperta da *Rhyncospermum Jasminoides* messo a dimora nel terreno, nel centro parete ricoperta da *Rhyncospermum Jasminoides* in vaso, la parete a sinistra non coperta è il testimone.



(a)



(b)

Figura 13 - Stazione meteorologica presso il campo sperimentale dell'Università di Bari: (a) interno dotato di data logger e PC; (b) sensori per la misura dei parametri climatici.

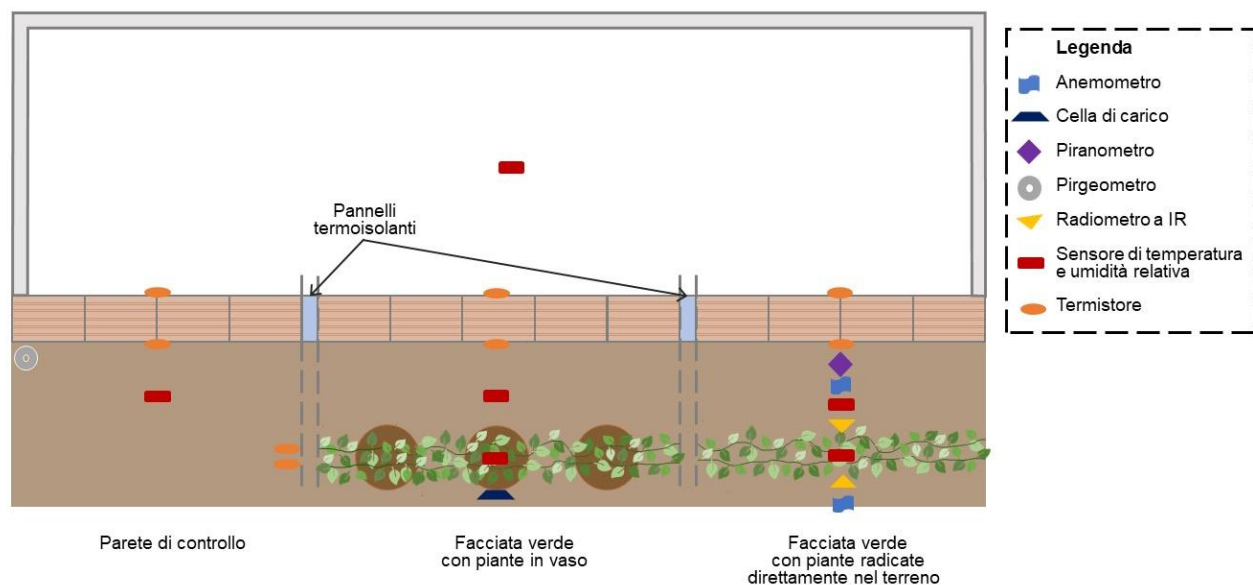


Figura 14 - Schema delle componenti principali della sensoristica prevista nel prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.

Il prototipo sperimentale è dotato di un secondo sistema di acquisizione dati costituito da data logger (CR10X e CR1000, Campbell, Logan, USA) e sensori (Figura 14). I dati sono registrati ogni 60 s dai data logger e memorizzati come valori medi ogni 15 minuti. Su ognuna delle tre parti di parete sud sono misurate la temperatura superficiale della parete sul lato esterno, esposto alla radiazione solare, e la temperatura superficiale sul lato interno del prototipo. Le temperature sono misurate mediante termistori (Tecno.el s.r.l. Formello, Rome, Italy), opportunamente posizionati sulle superfici della parete. Due termistori sono stati previsti per la misurazione della temperatura del terreno antistante la parete. Sensori Hygroclip-S3 (Rotronic, Zurigo, Svizzera) sono utilizzati per la misurazione di temperatura e umidità relativa dell'aria all'interno del blocco sperimentale, davanti alla parete di controllo, nelle due intercapedini (tra muro e vegetazione) e all'interno dello strato fogliare. La quantità di radiazione infrarossa incidente sulla parete è misurata attraverso un pirgeometro (Eppley pyrgeometer, model PIR). La radiazione solare incidente sulla superficie della parete retrostante alla vegetazione è misurata mediante un piranometro (PIR02, Geoves s.n.c., Conegliano, Italia). Due anemometri ultrasonici (METER Group, Inc., Pullman, WA, USA) sono posizionati in corrispondenza della parete verde con le piante radicate nel terreno: uno all'interno dell'intercapedine tra muro e vegetazione e uno davanti alla parete verde (Figura 14).

Al fine di misurare il fenomeno dell'evapotraspirazione, infine, è stata posizionata, al di sotto del vaso centrale della seconda porzione di parete, una piastra con cella di carico (Scaime, AG C3), che consente di rilevare le variazioni di peso e, quindi, di contenuto d'acqua del sistema substrato di coltivazione-pianta.

Sono state inoltre valutate le caratteristiche radiometriche delle foglie della parete verde. Sono state raccolte delle foglie verdi e rosse della parete verde nel periodo invernale (Figura 15). Sono state eseguite prove di laboratorio per valutare le curve di trasmissività e di riflessività, espresse in funzione della lunghezza d'onda, delle foglie del *Rhynchospermum Jasminoides* (Papadakis et al., 2000; Pearson et al., 1995; Duffie e Beckman, 1991; Monteith e Unsworth, 1990). Le misure spettrofotometriche sono state eseguite presso il laboratorio del Dipartimento DISAAT dell'Università di Bari.

Le misure della trasmissività e riflessività spettrale sono state realizzate nel range di lunghezza d'onda del solare, compreso fra 200 e 2500 nm, mediante spettrofotometro Perkin Elmer Lambda 950 UV/VIS/NIR (Norwalk, USA), con passo di 10 nm. La trasmissività totale spettrale e la riflettività sono state misurate utilizzando una sfera integratrice di 100 mm di diametro utilizzata come ricevitore dello spettrofotometro Lambda 950, con un metodo di confronto a doppio raggio (Wendlandt e Hecht, 1966).

Le misure radiometriche, nell'intervallo di lunghezze d'onda dell'infrarosso lungo compreso tra 2500 e 25000 nm (LWIR-Long Wave Infrared), sono state eseguite con uno spettrofotometro FT-IR (1760 X, Perkin Elmer Instruments, Norwalk, CT, USA) con passo di 4 cm^{-1} ; è stata misurata la riflessività quasi normale, cioè con angolo di incidenza del raggio sul campione rispetto alla normale allo stesso pari a 10° .

Le misure delle caratteristiche radiometriche sono state elaborate analiticamente in funzione delle diverse lunghezze d'onda in modo da ottenere coefficienti di trasmissività e riflessività negli intervalli dell'ultra violetto A (UVA; 320-380 nm), dell'ultra violetto B (UVB; 280-320 nm), della radiazione fotosinteticamente attiva (PAR; 400-700 nm), del solare (300-2500 nm) e dell'infrarosso lungo (IR; 7500-12500 nm) (Papadakis et al., 2000; Vox e Schettini, 2007).

I coefficienti radiometrici calcolati, nel range di lunghezze d'onda solare, radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) e infrarosso lungo, per le due colorazioni di foglia sono riportati in Tabella 1.



Figura 15 - Parete esposta a sud: foglie verdi e foglie rosse nelle piante di *Rhyncospermum jasminoides*.

Tipologia foglia	τ_{solar}^{total} (%)	τ_{PAR}^{total} (%)	τ_{LWIR} (%)	ρ_{solar} (%)	ρ_{PAR} (%)	ε_{LWIR} (%)
Foglie verdi	13.6	0.7	0.0	32.3	7.8	96.4
Foglie rosse	13.5	2.1	0.0	32.5	8.3	96.4

Tabella 1 - Coefficienti radiometrici delle foglie, nelle due colorazioni, della specie *Rhyncospermum jasminoides*: PAR, radiazione fotosinteticamente attiva; LWIR, radiazione infrarossa ad onde lunghe.

La Figura 16 mostra le curve di riflessività spettrale totale delle due tipologie di foglie nel range di lunghezze d'onda 200-2500 nm. La Figura 17 mostra le curve di emissività spettrale delle due tipologie di foglie nel range di radiazione infrarossa ad onde lunghe.

I valori riportati in Tabella 1 e le Figura 16 e Figura 17 non evidenziano, nel complesso, differenze radiometriche significative tra le due tipologie di foglie. Dalle misurazioni relative all'intervallo 200-2500 nm è possibile ricavare un valore di assorbanza solare, valido per entrambe le colorazioni, pari al 54%. Con riferimento alla frazione di spettro corrispondente alla radiazione visibile (390-760 nm), tuttavia, si possono notare i picchi di riflessività per le foglie di colore verde e quelle di colore rosso rispettivamente in corrispondenza dei valori di lunghezza d'onda di 550 nm e 630 nm (Figura 16). Per quanto riguarda l'emissività nel campo della radiazione infrarossa ad onde lunghe, il valore ricavato per le due tipologie di foglie è pari al 96% (figura 17).

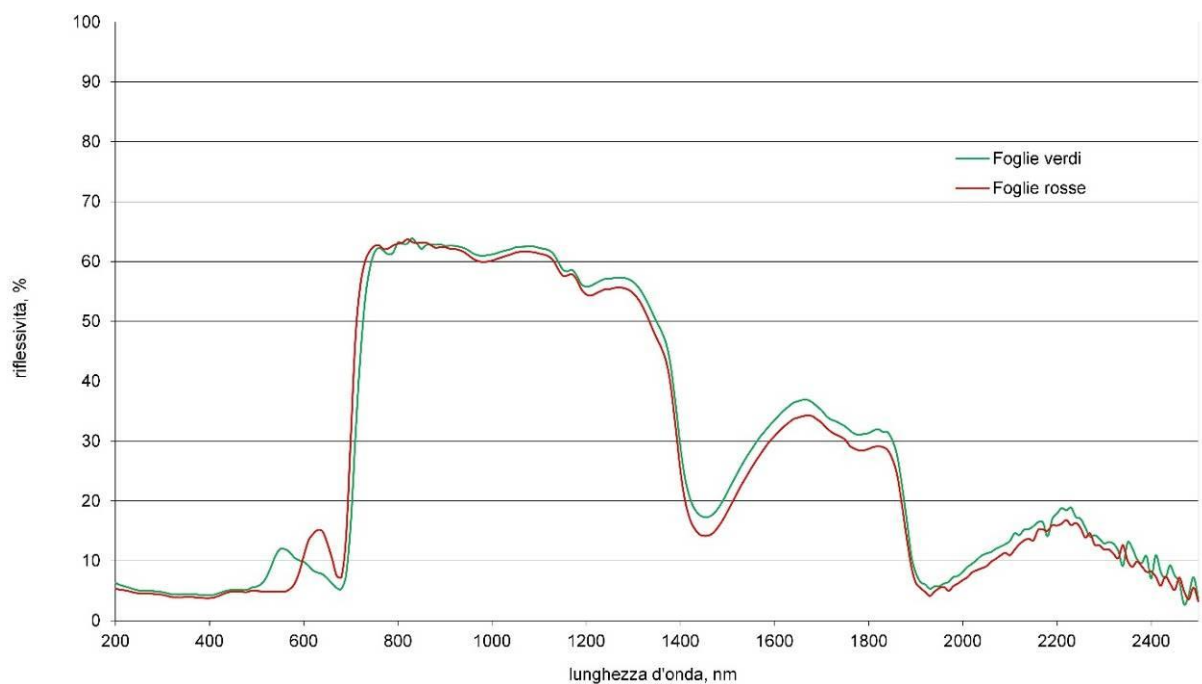


Figura 16 - Riflessività spettrale totale delle due tipologie di foglie nel range di lunghezze d'onda 200-2500 nm.

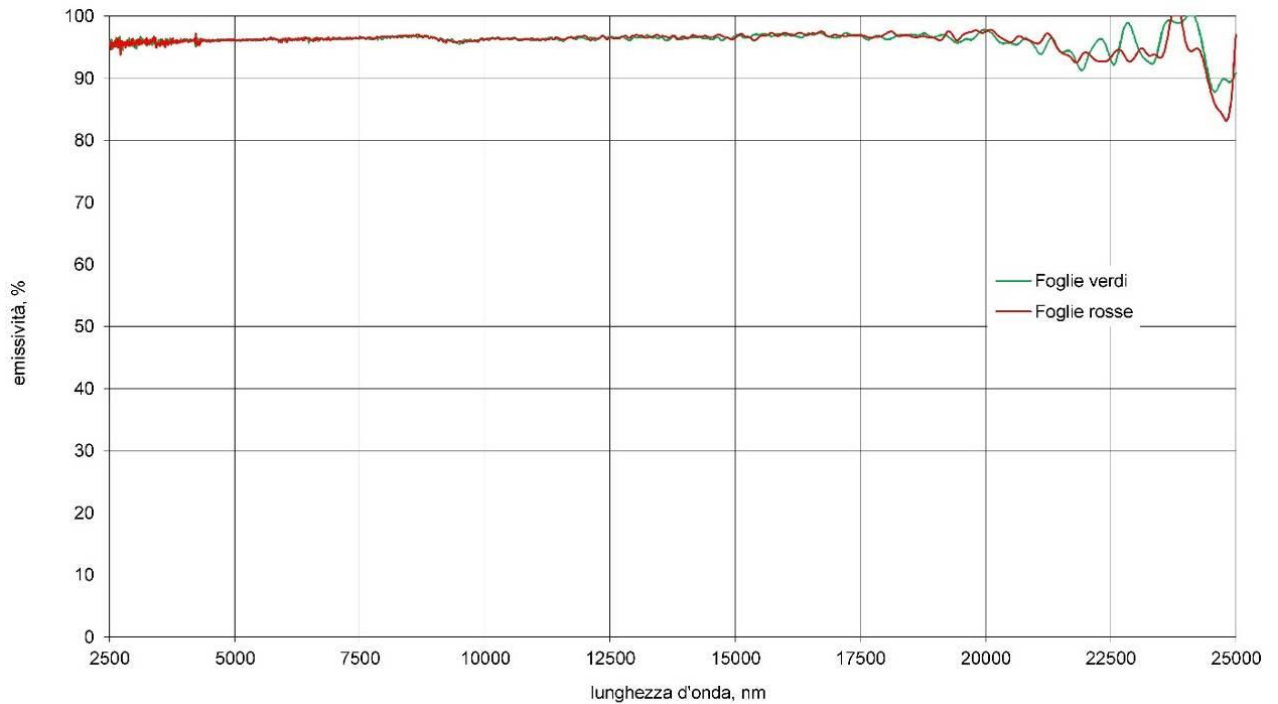


Figura 17 - Emissività spettrale delle due tipologie di foglie nel range di radiazione infrarossa ad onde lunghe (lunghezze d'onda 2500-25000 nm).

2.2 Principali effetti rilevati della facciata verde

Le considerazioni sulle temperature sono state fatte con riferimento al muro di controllo e alla parete verde caratterizzata dalle piante radicate direttamente nel terreno, in quanto più sviluppate e folte rispetto alle piante in vaso poste davanti alla parte centrale della parete. I commenti sull'evapotraspirazione sono fatti tenendo in considerazione i dati misurati per la parete verde caratterizzata dalle piante nei vasi, in quanto sotto uno dei vasi è presente la cella di carico.

Nelle Figura 18 - Figura 23 sono sempre riportate le curve dei parametri ambientali, quali la temperatura dell'aria esterna e la radiazione solare, che caratterizzano l'andamento climatico della zona, essendo questi utili per comprendere il trend dei parametri oggetto di studio. Le Figura 18 - Figura 25 sono riferite tutte allo stesso periodo di osservazione (18-20 agosto 2019). Tale periodo è stato caratterizzato, nelle ore diurne e notturne, dai valori dei parametri climatici riportati in Tabella 2.

Periodo	Temperatura massima dell'aria (°C)	Temperatura media dell'aria (°C)	Umidità relativa media dell'aria (%)	Velocità media del vento (m s ⁻¹)	Radiazione solare verticale cumulativa media giornaliera (MJ m ⁻²)
Giorno	33.1	29.3	43.4	2.2	11.8
Notte	28.4	22.3	56.5	1.4	0.0

Tabella 2 - Principali parametri climatici rilevati presso il centro sperimentale, 18-20 agosto 2019.

Nella Figura 18 è rappresentato l'andamento della temperatura dell'aria nell'intercapedine tra muro e piante e della temperatura superficiale esterna ed interna del muro della parete verde. Da tale confronto si evince che nelle ore più calde della giornata la temperatura dell'intercapedine è sempre maggiore rispetto alla temperatura dell'aria esterna, con una differenza massima di 4.1 °C, e rispetto alla temperatura superficiale esterna del muro della parete verde, con una differenza massima di 5.7 °C. Inoltre, in tali ore, sono stati osservati valori della temperatura superficiale esterna del muro della parete verde molto simili a quelli della temperatura dell'aria esterna. Nelle altre ore, invece, la temperatura superficiale esterna del muro della parete verde ha valori superiori rispetto alla temperatura dell'intercapedine e alla temperatura dell'aria esterna, con una differenza massima di 3.3 °C e 2.6 °C, rispettivamente.

La Figura 19 evidenzia in riferimento al muro di controllo l'andamento della temperatura dell'aria in prossimità del muro e della temperatura superficiale esterna ed interna del muro. Diversamente da quanto riscontrato nel caso della parete verde, nelle ore più calde della giornata la temperatura superficiale esterna del muro di controllo è sempre maggiore rispetto alla temperatura dell'aria esterna, con una differenza massima pari a 6.7 °C. Nelle altre ore le differenze di valori tra le due temperature sono meno evidenti.

Nella Figura 20 sono confrontate la temperatura superficiale interna del muro di controllo con la temperatura superficiale interna del muro della parete verde. L'andamento della

temperatura superficiale interna del muro di controllo e della parete verde è molto simile, essendo il locale condizionato in maniera uniforme.

La Figura 21 confronta in maniera analoga le temperature superficiali esterne. Durante le ore del giorno, la temperatura superficiale esterna del muro di controllo è sempre superiore rispetto alla temperatura superficiale esterna della parete verde (Figura 21). La presenza dello strato vegetale mitiga la temperatura dell'intonaco esterno delle murature e la differenza tra le due temperature è dell'ordine di 6–7°C. Nella prova sperimentale condotta si è verificata, in altri intervalli temporali esaminati, una differenza tra le due temperature anche di 9 °C (Vox et al., 2018).

Le misurazioni relative alle temperature superficiali della facciata verde e del muro di controllo hanno permesso di evidenziare che l'influenza della radiazione solare è sensibilmente maggiore sulla temperatura superficiale del muro di controllo, la quale risulta, nelle ore centrali del giorno, superiore a quella della facciata verde. Nelle ore in cui la radiazione solare è assente, seppur dopo un certo arco temporale, invece, la situazione appare invertita e la temperatura superficiale della parete verde risulta superiore a quella del controllo, pur essendo la differenza meno marcata rispetto alle altre ore (in media 1.4 °C). Tale comportamento è sintomatico della funzione schermante svolta dalla vegetazione, che impedisce alla radiazione solare di incidere direttamente sulla parete retrostante, cioè riscaldandola nelle ore diurne, e dell'effetto isolante e, quindi, della sua funzione di "protezione radiativa" durante la notte.

La Figura 22 riporta l'andamento della temperatura dell'aria nell'intercapedine tra muro e parete verde e della temperatura dell'aria in prossimità del muro di controllo. Da tale confronto si evince che, nelle ore diurne, la temperatura dell'aria con cui il muro schermato dalla vegetazione è a diretto contatto risulta significativamente inferiore rispetto a quella davanti alla parete scoperta, con una differenza massima pari a 5.5 °C; di notte il trend si inverte e la differenza tra i valori si riduce sensibilmente.

La Figura 23 mostra l'andamento dell'umidità relativa dell'aria esterna, dell'aria nell'intercapedine tra muro e parete verde, dell'aria in prossimità del muro di controllo. Durante le ore notturne, l'umidità relativa dell'aria nell'intercapedine tra muro e parete verde è sempre inferiore rispetto all'umidità relativa dell'aria misurata in prossimità del muro di controllo, con una differenza massima pari a 6.8 %. Nelle ore più calde, invece, il

comportamento si inverte e le differenze si amplificano risentendo del contributo dell'evapotraspirazione del sistema substrato di coltivazione-pianta, arrivando fino all'11 %. Dalla Figura 24 si evince l'andamento del peso del sistema substrato di coltivazione-pianta rilevato mediante la cella di carico. I tre picchi si registrano in corrispondenza dell'irrigazione giornaliera erogata prima dell'alba. La successiva graduale e progressiva perdita di peso nel corso delle ore diurne è, invece, ascrivibile al processo di evapotraspirazione ed è evidente la relazione con la radiazione solare.

L'evapotraspirazione costituisce la peculiarità degli schermi verdi e fornisce un ulteriore vantaggio rispetto alle schermature comuni, "non viventi". Tale processo influenza le condizioni microclimatiche in prossimità della facciata verde e produce raffreddamento grazie alla dispersione di energia sotto forma di calore latente. Nella Figura 25 sono riportati i valori cumulativi giornalieri di calore latente associato all'evapotraspirazione e i valori di radiazione solare incidente. Nel periodo analizzato, caratterizzato da una radiazione solare incidente cumulativa giornaliera pari, in media, a 11.8 MJ m⁻², la facciata verde disperde, per evapotraspirazione, mediamente 5.3 MJ m⁻² al giorno.

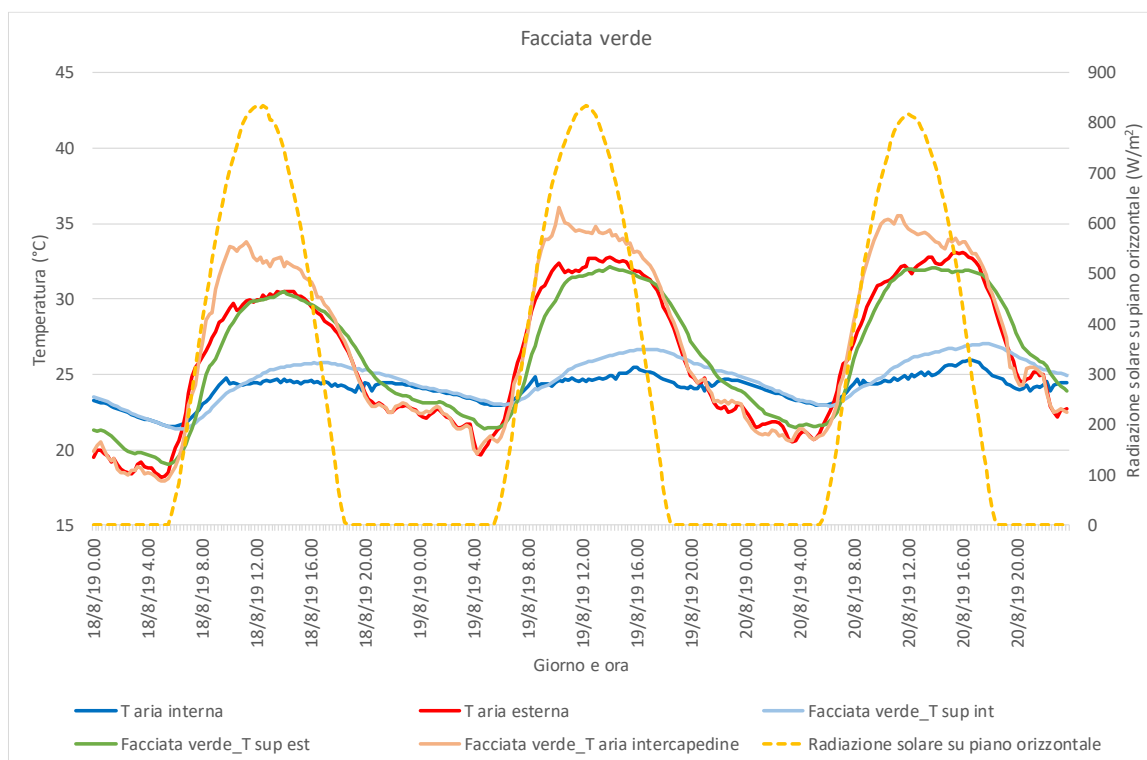


Figura 18 - Andamento della temperatura dell'aria esterna e interna, temperatura dell'aria nell'intercapedine tra muro e piante, temperatura superficiale esterna ed interna della parete verde (asse principale) e radiazione solare su piano orizzontale (asse secondario), 18-20 agosto 2019.

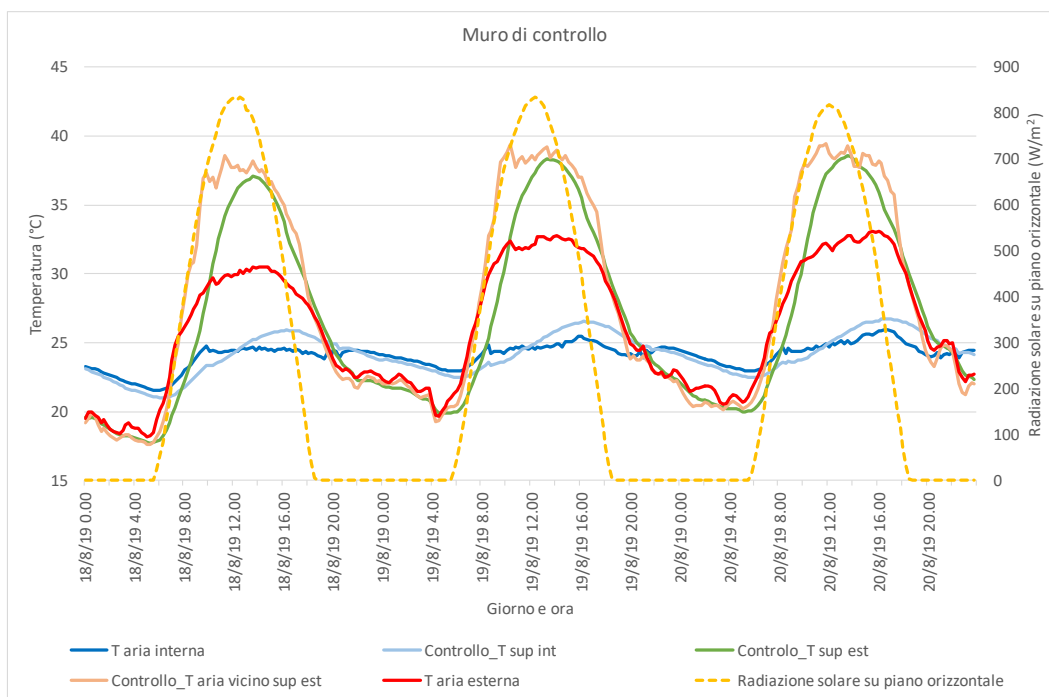


Figura 19 - Andamento della temperatura dell'aria esterna e interna, temperatura dell'aria in prossimità del muro di controllo, temperatura superficiale esterna ed interna del muro di controllo (asse principale) e radiazione solare su piano orizzontale (asse secondario), 18-20 agosto 2019

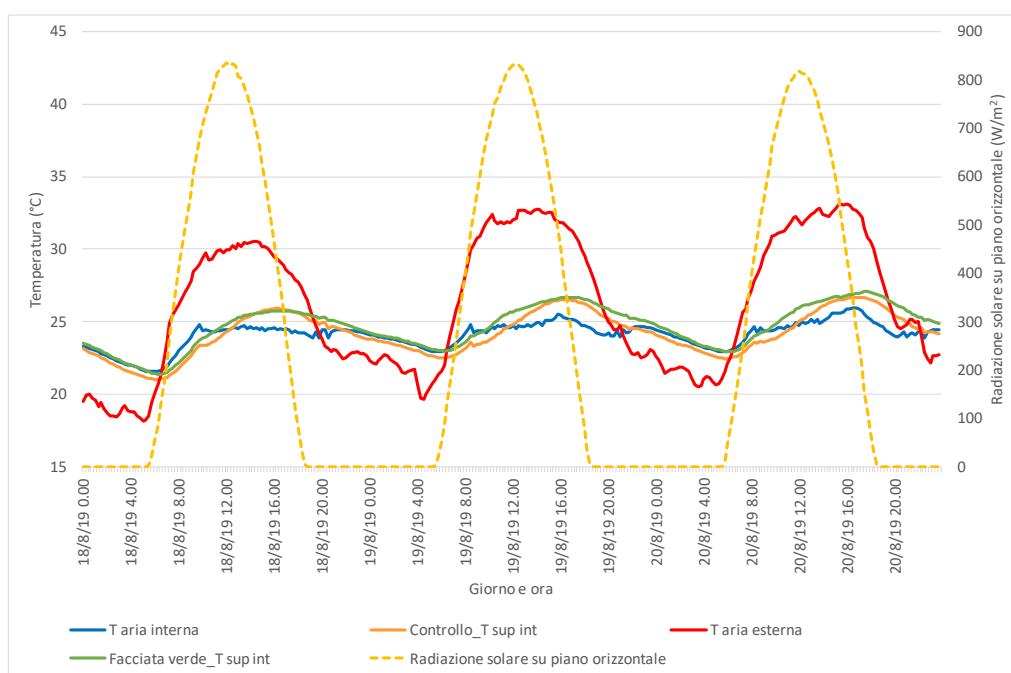


Figura 20 - Andamento della temperatura dell'aria esterna e interna, temperatura superficiale interna del muro di controllo e della parete verde (asse principale) e radiazione solare su piano orizzontale (asse secondario), 18-20 agosto 2019

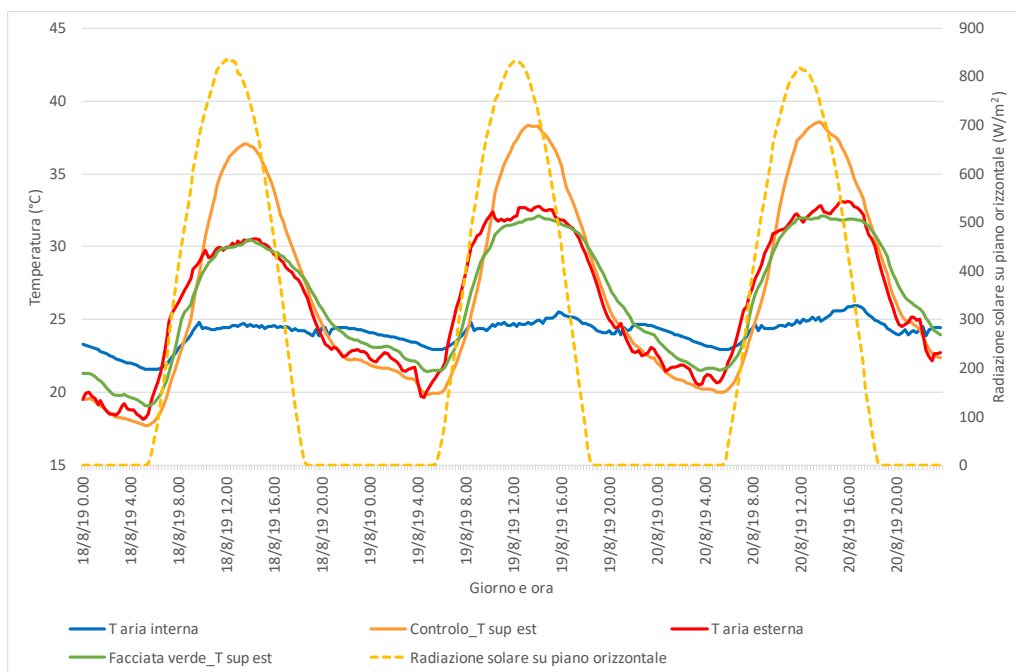


Figura 21 - Andamento della temperatura dell'aria esterna e interna, temperatura superficiale esterna del muro di controllo e della parete verde (asse principale) e radiazione solare su piano orizzontale (asse secondario), 18-20 agosto 2019

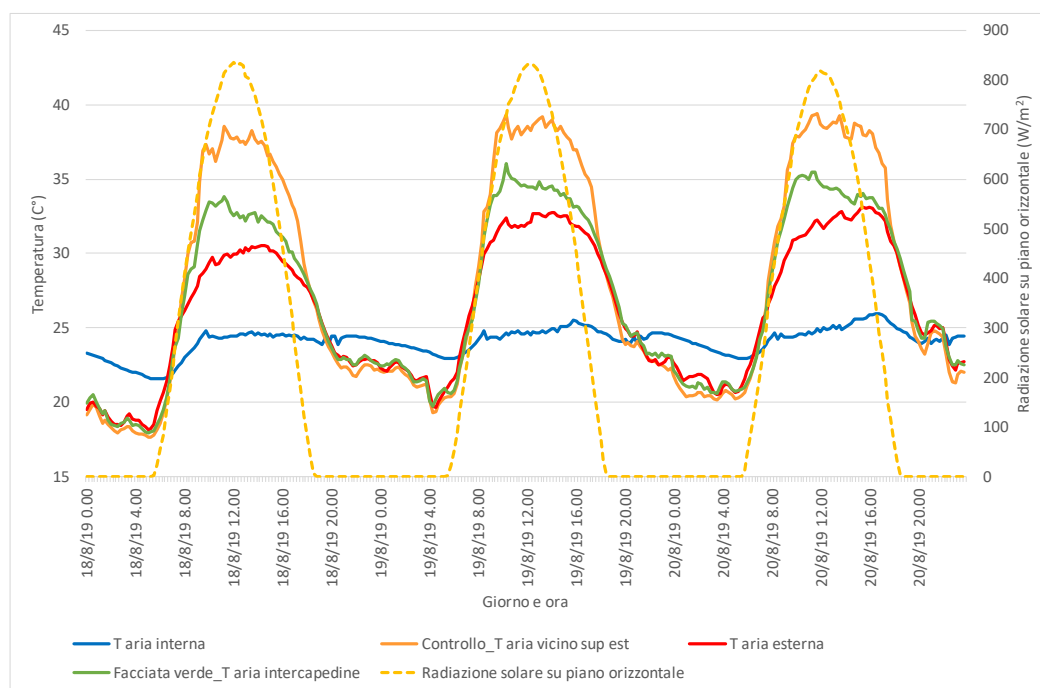


Figura 22 - Andamento della temperatura dell'aria esterna e interna, temperatura dell'aria nell'intercapedine tra muro e parete verde, temperatura dell'aria in prossimità del muro di controllo (asse principale) e radiazione solare su piano orizzontale (asse secondario), 18-20 agosto 2019

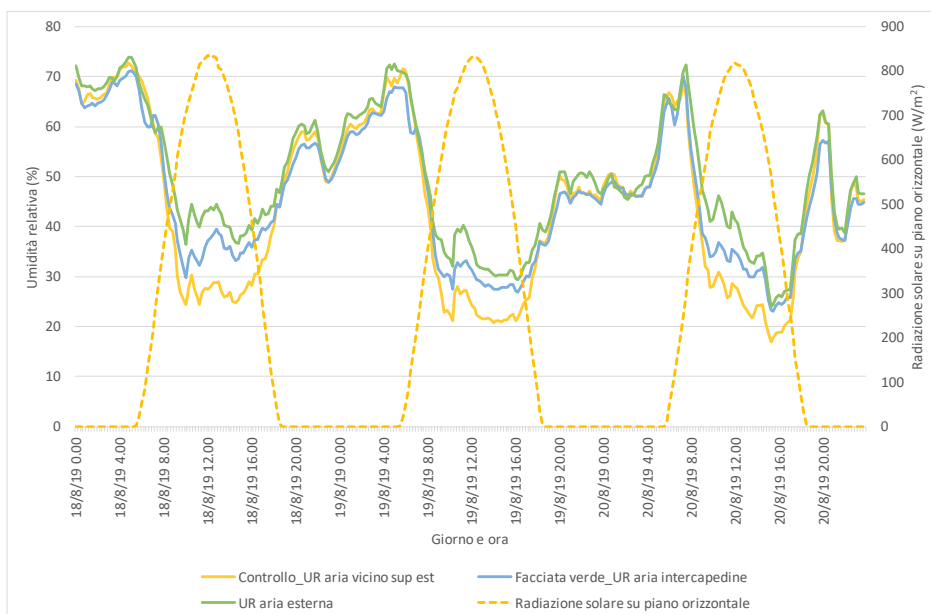


Figura 23 - Andamento dell'umidità relativa dell'aria esterna, dell'aria nell'intercapedine tra muro e parete verde, dell'aria in prossimità del muro di controllo (asse principale) e radiazione solare su piano orizzontale (asse secondario), 18-20 agosto 2019

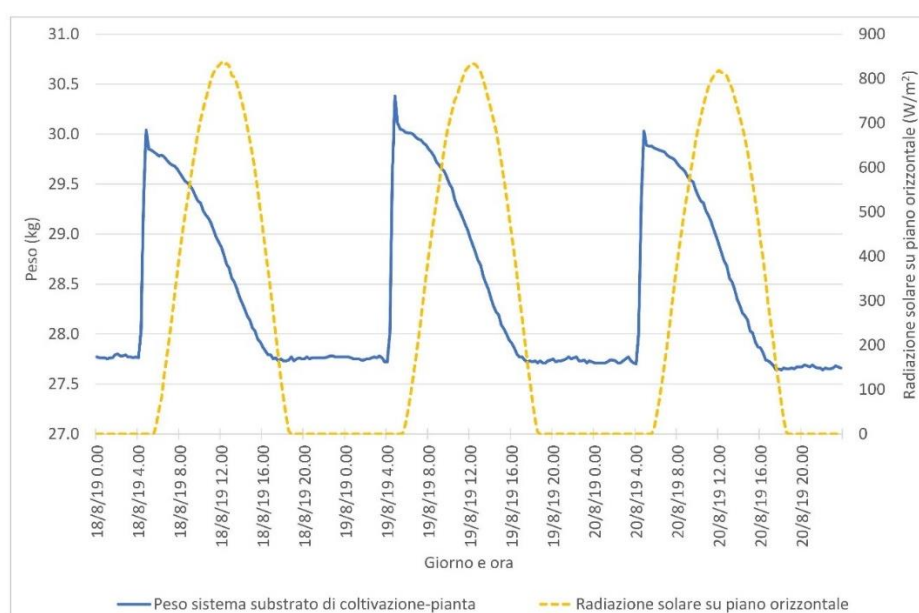


Figura 24 - Peso del sistema substrato di coltivazione-pianta misurato mediante cella di carico (asse principale) e radiazione solare su piano orizzontale (asse secondario), 18-20 agosto 2019.

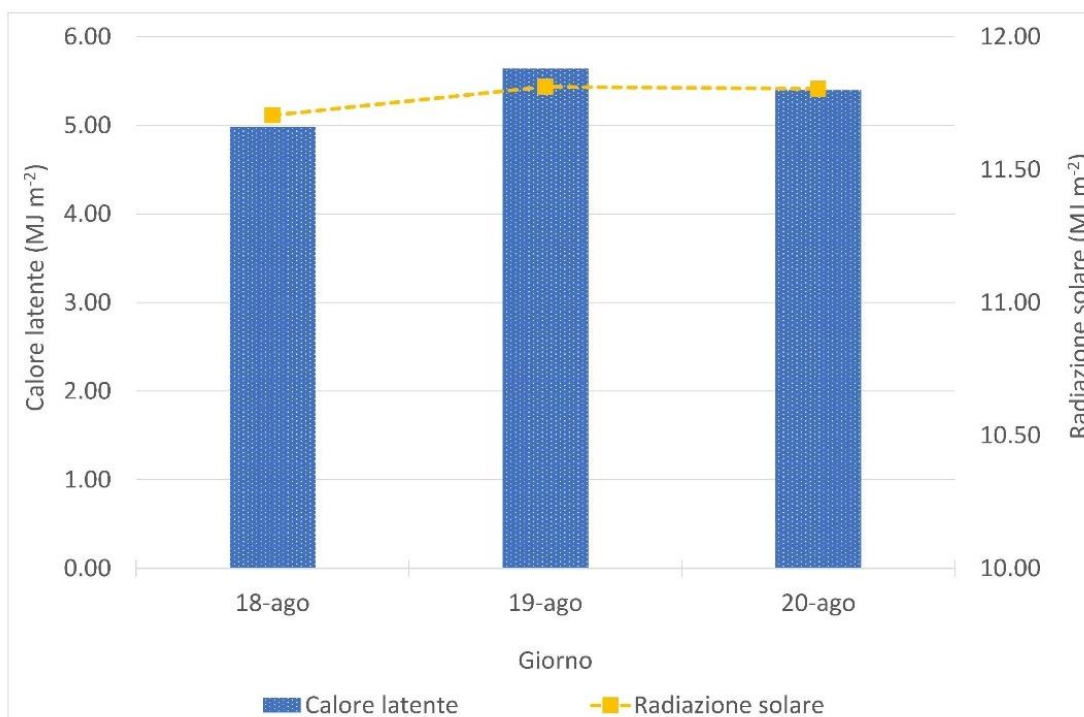


Figura 25 - Valori cumulativi di calore latente associato all'evapotraspirazione (asse principale) e di radiazione solare incidente su superficie verticale (asse secondario), 18-20 agosto 2019.

Conclusioni

Le infrastrutture verdi urbane utilizzano la vegetazione come strumento sostenibile per mitigare gli effetti negativi indotti dall'urbanizzazione. Tra queste vi sono quelle che prevedono l'applicazione della vegetazione sugli edifici, consentendo di migliorare le prestazioni energetiche degli stessi. I sistemi di verde verticale, cioè le pareti degli edifici ricoperte di vegetazione, incrementano l'efficienza energetica degli edifici in quanto le piante si comportano allo stesso tempo sia come elementi ombreggianti sia come schermi termici e consentono di beneficiare del processo di evapotraspirazione. Le infrastrutture verdi diventano elementi di progettazione sostenibile e passiva in quanto influiscono positivamente sulle condizioni microclimatiche interne ed esterne dell'edificio e, anche, sul benessere umano.

Nella ricerca condotta presso l'Università di Bari in collaborazione con l'ENEA, in condizioni climatiche mediterranee, le facciate verdi hanno mostrato una buona capacità di raffreddamento nei periodi caldi. La temperatura superficiale esterna della parete dell'edificio è stata scelta come parametro utile per valutare le prestazioni termiche degli

impianti verdi verticali. Le temperature diurne osservate sulle facciate verdi, orientate a sud, erano inferiori alle rispettive temperature della parete scoperta. Le facciate fungevano anche da schermo termico durante le giornate fredde; le temperature notturne per le pareti vegetate sono state superiori alle rispettive temperature della parete di controllo. È stata valutata anche l'evapotraspirazione della facciata verde e ciò ha permesso di quantificare il raffrescamento aggiuntivo garantito mediante la dispersione di calore latente.

Una conoscenza approfondita del comportamento termico delle infrastrutture verdi verticali in diversi scenari climatici è importante per fornire strumenti di progettazione efficaci ad ingegneri e architetti e per poter applicare e sfruttare al meglio tali tecnologie.

Bibliografia

- Alexandri E., Jones P., "Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates", *Building and Environment*, 43 (4) (2008), 480-493.
- Berardi U., A. H. GhaffarianHoseini., A. GhaffarianHoseini. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, (2014), pp. 411-428.
- Berdahl P., S.E. Bretz Preliminary Survey of the Solar Reflectance of Cool Roofing Materials, *Energy and Buildings*, 25(1997), pp. 149-158.
- Bretz S.E., H. Akbari Long-term Performance of High-Albedo Roof Coatings, *Energy and Buildings*, 25 (1997), pp. 159-167.
- Bretz S.E., H. Akbari, A. Rosenfels Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. *Atmospheric Environment* 32 (1998), pp. 95-101.
- Cameron R. W. F., T. Blanuša, J. E. Taylor, A. Salisbury, A. J. Halstead, B. Henricot, K. Thompson. The domestic garden – Its contribution to urban green infrastructure. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11 (2), (2012), pp. 129-137.
- Cameron RWF, Taylor JE and Emmett MR. "What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls". *Building and Environment* 73 (2014), 198-207.
- Campiotti CA, Schettini E, Alonzo G, Viola C, Bibbiani C, Scarascia Mugnozza G, Blanco I and Vox G. "Building green covering for a sustainable use of energy". *Journal of Agricultural Engineering* 44 (2013), 253-256.
- Cheng C. Y, K. K.S. Cheung, L.M. Chu Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Build. Environ.* 45 (2010), pp.1779-1787
- Convertino, F., Vox, G., Schettini, E. (2020). Thermal barrier effect of green façades: Long-wave infrared radiative energy transfer modelling. *Building and Environment*, 177, 106875. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106875>
- Duffie, J. A., Beckman, W.A., 1991. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons. New York.
- Dunnet N., N. Kingsbury *Planting green roofs and living walls* (2004), Oregon: Timber Press.
- Feng H., Hewage K., "Lifecycle assessment of living walls: air purification and energy performance", *Journal of Cleaner Production*, 69 (2014), 91-99.
- Fernandez-Cañero R, Emilsson T, Fernandez-Barba C and Herrera Machuca MA. "Green roof systems: A study of public attitudes and preferences in southern Spain". *Journal of Environmental Management* 128 (2013), 106-115.
- Fioretti R., A. Palla, L. G. Lanza, P. Principi Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Build. Environ.* 45 (2010), pp. 1890-1904.
- Francis, R. A., Lorimer, J., 2011. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *Journal of Environmental Management* 92 (6), 1429-1437.

- Gagliano A., Detommaso M., Nocera F., Evola G. "A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs". *Building and Environment*, 90 (2015), 71-81.
- Gago E.J., Roldan J., Pacheco-Torres R., Ordóñez J., "The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25 (2013), 749-758.
- Gentle A.R., J.L.C. Aguilar, G.B. Smith. Optimized cool roofs: integrating albedo and thermal emittance with R-value. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 95 (2011), pp. 3207-3215.
- Gladis F., R. Schumann. Influence of material properties and photocatalysis on phototropic growth in multi-year roof weathering. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 65 (2011), pp. 36-44.
- IGRA International Green Roof Association. (2020). <http://www.igra-world.com/>
- ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. 2020. Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici - Edizione 2018. <https://www.isprambiente.gov.it/files2018/area-stampa/comunicati-stampa/Estrattorapportoconsumodisuolo.pdf>
- ISTAT Istituto Nazionale di Statistica. 2020. <https://www.istat.it/it/territorio-e-cartografia>
- Jaffal I, Ouldboukhitine SE and Belarbi R "A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance". *Renewable Energy* 43 (2012), 157-164.
- Jim C.Y., Tsang S.W., 2011. Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs. *Energy Building*, 43, 1341-1350
- Jim, C. Y., & He, H. (2011). Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem. *Ecological Engineering*, 37, 1112-1122. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.005>
- Jo J.H., J.D. Carlson, J.S. Golden, H. Bryan. An integrated empirical and modeling methodology for analyzing solar reflective roof technologies on commercial buildings. *Building and Environment* 45 (2010), pp. 453-460.
- Joudi A.H. , Svedung, M. Cehlin, M. Rönnelid. Reflective coatings for interior and exterior of buildings and improving thermal performance. *Applied Energy*, 103 (2013), pp. 562-570.
- Kalkstein LS and Davis RE "Weather and human mortality: An evaluation of demographic and interregional responses in the United States". *Annals of the Association of American Geographers* 79 (1989), 44-64
- Kanechi M, Fujiwara S, Shintani N and Uno Y. "Performance of herbaceous *Evolvulus pilosus* on urban green roof in relation to substrate and irrigation". *Urban Forestry & Urban Greening* 13(1) (2014), 184-191.
- Karlessi T., M. Santamouris, K. Apostolakis, A. Synnefa, I. Livada Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures. *Sol. Energy* 83 (2009), pp. 538-551
- Karlessi T, Santamouris M, Synnefa A, Assimakopoulos D, Didaskalopoulos P and Apostolakis K, "Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat Island and cool buildings". *Building and Environment* 46 (2011), 570-576.
- Köhler M and Poll PH "Long-term performance of selected old Berlin greenroofs in comparison to younger extensive greenroofs in Berlin". *Ecological Engineering* 36(5) (2010), 722-729.
- Köhler M.. Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, 11, (2008), pp. 423-436.
- Kolokotsa D., M. Santamouris, S. C. Zerefos Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. *Sol. Energy* 95 (2013), pp. 118-130.
- Kontoleon, K. J., & Eumorfopoulou, E. A. (2010). The effect of orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment*, 45, 1287-1303. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.11.013>
- Li H., J. Harvey, A. Kendall. Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance. *Building and Environment* 59 (2013), pp. 536-546.
- Monteith J. L., Unsworth, M., 1990. Principles of environmental physics. Arnold. London
- Norton, B.A., Coutts, A.M., Livesley, S.J., Harris, R.J., Hunter, A.M., Williams, N.S.G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127-138.

- Oke T. R., G.T. Johnson, D.G. Steyn, I.D. Watson Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night part 2: Diagnosis of causation. *Bound.-Lay. Meteorol.* 56 (1991), pp. 339-358.
- Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia Mugnozza, G., Vox, G., Feuilleley, P., & Stoffers, J.A. (2000). Radiometric and Thermal Properties of, and Testing Methods for, Greenhouse Covering Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77, 7-38. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0525>
- Pearson, S., Wheldon, A. E., Hadley, P., 1995. Radiation transmission and fluorescence of nine greenhouse cladding materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 62: 61-70.
- Pérez G, Rincón L, Vila A, González JM and Cabeza LF. "Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings". *Applied Energy* 88(12) (2011), 4854-4859
- Pérez G, Coma J, Martorell I and Cabeza LF "Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (2014), 139-165.
- Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, A.L.A., Haas, E.M., Raiteri, R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46 (11), 2287–2294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>.
- Petralli M, Prokopp A, Morabito M, Bartolini G, Torrigiani T and Orlandini S "Ruolo delle aree verdi nella mitigazione dell'isola di calore urbana: uno studio nella città di Firenze". *Rivista Italiana di Agrometeorologia* 1 (2006), 51-58.
- Prado R. T. A., F. L. Ferreira. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings* 37 (2005), pp. 295-300.
- Raji B, Tenpierik MJ and Van Den Dobbelsteen A "The impact of greening systems on building energy performance: A literature review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45 (2015), 610-623.
- Rowe D. B.. Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution* 159 (2011), pp. 2100-2110.
- Russo, A., Escobedo, F.J., Cirella, G.T., Zerbe, S. (2017). Edible green infrastructure: An approach and review of provisioning ecosystem services and disservices in urban environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 242, 53-66. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.026>.
- Saaroni, H., Amorim, J.H., Hiemstra, J.A., Pearlmutter, D. (2018). Urban Green Infrastructure as a tool for urban heat mitigation: Survey of research methodologies and findings across different climatic regions. *Urban Climate*, 24, 94-110. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.02.001>.
- Santamouris M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol. Energy* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Sfakianaki A., E. Pagalou, K. Pavou, M. Santamouris, M. N. Assimakopoulos Theoretical and experimental analysis of the thermal behaviour of a green roof system installed in two residential buildings in Athens, Greece. *Int. J. Energ. Res.* 33 (2009), pp. 1059-1069.
- Solecki, W.D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J.R., Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Environmental Hazards* 6 (1), 39–49.
- Synnefa A., M. Santamouris, I. Livada A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy* 80 (2006), pp. 968-981.
- Tan C. L., Wong N. H., Jusuf S. K.. "Effects of vertical greenery on mean radiant temperature in the tropical urban environment". *Landscape and Urban Planning*, 127 (2014), 52-64
- Uemoto K.L., N.M.N. Sato, V.M. John Estimating thermal performance of cool colored paints. *Energy and -Buildings* 42 (2010), pp .17-22.
- Vox, G., Blanco, I., Campiotti, C. A., Giagnacovo, G., Schettini, E. (2015). Vertical green systems for buildings climate control. *Proceedings of the 43rd International Symposium – Actual Tasks on Agricultural Engineering, Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, Zavod za mehanizaciju poljoprivrede. Opatija, Croatia, 723–732.*
- Vox, G., Blanco, I., Fuina, S., Campiotti, C.A., Scarascia Mugnozza, G., Schettini, E. (2017). Evaluation of wall surface temperatures in green façades. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability*, 170 (6), 334-344. <https://doi.org/10.1680/jensu.16.00019>
- Vox, G., Blanco, I., Schettini, E. (2018). Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, 129, 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.002>
- Vox, G., Schettini, E., 2007. Evaluation of the radiometric properties of starch-based biodegradable films for crop protection. *Polymer Testing* 26 (5), 639-651.

- Wendlandt, W.W., Hecht, H.G., 1996. Reflectance spectroscopy, John Wiley and Sons, New York, 253-274.
- Zinzi M., E. Carnielo, S. Agnoli Characterization and assessment of cool coloured solar protection devices for Mediterranean residential buildings application. Ene

3 LCA PER SISTEMI VEGETALI QUALI COMPONENTI EDILIZI (a cura di *Caterina Gargari, Fabio Fantozzi, Carlo Bibbiani*)

3.1 Uno sguardo alla ricerca sugli elementi verdi

Raggiungere l'obiettivo a lungo termine di riduzione dei gas a effetto serra entro il 2050 nel settore dell'edilizia è un obiettivo che è ancora lontano dall'essere raggiunto. Uno dei motivi risiede nel fatto che è difficile determinare quanto siamo vicini o lontani da questo obiettivo in un'analisi a breve termine. L'accordo di Parigi, adottato nel dicembre 2015 ai sensi della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, ha fissato l'obiettivo a lungo termine di mantenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto dei 2 °C riferito ai livelli preindustriali "e proseguire gli sforzi per limitare l'aumento della temperatura a 1,5 °C (UNFCCC, 2015). Sono disponibili numerose ricerche e studi per descrivere quali dovrebbero essere le strategie da attuare al fine di raggiungere questo obiettivo, ma esistono poche pubblicazioni che descrivono le azioni a breve termine che devono essere seguite intorno al 2020-2025 per soddisfare il limite di 1,5 °C nei diversi settori.

Gli scenari più ragionevoli che suppongono di limitare il riscaldamento a meno di 2 °C richiedono una riduzione del 20-30% delle emissioni dirette dal settore edilizio entro il 2020 rispetto ai livelli del 2010, del 50-60% entro il 2030 e infine del 70-80% entro il 2050. Di conseguenza, le emissioni di CO₂ devono essere ridotte del 20–35% entro il 2020, del 60-70% entro il 2030 e dell'80-90% entro il 2050.

Tali percentuali implicano specifici tassi di 'retrofit' del patrimonio abitativo attuale per migliorare l'efficienza energetica degli edifici esistenti (circa il 5% nelle regioni OCSE entro il 2020), con una riduzione diretta delle emissioni di circa il 90% per retrofit (Boermans et al, 2012), mentre il 100% dei nuovi edifici deve essere 'zero emissioni' (ovvero consumo di energia senza uso di fonti fossili e consumo 'quasi zero'). Quindi viene fissato il punto di riferimento a medio termine: costruire tutti i nuovi edifici a energia quasi zero entro il 2020 e aumentare i tassi di ristrutturazione degli edifici da meno dell'1% nel 2015 al 5% entro il 2020. La direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia (EPBD, Energy Performance of Buildings Directive 2010/31/EU) dell'UE è in linea con questa strategia anche se il tasso di retrofit è fissato al 3% anziché al 5%. Gli "edifici a energia zero netta" (Net Zero Energy

Building - NZEB) sono tecnicamente dimostrati, ma potrebbero non essere sempre le soluzioni più efficaci sotto il profilo dei costi e dell'ambiente. (IPCC, 2015).

Inoltre, considerando che lo EPBD sulla prestazione energetica degli edifici spinge verso gli edifici a energia zero netta, i materiali da costruzione diventeranno la causa principale del consumo di energia e di risorse negli edifici, nel prossimo futuro. Nella ZEB netta e negli edifici a basso consumo energetico in generale, a fronte di una rilevante riduzione del consumo di energia durante la fase di utilizzo, si registra un aumento dell'Energia incorporata nei materiali e nelle tecnologie utilizzate nel sistema edilizio (Beccali et al., 2005). In questo contesto assume quindi sempre maggiore significatività, al pari della valutazione dell'efficienza energetica, la analisi degli impatti ambientali di materiali ed edifici nel loro ciclo di vita al fine, appunto, di ridurre quella quota di energia incorporata che costituisce la porzione residua di impatto ambientale che ci separa dai traguardi attesi e trasformare l'edificio NZEB in un edificio Life Cycle Zero Energy Building (LCZEB)¹.

In questo contesto, è in costante crescita l'interesse nei confronti dei sistemi vegetali, in particolare le realizzazioni di coperture verdi definite tecnicamente come "Green Roof" o "Tetto Verde", le quali vengono considerate veri e propri componenti edilizi e dei quali è ampiamente riconosciuta la capacità, soprattutto nelle aree urbane, di gestire il deflusso meteorico, ridurre le onde di calore e promuovere il risparmio energetico e la biodiversità. Ancor più se si considerano gli effetti crescenti del cambiamento climatico quali precipitazioni intense, allagamenti improvvisi, degradazione della qualità dell'acqua, picchi di calore (Min et al., 2011), che rendono di fatto indispensabile spostare l'attenzione verso pratiche verdi e sostenibili che possano ripristinare l'equilibrio idrologico soprattutto nelle aree urbane.

Ciò nonostante, la realizzazione e gestione di tali sistemi vegetali nel ciclo di vita dell'edificio (inclusa l'estrazione dei materiali, la produzione, il trasporto, la messa in opera la gestione/manutenzione ed infine lo smaltimento e il fine vita) possono presentare diversi elementi di criticità ambientale ed economica. E' determinante allora, nell'obiettivo del

¹ un edificio LCZEB è un edificio in cui l'energia primaria utilizzata nell'edificio (produzione dei materiali e dei sistemi costruttivi, gestione dell'edificio) è uguale o inferiore all'energia prodotta da fonte rinnovabile all'interno dell'edificio nel corso della sua vita utile

raggiungimento del livello di efficienza e sostenibilità previsto dal LCZEB, comprendere quali siano i materiali e i sistemi più performanti per la realizzazione di sistemi vegetali a basso impatto ambientale.

3.2 La sostenibilità degli elementi verdi in edilizia

Per valutazione degli impatti ambientali nel ciclo di vita (comunemente definita con l'acronimo LCA, Life Cycle Assessment) si intende una metodologia volta a descrivere, per mezzo di indicatori quantificati, calcolati attraverso una metodologia armonizzata, gli impatti ambientali associati ad un determinato prodotto lungo l'intero suo ciclo di vita, dalla estrazione delle materie prime, alla gestione dello smaltimento a fine vita.

Numerosi sono gli studi in ambito nazionale ed internazionale che negli ultimi anni, hanno dettagliato e misurato, attraverso l'uso di indicatori di impatto, la prestazione ambientale di materiali edilizi, di edifici e di opere di ingegneria (Brachet et al., 2019; El Bachawati et al., 2016; Rivela et al., 2013; Saiz et al., 2006; Wang et al., 2013; Xu et al., 2019), offrendo non raramente, spunti di riflessione interessanti sulla reale (o quanto meno misurata) sostenibilità di soluzioni tecnologiche, materiali, sistemi ed impianti, spontaneamente considerati "green", primi fra tutti i tetti verdi o le 'Pareti Verdi' ("Green Walls").

La maggior parte degli studi disponibili, infatti, si concentrano da un lato sulla riduzione della domanda di riscaldamento e raffrescamento, legata all'utilizzo di coperture a verde in confronto a soluzioni tradizionali, aggiungendo talvolta spunti di riflessione o valutazioni sperimentali sugli altri aspetti noti legati alla influenza delle coperture verdi non solo sul clima dell'edificio, ma sul clima urbano, quali ad esempio, la riduzione dell'effetto isola di calore (Coutts et al., 2013), la riduzione della concentrazione di CO₂ (Li et al., 2010), l'incremento della biodiversità (Brenneisen, 2006), la mitigazione dell'impatto acustico.

Nonostante negli ultimi anni siano stati pubblicati nuovi studi sugli impatti ambientali dei tetti verdi e nel maggio 2016 (Urbanscape, 2016) sia stata pubblicata la prima EPD (Figura 1), una dichiarazione ambientale certificata di prodotto, che fornisce dati ambientali sul ciclo di vita dei prodotti in accordo con lo standard internazionale ISO 14025) per sistemi di tetti verdi estensivi, ancora oggi le descrizioni delle caratteristiche tecniche e dei parametri ambientali del substrato vegetale di un tetto verde, sono difficili da reperire e gli studi sugli

impatti ambientali dei tetti verdi, durante l'intero ciclo di vita sono pochi ed i dati riportati sono scarsamente misurati, analizzati e valutati criticamente.

Molte aziende europee che producono elementi per tetti verdi promuovono miscele originali di componenti a base di pomice, torba e materiali lapidei di origine lavica tradizionali, nonché nuovi materiali innovativi come fibre vegetali, fibre di legno, materiali riciclati per la ritenzione idrica. Questi componenti sono promossi come 'molto sostenibili', altamente assorbenti e a rilascio lento, mentre tutte le informazioni chimiche dettagliate (le miscele sono per lo più segrete) e anche le caratteristiche termiche nei diversi regimi di umidità sono completamente omesse. (Bibbiani et al., 2016), rendendo di fatto difficile un approccio scientifico alla misurazione della sostenibilità dichiarata, attraverso una metodologia validata e condivisa in ambito europeo.

L'obiettivo primario di una analisi LCA, infatti, è quello di identificare le prestazioni ambientali di un prodotto nel corso della sua vita utile e di informare i decisori (il produttore, il progettista, l'utilizzatore finale) degli impatti potenziali, prima della decisione definitiva sulla produzione, la progettazione o l'acquisto; in alternativa, di suggerirne strategicamente i potenziali miglioramenti ottenibili modificando, il processo produttivo, la progettazione tecnologica, le azioni di manutenzione, demolizione e smaltimento.

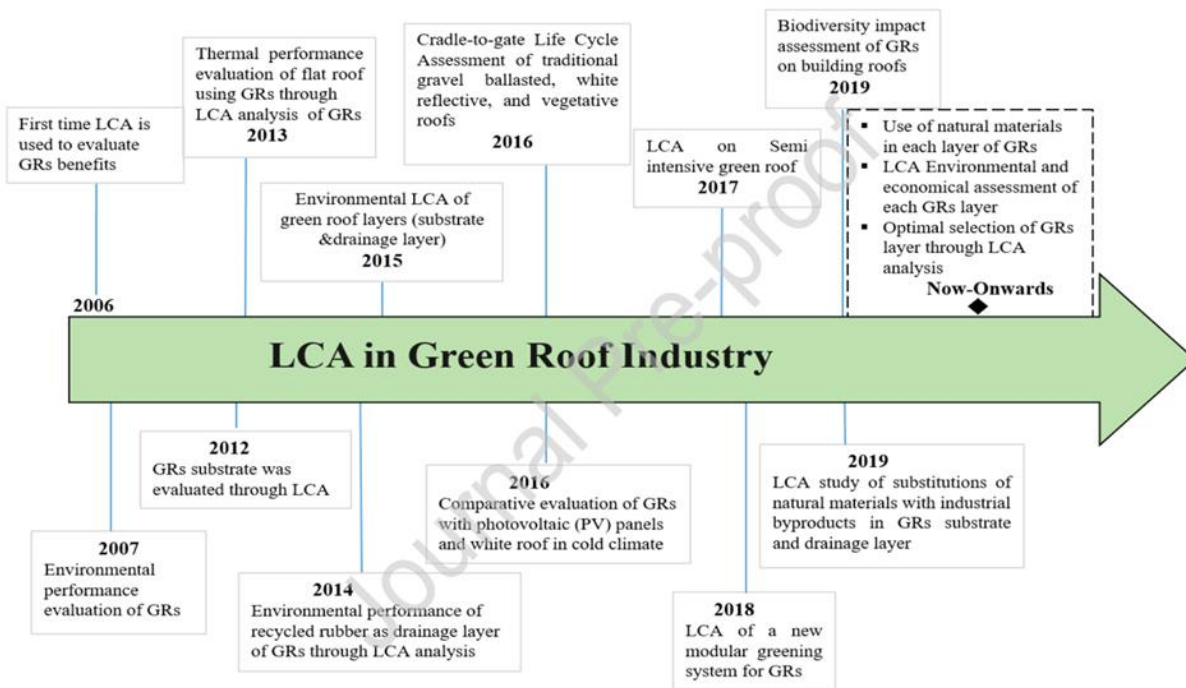


Figura 1- Evoluzione degli studi LCA sui tetti verdi (Shafique et Al., 2019)

Coma et al. (2018), hanno riassunto alcuni dei più recenti studi relativi al confronto tra gli impatti ambientali di sistemi a verde a confronto con tecnologie tradizionali ed evidenziato i risultati emersi dai diversi studi, confermati anche dalle più recenti ricerche di Bibbiani et al. (2019).

L'aspetto ancora oggi più limitante nell'affrontare studi LCA su sistemi a verde, è che, a fronte di una metodologia che, con la pubblicazione dello standard europeo EN15804 nel 2012 e la recente revisione EN15804:2012+A2:2019 finalmente armonizzata, la variabilità dei database LCI utilizzabili rimane ancora alta e la disponibilità e la presenza in questi database di record specifici relativi ai materiali comunemente impiegati per la realizzazione di tetti e pareti a verde ancora troppo limitata.

Questa ricerca parte da questo presupposto per indagare su quanto sia effettivamente sostenibile una delle tecnologie ampiamente riconosciute e promosse come molto efficaci, sia nel ridurre l'energia per il riscaldamento e il raffreddamento negli edifici, ovvero la 'copertura/tetto verde', sia quanto possa contribuire alla riduzione delle emissioni di gas

serra (GHG), alla mitigazione dell'isola di calore urbano (UHI) e, allo stesso tempo, fornire altri benefici sociali quali la riduzione del deflusso delle acque piovane, la depurazione dell'aria, il sostegno alla biodiversità, l'influenza positiva sulla salute e sul benessere degli abitanti della città.

3.3 LCA applicata ai tetti verdi

La valutazione del ciclo di vita ambientale (LCA) è un metodo scientifico completo per valutare gli impatti ambientali a lungo termine di prodotti e sistemi. Il metodo LCA comprende una dettagliata analisi di tutti gli inputs e outputs legati ai processi di estrazione, trasporto, manifattura, imballaggio, costruzione, uso, manutenzione e sostituzione, dismissione, demolizione e fine vita di un prodotto edilizio.

La analisi LCA applicata al settore dell'edilizia si basa sulle norme armonizzate europee EN 15804: 2012 + A2: 2019 Sostenibilità dei lavori di costruzione - Dichiarazioni ambientali sui prodotti - Regole fondamentali per la categoria di prodotti da costruzione (EN15804) e EN15978: 2011 Sostenibilità dei lavori di costruzione - Valutazione delle prestazioni ambientali degli edifici - Metodo di calcolo.

Uno degli obiettivi del comitato CEN TC350, impegnato nello sviluppo degli standard specifici per il settore edilizia sul tema della sostenibilità di materiali e prodotti, era proprio quello di colmare una lacuna metodologica, sviluppando metodi standardizzati orizzontali volontari per la valutazione degli aspetti di sostenibilità dei lavori di costruzione di edifici nuovi e/o esistenti e per gli standard per la Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD) dei prodotti da costruzione.

Una dichiarazione EPD secondo questo standard fornisce informazioni ambientali quantificate per un prodotto o servizio da costruzione su base scientifica e armonizzata. Fornisce inoltre informazioni sulle emissioni legate alla salute nell'aria interna all'edificio, nel suolo e nell'acqua durante la fase di utilizzo dell'edificio. Lo scopo di una EPD nel settore delle costruzioni è fornire la base per la valutazione di edifici e altri lavori di costruzione e identificare quelli che causano meno stress per l'ambiente (EN15804: 2012). Gli EPD sono documenti pubblici, che devono essere utilizzati dai professionisti del settore edile per

raccogliere informazioni ambientali sui materiali e componenti da costruzione, da utilizzare per fare scelte consapevoli tra materiali e soluzioni progettuali che, a parità di altre prestazioni, differiscono per profilo ambientale. Le EPD contengono informazioni che possono essere utilizzate nei metodi di valutazione ambientale e negli schemi di certificazione (LEED, BREAM, ITACA) per soddisfare requisiti di criteri specifici o dai progettisti, per calcolare il profilo ambientale di una soluzione progettuale specifica, sulla base del profilo ambientale di materiali e strati costituenti.

3.4 Il metodo

Partendo quindi, dalla disponibilità di una metodologia finalmente armonizzata, la ricerca ha inteso procedere secondo le indicazioni degli standard CEN al fine di ottenere risultati replicabili e confrontabili con altri, generati secondo i medesimi riferimenti metodologici, in modo da superare le attuali barriere al confronto.

Inizialmente, lo studio si è posto l'obiettivo di fornire al progettista un utile strumento per la valutazione degli impatti ambientali e dei consumi di risorse legati alla installazione di coperture a verde su solai di tipo tradizionale, al variare della composizione specifica del substrato di crescita e quindi della tipologia di sistema a verde selezionato

Per tutte le tipologie di copertura a verde analizzate, sono stati definiti cinque scenari di analisi, al variare dei livelli diversi di isolamento termico (ossia di spessore dello strato drenante/isolante in EPS), con l'obiettivo di valutare l'incidenza della prestazione termica sulla prestazione ambientale.

Sono stati analizzate 6 configurazioni alternative di copertura a verde, di tipo estensivo e intensivo, realizzate attraverso la sovrapposizione di 4 strati con funzioni complementari ed in particolare:

- uno strato vegetativo o *medium* nel quale viene piantumato il *sedum* specifico
- uno strato separatore anti radice
- uno strato drenante e isolante in EPS
- un manto impermeabile anti radice

Lo stato separatore è costituito da una membrana con densità 1126 kg/m^3 , lo strato drenante e isolante è costituito da un pannello sagomato in EPS con densità 25 kg/m^3 mentre il manto anti radice è costituito da una guaina bituminosa con densità 5 kg/m^2 .

I medium utilizzati nelle diverse configurazioni sono stati elaborati a partire da mix disponibili attualmente sul mercato europeo. Nel dettaglio si riporta di seguito la composizione dei 7 substrati vegetativo:

- TIPO A: composto da 75% Pomice, 15% Lapilli, 10% Compost
- TIPO B: composto da 20% Pomice, 63% Lapilli, 2% Compost, 1% Zeolite, 14% Torba
- TIPO C: composto da 10% Pomice, 80% Mattoni riciclati, 8% Torba, 2% tappeto erboso
- TIPO D: composto da 25% Pomice, 60% Lapilli, 15% Compost
- TIPO E: composto da 20% Pomice, 80% Compost
- TIPO F: composto da 25% Pomice, 60% Lapilli, 15% Torba
- TIPO G: composto da 45% Fibra di cocco, 25% Perlite espansa, 15% Pomice, 15% Ghiaietto

Analogamente, tenendo conto che l'installazione di una copertura a verde può portare benefici ambientali ed energetici, tanto in zone climatiche calde quanto in quelle più fredde, per ognuna delle 6 tipologie di copertura a verde analizzate, sono stati definiti cinque scenari di analisi, al variare dei livelli diversi di isolamento termico (ossia di spessore dello strato drenante/isolante in EPS), con l'obiettivo di valutare l'incidenza della prestazione termica sulla prestazione ambientale. Gli scenari sono stati configurati affinché il sistema tetto nel complesso sia in grado di soddisfare i valori di trasmittanza termica minima per le diverse zone climatiche, in accordo ai limiti introdotti dalla normativa energetica italiana con il DM 26/06/15 (di seguito DM).

L'analisi LCA delle 6 tipologie di copertura a verde è stata condotta secondo l'approccio modulare così come definito dalla norma europea UNI EN 15804.

L'analisi degli impatti nel ciclo di vita ha considerato i flussi in ingresso e uscita dal sistema relativamente alla sola fase di produzione A dei materiali ed in particolare alle fasi:

- A1, estrazione e lavorazione delle materie prime e delle materie prime seconde o dei flussi secondari in ingresso
- A2, trasporto delle materie prime allo stabilimento di produzione
- A3, processo di produzione.

Questi includono l'approvvigionamento di tutti i materiali, prodotti e vettori energetici, gli imballaggi e il trasporto allo stabilimento di produzione, la gestione dei rifiuti fino al raggiungimento dello stato di 'end-of-waste' o allo smaltimento all'interno del processo di produzione.

I risultati dell'analisi LCA sono riportati in forma aggregata, ossia i sub-moduli A1, A2, A3 sono considerati quale modulo unico A1÷A3.

Gli impatti ambientali derivanti dall'analisi consentono pertanto di elaborare una Dichiarazione Ambientale di Prodotto del tipo dalla 'culla al cancello' (*cradle to gate*).

La Vita Utile di Riferimento (*Reference Service Life*, RSL) o durabilità del sistema del tetto verde, soggetto ad una adeguata manutenzione, è da considerarsi pari alla vita utile della copertura al di sopra della quale viene installata.

Al fine di fornire indicazioni utili sugli impatti ambientali di un sistema di copertura a verde in relazione alla prestazione termica minima prevista dal DM 26/06/15, per il processo in oggetto sono stati determinati 5 diversi scenari di impiego, al variare dello spessore dello strato drenante/isolante e, conseguentemente, al variare del valore relativo di trasmittanza termica "U" del pacchetto, in riferimento ai valori minimi di "U" di cui alla Tabella 2 dell'Appendice A del DM.

Gli spessori sono stati calcolati ipotizzando che il Tetto Verde sia installato al di sopra di un solaio tradizionale in laterocemento (sp. 16+4 cm).

3.1 I risultati delle valutazioni di impatto per le sei tipologie di copertura a verde

3.1.1 COPERTURA A VERDE ESTENSIVO - TIPO A

Oggetto della analisi è un sistema di copertura a verde di tipo estensivo ad alta densità, caratterizzato da un medium di TIPO A costituito da un mix di materiali inerti che conferiscono al substrato una densità pari a 878kg/m² e nello specifico:

- 75% di Pomice
- 15% di Lapilli
- 10% di Compost

Gli scenari alternativi sono stati calcolati per gli spessori di 8-9-12-14-16 cm di strato isolante in EPS pari a trasmittanze complessive di 0,33-0,31-0,24-0,21-0,18 W/m²K° tenendo conto di una tolleranza pari a ±5%.

Unità dichiarata

L'unità dichiarata è pari a 1 m² di tetto verde incluso il *medium*, lo strato anti radice, lo strato drenante e isolante e la barriera impermeabile (Tabella 1). Il *sedum* non è incluso nell'analisi, così come gli strati inferiori del pacchetto di copertura (solaio, eventuali strati isolanti accessori e intonaco) in quanto strati specifici relativi a configurazioni progettuali alternative che non modificano la prestazione ambientale del pacchetto verde.

Nome	Valore	Unità
massa	76	kg/m ²
fattore di conversione a 1 kg	0,013	-
unità dichiarata	1	mq

Tabella 1 – L'Unità Dichiarata è pari a 1 m² di tetto verde incluso il 'medium', lo strato anti radice, lo strato drenante e isolante, la barriera impermeabile.

I risultati della valutazione di impatto sono riportati nei grafici di Figura 2 a seguire, sia in totale per la tipologia analizzata, che come contributo parziale di ogni singolo strato all'impatto complessivo.

Interpretazione dei risultati

I grafici di cui alle Figura 2 mostrano gli impatti ambientali per 1 m² di Tetto Verde Estensivo con Medium di TIPO A espressi per categorie di impatto normalizzate sulle emissioni Europee secondo la metodologia CML 2001 - Nov. 2010, come previsto da UNI EN 15804.

In linea generale le categorie di impatto, così come il consumo di risorse e le emissioni in aria di CO₂ sono dominate dalla produzione dello strato isolante/drenante in EPS che contribuisce in maniera determinante all'impatto ambientale complessivo.

Poiché il '*plan*' è stato creato utilizzando dati aggregati derivati dalla banca dati GaBi, non è possibile analizzare in ulteriore dettaglio i dati di impatto individuando i processi elementari che, all'interno di ogni singolo elemento, contribuiscono alla determinazione del danno ossia, in questo caso, individuare la singola fase del processo di produzione dell'EPS che fissa il valore dell'impatto.



Figura 2 - Impatti ambientali per 1 m² di Tetto Verde Estensivo con Medium di TIPO A, espressi per categorie di impatto normalizzate sulle emissioni Europee secondo la metodologia CML 2001 - Nov. 2010, come previsto da UNI EN 15804.

3.1.2 COPERTURA A VERDE ESTENSIVO - TIPO B

Oggetto della analisi è un sistema di copertura a verde di tipo estensivo ad alta densità, caratterizzato da un medium di TIPO B costituito da un mix di materiali inerti che conferiscono al substrato una densità pari a 500kg/m² e nello specifico:

- 20% di Pomice
- 63% di Lapilli
- 1% di Zeolite
- 14% di Torba
- 2% di Compost

Gli scenari alternativi sono stati calcolati per gli spessori di 8-9-12-14-16 cm di strato isolante in EPS pari a trasmittanze complessive di 0,33-0,31-0,24-0,21-0,18 W/m²K° tenendo conto di una tolleranza pari a ±5%.

Unità dichiarata

L'unità dichiarata è pari a 1 m² di tetto verde incluso il *medium*, lo strato anti radice, lo strato drenante e isolante e la barriera impermeabile (Tabella 2). Il *sedum* non è incluso nella analisi, così come gli strati inferiori del pacchetto di copertura (soffitto, eventuali strati isolanti accessori e intonaco) in quanto strati specifici relativi a configurazioni progettuali alternative che non modificano la prestazione ambientale del pacchetto verde.

Nome	Valore	Unità
massa	46	kg/m ²
fattore di conversione a 1 kg	0,0217	-
unità dichiarata	1	m ²

Tabella 2. Unità Dichiarata Unità Dichiarata è pari a 1 m² di tetto verde incluso il 'medium', lo strato anti radice, lo strato drenante e isolante, la barriera impermeabile.

I risultati della valutazione di impatto sono riportati nelle Figura 3, sia in totale per la tipologia analizzata, che come contributo parziale di ogni singolo strato all'impatto complessivo.



Figura 3 - Impatti ambientali per 1 m² di Tetto Verde Estensivo con Medium di TIPO B, espressi per categorie di impatto normalizzate sulle emissioni Europee secondo la metodologia CML 2001 - Nov. 2010, come previsto da UNI EN 15804.

Interpretazione dei risultati

I grafici di cui alla Figura 3 mostrano gli impatti ambientali per 1 m² di Tetto Verde Estensivo con Medium di TIPO B espressi per categorie di impatto normalizzate sulle emissioni Europee secondo la metodologia CML 2001 - Nov. 2010, come previsto da UNI EN 15804.

In linea generale le categorie di impatto, così come il consumo di risorse e le emissioni in aria di CO₂ sono dominate dalla produzione dello strato isolante/drenante in EPS che contribuisce in maniera determinante all'impatto ambientale complessivo.

Poiché il '*plan*' è stato creato utilizzando dati aggregati derivati dalla banca dati GaBi, non è possibile analizzare in ulteriore dettaglio i dati di impatto individuando i processi elementari che, all'interno di ogni singolo elemento, contribuiscono alla determinazione del danno ossia, in questo caso, individuare la singola fase del processo di produzione dell'EPS che fissa il valore dell'impatto.

3.1.3 COPERTURA A VERDE INTENSIVO - TIPO C

Oggetto della analisi è un sistema di copertura a verde di tipo intensivo ad alta densità, caratterizzato da un *medium* di TIPO C costituito da un mix di materiali inerti di cui una porzione rilevante proviene da materiale riciclato, che conferiscono al substrato una densità pari a 1400kg/m² e nello specifico:

- 80% di Laterizi riciclati e frantumati
- 10% di Pomice
- 8% di Torba
- 2% di tappeto erboso

Gli scenari alternativi sono stati calcolati per gli spessori di 8-9-12-14-16 cm di strato isolante in EPS pari a trasmittanze complessive di 0,33-0,31-0,24-0,21-0,18 W/m²K° tenendo conto di una tolleranza pari a ±5%.

Unità dichiarata

L'unità dichiarata è pari a 1 m² di tetto verde incluso il *medium*, lo strato anti radice, lo strato drenante e isolante e la barriera impermeabile. Il *sedum* non è incluso nella analisi, così come gli strati inferiori del pacchetto di copertura (soffitto, eventuali strati isolanti accessori

e intonaco) in quanto strati specifici relativi a configurazioni progettuali alternative che non modificano la prestazione ambientale del pacchetto verde.

Nome	Valore	Unità
massa	118	kg/m ²
fattore di conversione a 1 kg	0,0084	-
unità dichiarata	1	m ²

Tabella 3 - Unità Dichiarata Unità Dichiarata è pari a 1 m² di tetto verde incluso il 'medium', lo strato anti radice, lo strato drenante e isolante, la barriera impermeabile.

I risultati della valutazione di impatto sono riportati nella Figura , sia in totale per la tipologia analizzata, che come contributo parziale di ogni singolo strato all'impatto complessivo.

Interpretazione dei risultati

I grafici di cui alla Figura 4 mostrano gli impatti ambientali per 1 m² di Tetto Verde Intensivo con Medium di TIPO C espressi per categorie di impatto normalizzate sulle emissioni Europee secondo la metodologia CML 2001 - Nov. 2010, come previsto da UNI EN 15804.

In linea generale le categorie di impatto, così come il consumo di risorse e le emissioni in aria di CO₂ sono dominate dalla produzione dello strato isolante/drenante in EPS che contribuisce in maniera determinante all'impatto ambientale complessivo ad esclusione delle categorie di danno *Eutrofizzazione EP* ed *Esaurimento delle risorse Abiotiche – elementi ADPe* per le quali risultai significativi i contributi all'impatto totale del substrato vegetativo a base di contenuto riciclato pari al 46% e al 34% rispettivamente.

Al medesimo processo è associato anche un impatto con segno negativo relativo alla categoria di danno Riscaldamento Globale GWP pari al -10% del totale.

Poiché il '*plan*' è stato creato utilizzando dati aggregati derivati dalla banca dati GaBi, non è possibile analizzare in ulteriore dettaglio i dati di impatto individuando i processi elementari che, all'interno di ogni singolo elemento, contribuiscono alla determinazione del danno ossia, in questo caso, individuare la singola fase del processo di produzione dell'EPS che fissa il valore dell'impatto.



Figura 4 - Impatti ambientali per 1 m² di Tetto Verde Estensivo con Medium di TIPO C, espressi per categorie di impatto normalizzate sulle emissioni Europee secondo la metodologia CML 2001 - Nov. 2010, come previsto da UNI EN 15804.

3.1.4 COPERTURA A VERDE INTENSIVO - TIPO D ed E

Oggetto della analisi è un sistema di copertura a verde di tipo intensivo ad alta densità, caratterizzato dall'impiego combinato di due tipi diversi di medium con caratteristiche diverse ossia:

- Medium di Tipo D costituito da un mix di materiali inerti che conferiscono al substrato una densità pari a 1000kg/m² e nello specifico:

- 60% di Lapillo
- 25% di Pomice
- 15% di Compost

- Medium di Tipo E costituito da un mix di materiali inerti che conferiscono al substrato una densità pari a 904kg/m² e nello specifico:

- 20% di Pomice
- 80% di Compost

Gli scenari alternativi sono stati calcolati per gli spessori di 8-9-12-14-16 cm di strato isolante in EPS pari a trasmittanze complessive di 0,33-0,31-0,24-0,21-0,18 W/m²K° tenendo conto di una tolleranza pari a ±5%.

Unità dichiarata

L'unità dichiarata è pari a 1 m² di tetto verde incluso il *medium*, lo strato anti radice, lo strato drenante e isolante e la barriera impermeabile (Tabella 4). Il *sedum* non è incluso nella analisi, così come gli strati inferiori del pacchetto di copertura (soffitto, eventuali strati isolanti accessori e intonaco) in quanto strati specifici relativi a configurazioni progettuali alternative che non modificano la prestazione ambientale del pacchetto verde.

Nome	Valore	Unità
massa	81	kg/m ²
fattore di conversione a 1 kg	0,0123	-
unità dichiarata	1	m ²

Tabella 4 - Unità Dichiarata è pari a 1 m² di tetto verde incluso il 'medium', lo strato anti radice, lo strato drenante e isolante, la barriera impermeabile.

I risultati della valutazione di impatto sono riportati nella Figura 5 in totale per la tipologia analizzata nella prima colonna da sinistra e in parziale ad evidenziare il contributo di ogni singolo strato all'impatto complessivo nelle colonne verso destra.

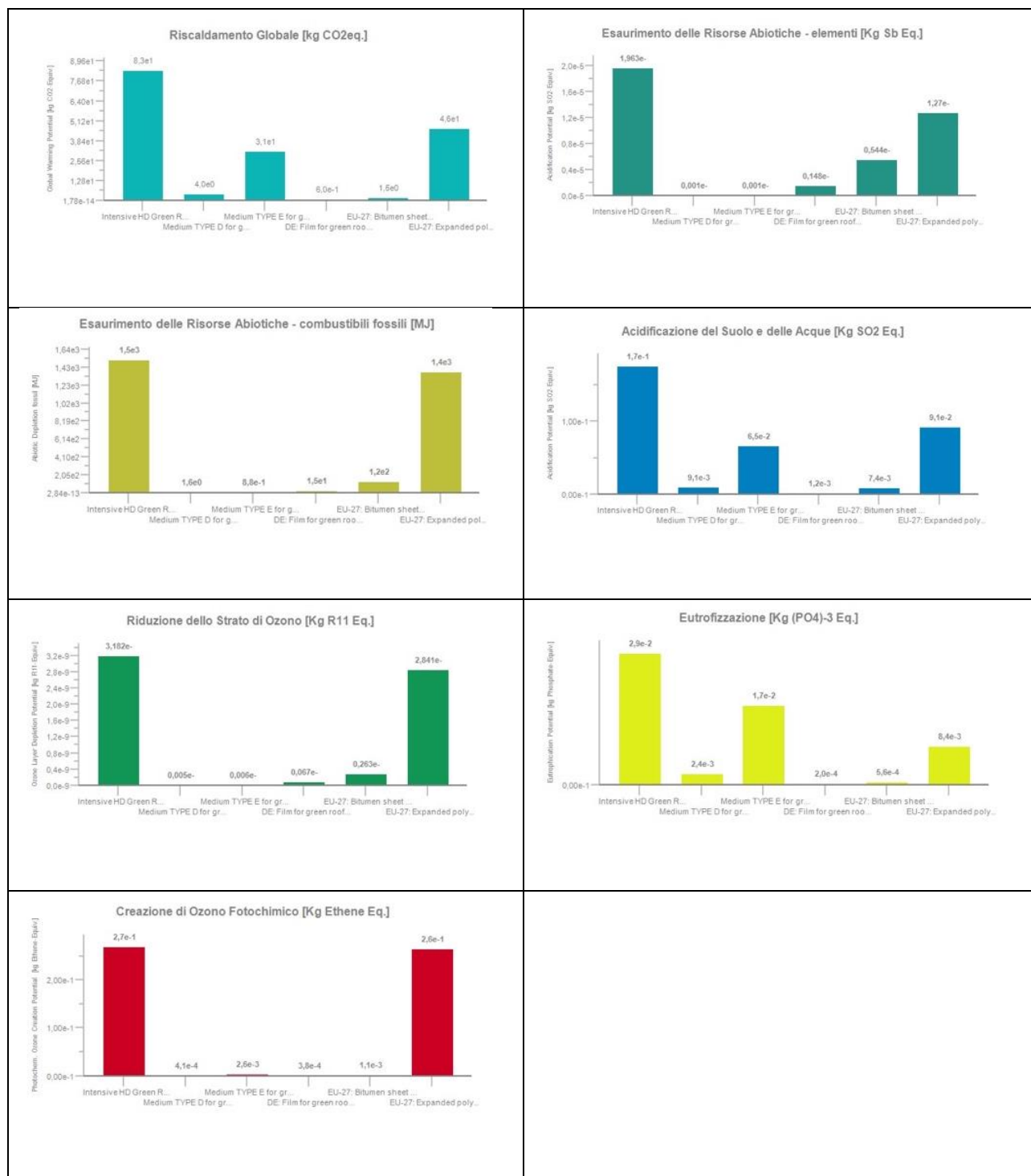


Figura 5 - Impatti ambientali per 1 m² di Tetto Verde Estensivo con Medium di TIPO D e TIPO E, espressi per categorie di impatto normalizzate sulle emissioni Europee secondo la metodologia CML 2001 - Nov. 2010, come previsto da UNI EN 15804.

Interpretazione dei risultati

I grafici di cui alla Figura 5 mostrano gli impatti ambientali per 1 m² di Tetto Verde Intensivo con Medium di TIPO D ed E espressi per categorie di impatto normalizzate sulle emissioni Europee secondo la metodologia CML 2001 - Nov. 2010, come previsto da UNI EN 15804.

In linea generale le categorie di impatto, così come il consumo di risorse e sono dominate dalla produzione dello strato isolante/drenante in EPS che contribuisce in maniera determinante all'impatto ambientale complessivo ad esclusione delle categorie di danno *Riscaldamento Globale GWP*, *Acidificazione del Suolo e delle Acque AP* ed *Eutrofizzazione EP* per le quali risultai significativi i contributi all'impatto totale del substrato vegetativo con alto contenuto di compost di Tipo E pari al 38%, al 60% e al 38% rispettivamente.

Al medesimo processo sono associate anche l'85% delle emissioni aria di CO₂ di origine biotica.

Poiché il '*plan*' è stato creato utilizzando dati aggregati derivati dalla banca dati GaBi, non è possibile analizzare in ulteriore dettaglio i dati di impatto individuando i processi elementari che, all'interno di ogni singolo elemento, contribuiscono alla determinazione del danno ossia, in questo caso, individuare la singola fase del processo di produzione dell'EPS che fissa il valore dell'impatto.

3.1.5 COPERTURA A VERDE INTENSIVO - TIPO F

Oggetto della analisi è un sistema di copertura a verde di tipo intensivo ad alta densità, caratterizzato da un *medium* di Tipo F costituito da un mix di materiali inerti che conferiscono al substrato una densità pari a 950kg/m² e nello specifico:

- 60% di Lapillo
- 25% di Pomice
- 15% di Torba

Gli scenari alternativi sono stati calcolati per gli spessori di 8-9-12-14-16 cm di strato isolante in EPS pari a trasmittanze complessive di 0,33-0,31-0,24-0,21-0,18 W/m²K° tenendo conto di una tolleranza pari a ±5%.

Unità dichiarata

L'unità dichiarata è pari a 1 m² di tetto verde incluso il *medium*, lo strato anti radice, lo strato drenante e isolante e la barriera impermeabile (Tabella 5). Il *sedum* non è incluso nella analisi, così come gli strati inferiori del pacchetto di copertura (soffitto, eventuali strati isolanti accessori e intonaco) in quanto strati specifici relativi a configurazioni progettuali alternative che non modificano la prestazione ambientale del pacchetto verde.

Nome	Valore	Unità
massa	82	kg/m ²
fattore di conversione a 1 kg	0,0123	-
unità dichiarata	1	m ²

Tabella 5 - Unità Dichiarata Unità Dichiarata è pari a 1 m² di tetto verde incluso il 'medium', lo strato anti radice, lo strato drenante e isolante, la barriera impermeabile.

I risultati della valutazione di impatto sono riportati nella tabella 6 a seguire, sia in totale per la tipologia analizzata, che come contributo parziale di ogni singolo strato all'impatto complessivo.

Interpretazione dei risultati

I grafici di cui alla Figura 6 mostrano gli impatti ambientali per 1 m² di Tetto Verde Estensivo con Medium di TIPO F espressi per categorie di impatto normalizzate sulle emissioni Europee secondo la metodologia CML 2001 - Nov. 2010, come previsto da UNI EN 15804.

In linea generale le categorie di impatto, così come il consumo di risorse e le emissioni in aria di CO₂ sono dominate dalla produzione dello strato isolante/drenante in EPS che contribuisce in maniera determinante all'impatto ambientale complessivo.

Poiché il '*plan*' è stato creato utilizzando dati aggregati derivati dalla banca dati GaBi, non è possibile analizzare in ulteriore dettaglio i dati di impatto individuando i processi elementari che, all'interno di ogni singolo elemento, contribuiscono alla determinazione del danno ossia,

in questo caso, individuare la singola fase del processo di produzione dell'EPS che fissa il valore dell'impatto.



Figura 6 - Impatti ambientali per 1 m² di Tetto Verde Estensivo con Medium di TIPO F, espressi per categorie di impatto normalizzate sulle emissioni Europee secondo la metodologia CML 2001 - Nov. 2010, come previsto da UNI EN 15804.

3.1.6 COPERTURA A VERDE ESTENSIVO - TIPO G

Oggetto della analisi è un sistema di copertura a verde di tipo estensivo ad alta densità, caratterizzato da un *medium* di TIPO G costituito da un mix di materiali inerti e fibre vegetali, che conferiscono al substrato una densità pari a 1350kg/m² e nello specifico:

- 45% di fibre di Cocco
- 25% di Perlite
- 15% di Pomice
- 15% di Ghiaietto

Gli scenari alternativi sono stati calcolati per gli spessori di 8-9-12-14-16 cm di strato isolante in EPS pari a trasmittanze complessive di 0,33-0,31-0,24-0,21-0,18 W/m²K° tenendo conto di una tolleranza pari a ±5%.

Unità dichiarata

L'unità dichiarata è pari a 1 m² di tetto verde incluso il *medium*, lo strato anti radice, lo strato drenante e isolante e la barriera impermeabile (Tabella 6). Il *sedum* non è incluso nella analisi, così come gli strati inferiori del pacchetto di copertura (soffitto, eventuali strati isolanti accessori e intonaco) in quanto strati specifici relativi a configurazioni progettuali alternative che non modificano la prestazione ambientale del pacchetto verde.

Nome	Valore	Unità
massa	114	kg/m ²
fattore di conversione a 1 kg	0,0087	-
unità dichiarata	1	m ²

Tabella 6 – Unità Dichiarata è pari a 1 m² di tetto verde incluso il 'medium', lo strato anti radice, lo strato drenante e isolante, la barriera impermeabile.

I risultati della valutazione di impatto sono riportati nella figura 7, sia in totale per la tipologia analizzata, che come contributo parziale di ogni singolo strato all'impatto complessivo.



Figura 7 - Impatti ambientali per 1 m² di Tetto Verde Estensivo con Medium di TIPO G, espressi per categorie di impatto normalizzate sulle emissioni Europee secondo la metodologia CML 2001 - Nov. 2010, come previsto da UNI EN 15804.

Interpretazione dei risultati

I grafici di cui alla Figura 7 mostrano gli impatti ambientali per 1 m² di Tetto Verde Estensivo con Medium di TIPO G espressi per categorie di impatto normalizzate sulle emissioni Europee secondo la metodologia CML 2001 - Nov. 2010, come previsto da UNI EN 15804.

In linea generale le categorie di impatto, così come il consumo di risorse e le emissioni in aria di CO₂ sono dominate dalla produzione dello strato isolante/drenante in EPS che contribuisce in maniera determinante all'impatto ambientale complessivo.

Poiché il '*plan*' è stato creato utilizzando dati aggregati derivati dalla banca dati GaBi, non è possibile analizzare in ulteriore dettaglio i dati di impatto individuando i processi elementari che, all'interno di ogni singolo elemento, contribuiscono alla determinazione del danno ossia, in questo caso, individuare la singola fase del processo di produzione dell'EPS che fissa il valore dell'impatto.

3.2 Analisi dei Medium a confronto

Il confronto tra i 7 diversi *medium* (Tabella 7) è stato condotto per 1 m² di superficie con spessore unitario del *medium* pari a 1 cm.

	Medium TYPE A	Medium TYPE B	Medium TYPE C	Medium TYPE D	Medium TYPE E	Medium TYPE F	Medium TYPE G
CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb-Equiv.]	4,80E-09	2,97E-07	1,29E-06	3,10E-09	1,23E-09	3,06E-09	6,89E-08
CML2001 - Nov. 2010, Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]	7,01E-01	6,13E+00	1,58E+01	5,31E-01	1,75E-01	1,25E+01	2,01E+01
CML2001 - Nov. 2010, Acidification Potential (AP) [kg SO2-Equiv.]	1,99E-03	3,40E-04	2,42E-03	3,03E-03	1,31E-02	3,38E-04	2,75E-03
CML2001 - Nov. 2010, Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.]	5,11E-04	8,28E-05	9,84E-04	7,90E-04	3,47E-03	7,40E-05	4,08E-04
CML2001 - Nov. 2010, Global Warming Potential (GWP 100 years) [kg CO2-Equiv.]	8,13E-01	1,05E-01	-5,30E-01	1,34E+00	6,27E+00	3,94E-02	1,46E+00
CML2001 - Nov. 2010, Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state) [kg R11-Equiv.]	4,30E-12	7,01E-13	7,46E-11	1,72E-12	1,18E-12	1,64E-12	4,60E-11
CML2001 - Nov. 2010, Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg Ethene-Equiv.]	6,70E-05	2,09E-05	1,32E-04	1,35E-04	5,29E-04	2,63E-05	3,12E-04

Tabella 7 - Parametri descrittivi degli impatti ambientali dei 7 medium a confronto

In linea generale, le categorie di danno che maggiormente concorrono a determinare l'impatto ambientale del *medium* sono l'*Esaurimento delle risorse abiotiche fossili ADPf*, il *Potenziale di Riscaldamento Globale GWP*, e il *Potenziale di Acidificazione AP*, come evidenziato in Figura .

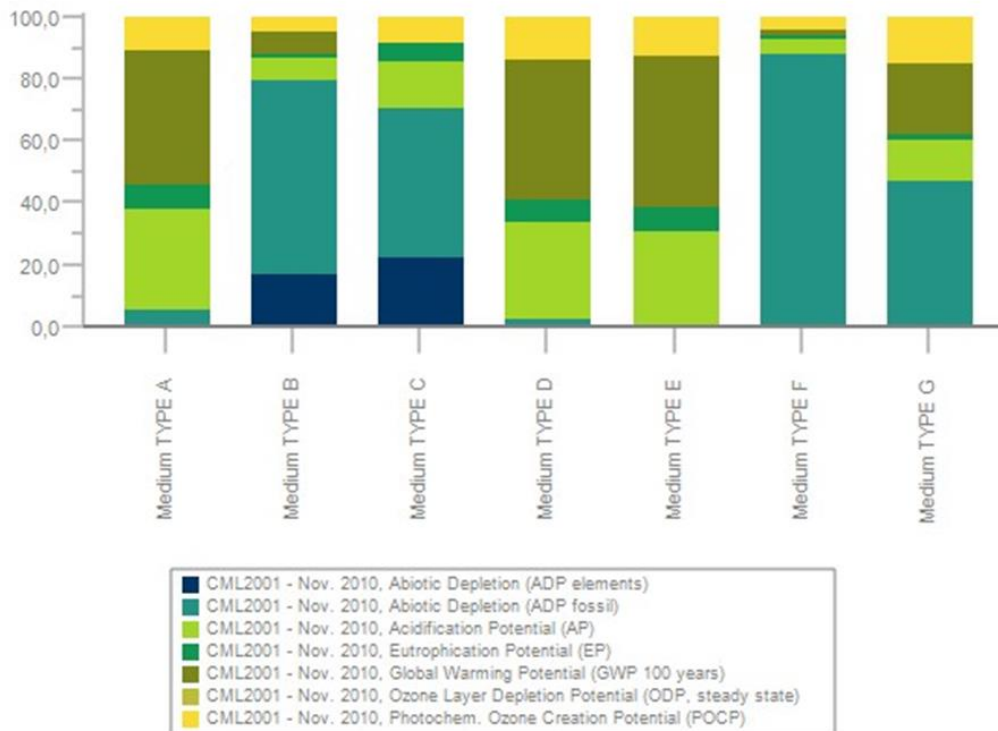


Figura 8 - Confronto degli impatti ambientali delle 7 diverse tipologie di Medium.

L'analisi degli elementi che, in ogni diversa composizione, contribuiscono ad innalzare il valore di questi indicatori in maniera significativa, diventa allora particolarmente importante in fase progettuale per la corretta composizione del mix atta a soddisfare le prestazioni specifiche per la realizzazione di coperture a verdi e minimizzandone al contempo l'impatto ambientale (Figura 9).

In linea generale il medium di TIPO E (20% Pomice; 80% Compost) risulta essere quello a maggior impatto per un numero maggiore di categorie di danno pur presentando, al contempo, gli impatti minori relativamente alla categoria *Esaurimento delle risorse Abiotiche*, sia elementi che fossili, dove risultano particolarmente gravi gli impatti dei medium TIPO C e TIPO G, rispettivamente.

Il componente responsabile degli alti impatti del medium TIPO E è la componente di Pomice che determina il valore di tutti gli indicatori, ad esclusione del *Potenziale di Riscaldamento Globale GWP*, fissato invece dalla presenza di una alta percentuale di Compost nel mix.

Il Medium di tipo C (80% Laterizi riciclati; 10% Pomice; 2% Torba; 8% Manto erboso) è stato modellato sulla base di un record aggregato della banca dati del software GaBi™ e pertanto non è possibile analizzare nel dettaglio i sub-processi e il loro contributo all'impatto.

Il valore dell'indicatore *Esaurimento delle risorse Abiotiche – fossili* assume particolare rilevanza nel *medium* TIPO G² (45%, Cocco, 25% Perlite, 15% Pomice, 15% Ghiaietto) a causa della presenza nel mix di Perlite, che determina anche il valore degli impatti relativi alle categorie *Potenziale di Acidificazione AP*, *Potenziale di Riscaldamento Globale GWP* e *Riduzione dello Strato di Ozono OP*.

I medium di TIPO B (20% Pomice, 63% Lapillo di lava, 1% Zeolite, 14% Torba, 2% Compost) e F (25% Pomice, 60% Lapillo di lava, 15% Torba) risultano nel confronto i meno impattanti.

Nel medium TIPO B, la quasi totalità delle categorie di danno analizzate (ad esclusione del GWP) sono dominate dal flusso di Zeolite: pertanto, la riduzione o la sostituzione della Zeolite con altro materiale vulcanico, porterebbe ad un ulteriore miglioramento della prestazione ambientale complessiva.

Nel medium di tipo F gli impatti sono ovviamente determinati dalla presenza di Lapilli di lava e Pomice, con prevalenza del contributo dei Lapilli, ad esclusione della categoria *Esaurimento delle Risorse Abiotiche fossili ADPf*, condizionata dall'impiego di torba nel mix.

I consumi di energia primaria (Figura) sono particolarmente rilevanti per i medium di TIPO C, TIPO F e TIPO G. Mentre per il medium TIPO C si può solo ipotizzare che la domanda di energia da fonti non rinnovabili provenga dal processo di frantumazione del laterizio di recupero, nel caso dei medium F l'alto consumo di energia primaria da fonti non

² Si rammenta che nella valutazione degli impatti relativi al medium G, il contributo della fibra di cocco è stato trascurato per assenza di dati LCI

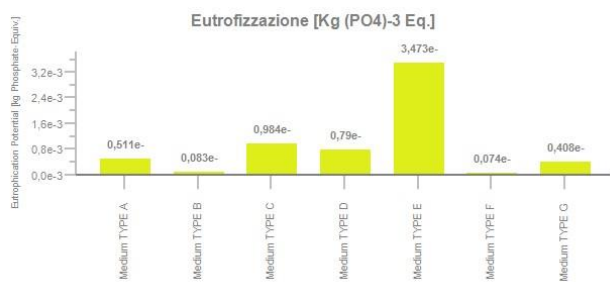
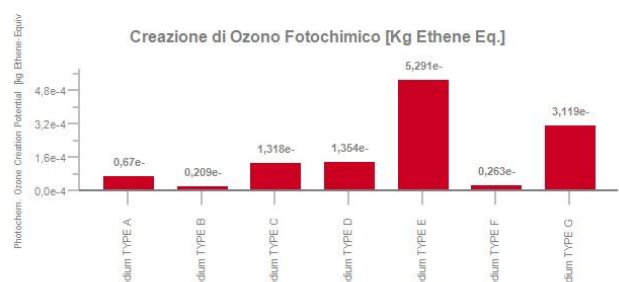
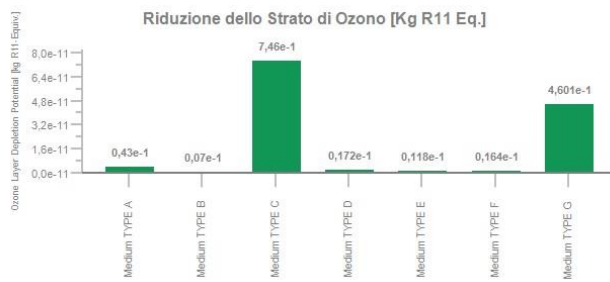
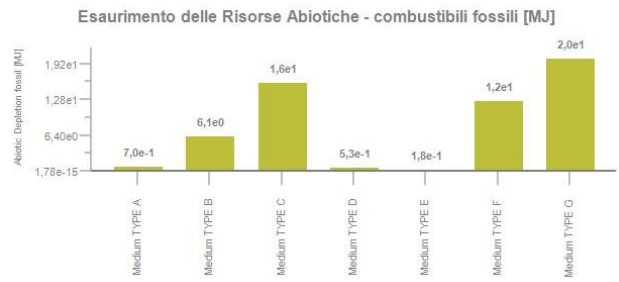
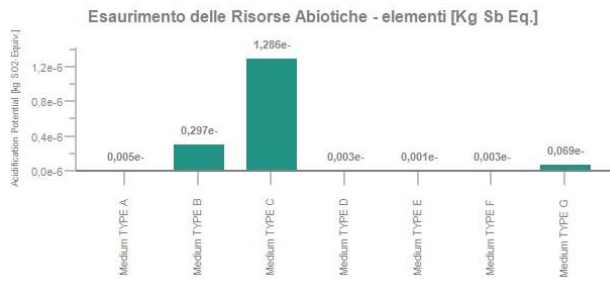
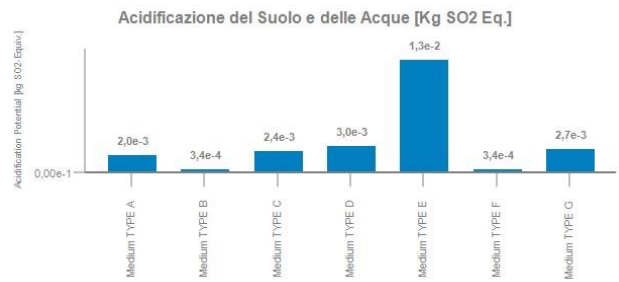
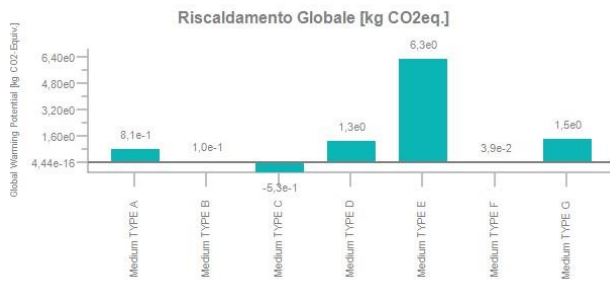


Figura 9 - Parametri descrittivi degli impatti ambientali dei 7 medium a confronto

rinnovabili deriva dall'impiego di Torba nel mix mentre, nel medium di TIPO G, è la perlite a comportare il massimo consumo di energia primaria. IL consumo di energie primarie rinnovabili, relativamente al medium TIPO C, deriva dal particolare mix energetico utilizzato nella generazione del dato aggregato (Germania).

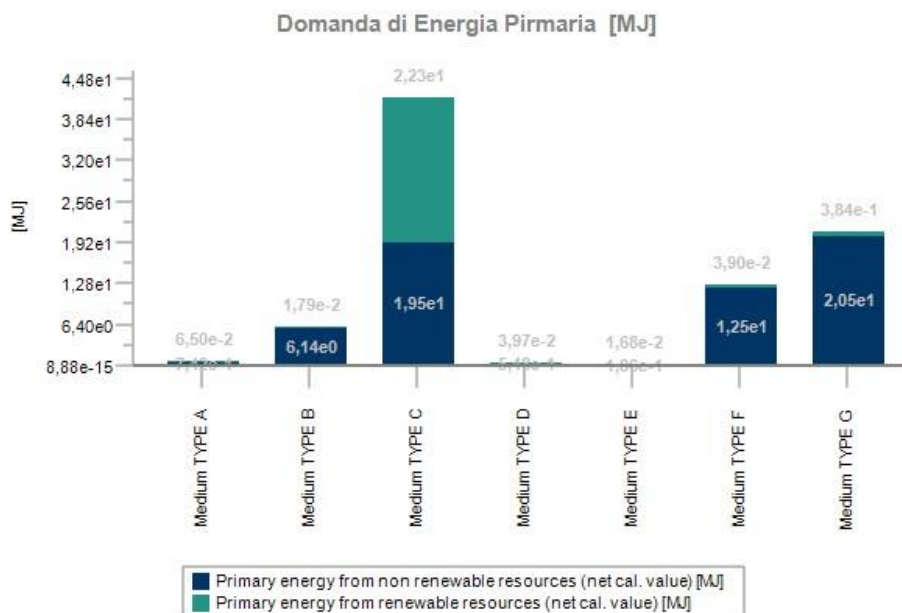


Figura 10 - Domanda di energia primaria per i 7 medium a confronto.

Le emissioni di CO₂ (Figura 11) del medium E sono primariamente legate all'utilizzo del compost mentre nel medium TIPO G è la perlite il flusso responsabile delle emissioni di CO₂. Non è possibile ricostruire il processo responsabile delle emissioni nel medium C.

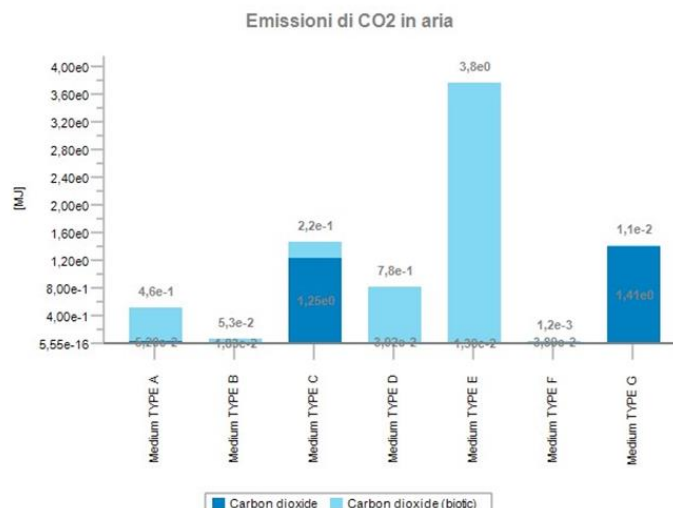


Figura 11 - Emissioni di CO2 per i 7 medium a confronto

L'indagine iniziale sulla disponibilità di informazioni ambientali specifiche e non generiche, relative a materiali e componenti per la realizzazione di elementi di copertura e di parete verde, ha sostanzialmente confermato la generale mancanza di dati più volte evidenziata in ricerche precedenti a questa ultima.

Nonostante nell'ultimo anno, siano stati infatti pubblicati nuovi studi sugli impatti ambientali dei tetti verdi, e addirittura sia stato pubblicato nel maggio 2016 il primo EPD per sistemi di tetto verde di tipo estensivo, ad oggi sono ancora difficilmente reperibili descrizioni caratteristiche dei componenti dei substrati di vegetazione e delle loro prestazioni in termini ambientali ed energetiche.

Molte sono infatti le aziende operanti nel settore nazionale ed europeo degli elementi a verde, che promuovono miscele originali di componenti a base dei tradizionali pomice, torba e lapillo di lava, oltre a nuovi materiali innovativi quali fibre vegetali, fibre di legno, materiali riciclati, idroritenti. Tali composti vengono pubblicizzati per le loro alte prestazioni di sostenibilità, capacità di assorbimento e ritenzione e di rilascio di sostanze nutrienti alla pianta tralasciando però completamente ogni informazione dettagliata, non solo sulla esatta composizione chimica del composto (le miscele sono per lo più segrete), ma anche sulle sue prestazioni termiche nei diversi regimi di umidità.

Da una parte quindi la ricerca scientifica si muove per dimostrare il contributo dei sistemi di copertura e parete verde al miglioramento del comfort interno degli edifici (e in generale della qualità ambientale degli ambienti urbani) e alla riduzione dei consumi energetici, dall'altra non si è ancora indirizzata alla determinazione esatta dei parametri tecnici necessari al calcolo delle trasmittanze e delle capacità termiche dei substrati in uso. Difficile è infatti reperire nella bibliografia scientifica o nella documentazione tecnica commerciale qualsiasi dato relativo a densità, conducibilità, e calore specifico dei diversi mix e soprattutto delle variazioni di tali parametri al variare del tenore di umidità del substrato in uso o in funzione della durata di vita. Diventa quindi piuttosto complicato per il progettista riuscire a calcolare con buona approssimazione le prestazioni termo-igrometriche di un edificio con copertura a verde specifica, o addirittura a progettare un sistema ad hoc variando componenti, densità e spessori per rispondere ad esigenze di comfort puntuali, limitando di fatto le potenzialità di impiego di questa tecnologia.

Sarebbe quindi opportuno, per uno sviluppo del presente lavoro di ricerca, avviare una collaborazione più stretta con alcune delle aziende leader di settore che si rendessero disponibili a condividere le caratteristiche dei loro prodotti, al fine di poter calcolare con software accurati, e al contempo misurare e riscontrare sperimentalmente su modelli al vero, le prestazioni reali dei sistemi in uso.

Tale collaborazione, potrebbe consentire anche un ampliamento delle informazioni di carattere ambientale sui suddetti substrati, consentendo la costruzione di una banca dati LCI specifica a supporto delle valutazioni sugli impatti ambientali nel ciclo di vita. Le valutazioni LCA di cui al presente lavoro, sono state infatti condotte sulla base di ipotesi e informazioni sommarie sulle composizioni % dei diversi substrati, che, come dimostrato, in alcuni casi possono incidere in maniera sostanziale sull'impatto finale.

Analoghe considerazioni possono essere riportate anche per i sistemi di parete verde. In questo caso però, sono la morfologia e la tecnologia della sottostruttura portante piuttosto che lo strato vegetale a determinare non tanto le prestazioni energetiche quanto l'impatto ambientale complessivo del sistema. Risulta quindi più complicato condurre una analisi a confronto tra soluzioni alternative a parità di prestazioni energetiche, come invece effettuato per le coperture a verde.

Il contributo essenziale di una parete verde alla riduzione dei carichi energetici di un edificio è infatti dovuto primariamente all'effetto schermante sulla parete e alla evapotraspirazione legata alla natura delle essenze vegetali impiegate. L'unità funzionale per un confronto LCA tra sistemi alternativi potrebbe quindi essere definita dal fattore di riduzione per ombreggiatura.

Per quanto riguarda la valutazione degli elementi di copertura a verde, la ricerca potrebbe evolvere in due direzioni distinte:

- i) da un lato la sperimentazione diretta attraverso la realizzazione di modelli al vero delle 6 tipologie di copertura analizzate, con l'obiettivo di misurarne il comportamento termo-igrometrico in opera e ricalibrare i modelli LCA sulla base dei risultati sperimentali ottenuti;
- ii) dall'altro l'ampliamento della valutazione LCA a fase del ciclo di vita successive a quello di produzione, con particolare riferimento alle fasi di uso e di fine vita. In fase d'uso assume infatti particolare rilevanza sia il consumo di acqua, specialmente in climi caldi per l'irrigazione e la manutenzione del sistema a verde nonché l'impiego di concimi e fertilizzanti per il nutrimento delle essenze vegetali, sia l'eventualità a fine vita di un recupero o riciclo di parti del sistema per utilizzi secondari.

Individuate sul mercato tipologie consolidate di parete verde sulle quali effettuare analisi a confronto come sopra specificato, la ricerca potrebbe successivamente evolvere nella medesima direzione.

La valutazione LCA ha confrontato sei diverse tipologie di tetti verdi, sia estensivi che intensivi. La LCA è stata calcolata utilizzando il software GaBi™ che è un programma modulare, standardizzato secondo gli standard della serie ISO 14040, che permette di creare bilanci del ciclo di vita del prodotto e degli elementi e di analizzare e interpretare i risultati.

I risultati hanno evidenziato un contributo rilevante all'impatto ambientale dovuto allo strato isolante (EPS) richiesto anche nei tetti verdi per soddisfare le prestazioni termiche minime previste dalla normativa nazionale, con specifico riguardo all'indicatore GWP (Global Warming Potential), espresso in kgCO₂ equivalenti, e una generale dipendenza degli impatti

ambientali di un tetto verde dal substrato medio o vegetativo (Bibbiani et al., 2016). Tale confronto era (ed è tuttora) tecnicamente impraticabile da chiunque non abbia una conoscenza approfondita della metodologia LCA né un software LCA e un database LCA.

Pertanto, la maggior parte dei progettisti che intendono adottare soluzioni di design verde nel proprio edificio, non hanno a disposizione gli strumenti per valutare correttamente le prestazioni ambientali della loro progettazione in un'ottica di ciclo di vita e per determinare il contributo reale del tetto verde alla sostenibilità dell'edificio, rispetto ad altre soluzioni alternative, limitando, di fatto, il potenziale utilizzo di questa tecnologia.

BIBLIOGRAFIA

- C. Bibbiani, F. Fantozzi, C. Gargari, C. A. Campiotti, P. De Rossi, 2019. "Life Cycle Assessment for "green" buildings," RIVISTA DI STUDI SULLA SOSTENIBILITA', FrancoAngeli Editore, vol. 0(2 Suppl.), 195-211.
- UNFCCC, 2015
- IPCC, 2015
- M. Shafique, A. Azam, M. Rafiq, M. Ateeq, L. Xiaowei, "An Overview of Life Cycle Assessment of Green Roofs", Journal of Cleaner Production (2019), <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119471>
- J. Coma, G. Pérez, L. F. Cabeza, "Life Cycle Assessment of Green Roofs", Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00031-8>
- Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A., 2013. Life cycle assessment in the construction sector: a review. Renew. Sustain. Energy Rev. 26, 379-388.
- Coma, J., Perez, G., Sole, C., Castell, A., Cabeza, L.F., 2016. Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. Renew. Energy 85, 1106-1115.
- Coma, J., Perez, G., Sole, C., Castell, A., Cabeza, L.F., 2016. Life Cycle Assessment of Green Roofs. Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability, 2018 Elsevier Inc., 341-351
- 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 Build. 122, 63-69.
- Coutts, A.M., Daly, E., Beringer, J., Tapper, N.J., 2013. Assessing practical measures to reduce urban heat: green and cool roofs. Build. Environ. 70, 266-276.
- Li, J.-F., Wai, O.W.H., Li, Y.S., Zhan, J.-M., Ho, Y.A., Li, J., et al., 2010. Effect of green roof on ambient CO2 concentration. Build. Environ. 45, 2644-2651.
- Brenneisen, S., 2006. Space for urban wildlife: designing green roofs as habitats in Switzerland. Urban Habitats 4, 27-36.
- Kosareo L., Rier R., Comparative environmental life cycle assessment of green roofs, Building and Environment 42, 2007, 2606-2613

4 VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA AMBIENTALE DI INFRASTRUTTURE VERDI ATTRAVERSO TECNICHE DI REMOTE SENSING & GIS (a cura di Stefania Pace)

Le infrastrutture verdi, *nature based green infrastructure*, si stanno espandendo rapidamente nelle città di tutto il mondo come soluzione basata sulla natura per soddisfare molteplici obiettivi di sostenibilità e resilienza (Langemeyer et al., 2019; McPhearson et al., 2019; Hamel et al., 2019). Dato che le città affrontano molte sfide per raggiungere obiettivi normativi per futuri più sostenibili e resilienti (Childers et al., 2019), inclusi eventi estremi causati dal clima (Gomez e Barbon, 2012; Anderson et al., 2019) e eredità storiche della disuguaglianza (Chang et al., 2018; Depietri et al., 2018). Si configurano come soluzioni ideali soprattutto nel contesto di risorse finanziarie e di altro tipo limitate, divenendo *mainstream* nelle politiche, nei piani e nelle strategie di gestione per migliorare la vivibilità urbana (Langemeyer et al., 2019).

La conoscenza degli scambi energetici della superficie urbana è di primaria importanza per lo studio della climatologia urbana. Essa modula la temperatura dell'aria dei più bassi strati dell'atmosfera urbana influenzandone le dinamiche ed è al centro del bilancio energetico di superficie. Contribuisce a determinare il clima interno degli edifici e influenza gli scambi energetici che interessano il comfort degli abitanti delle città, producendo un impatto diretto sulle condizioni di vita di gran parte della popolazione mondiale, essendo oltre la metà di essa insediata in città o nel territorio metropolitano: alla fine degli anni 2000, il 45% della popolazione mondiale viveva in aree urbane, di cui la maggior parte, circa il 75%, in paesi sviluppati (Nazioni Unite, 2011).

L'insufficiente rappresentatività del dato territoriale per lo studio di questi fenomeni termici ha indotto la comunità scientifica ad abbracciare le tecniche di telerilevamento (*remote sensing*) anche nello studio dei fenomeni climatici urbani.

Nelle valutazioni climatiche locali, infatti, i dati *in situ* di stazioni meteorologiche permanenti offrono potenzialmente i valori dei parametri atmosferici di superficie con buona risoluzione temporale, ma sono limitati a rappresentare esclusivamente un'informazione puntuale, facendo così mancare il dettaglio territoriale necessario per studiare i fenomeni con precisione, e prevedere i processi termici in ambiente cittadino. Allo stesso tempo, altre

soluzioni di misura, come le osservazioni con i termometri installati su mezzi mobili, capaci di registrare dati di temperatura dell'aria istantanei in luoghi diversi, non riescono a fornire una visione sincrona del fenomeno di un'intera area urbana.

Con il tempo le tecniche di acquisizione dei dati e le tecnologie costruttive dei sensori sono state perfezionate ed ora è possibile accedere a dati con diverse risoluzioni geometriche, spettrali, temporali e radiometriche. Ad oggi sono disponibili immagini satellitari multispettrali con risoluzione geometrica dell'ordine del decimetro.

Informazioni termiche di sintesi della superficie urbana possono essere acquisite sfruttando le tecniche di *Remote Sensing & GIS*, attraverso sensori che operano nella banda dell'infrarosso termico (*TIR*), installati su piattaforma aerotrasportata o satellitare. Le immagini termiche telerilevate sono quindi ampiamente utilizzate per lo studio dei paesaggi urbani, in quanto forniscono una griglia sinottica e sincrona di dati di temperatura, consentendo grazie all'alta risoluzione geometrica (fino a 50 cm sia per camere termiche su piattaforma aerea sia per sensori satellitari come *World View* della *Digital globe*), l'analisi multiscala di problematiche urbane che si estendono oltre il clima locale e l'isola di calore. La prima osservazione di misura della *LST* utilizzando i dati dei sensori satellitari è stata riportata da Gomez et al. (Morgan et al., 2018) a regolare il clima urbano e ad attenuare l'isola di calore urbana attraverso la creazione di un effetto rinfrescante donando ossigeno, assorbendo anidride carbonica, minimizzando e intercettando i raggi solari, generando ombra e assorbendo flussi di radiazione (Aniello et al., 1995; Mathew et al., 2017; Kong et al., 2014). Inoltre, il tipo, la densità, le dimensioni e la forma degli spazi verdi e l'area d'ombra sono tutti parametri importanti per determinare l'effetto di raffrescamento (Taha et al., 1988). Le superfici verdi possono efficacemente aiutare a ridurre le temperature più elevate causate dagli effetti dell'isola di calore urbana mantenendo la sua temperatura più fresca. Inoltre estendono questo effetto di freschezza oltre i limiti di queste superfici (Oliveira et al., 2011).

Diversi studi hanno valutato l'impatto di parchi e spazi verdi sul microclima, hanno scoperto che l'abbassamento della temperatura in un ambiente urbano con alberi può arrivare fino a 4 ° C. Lo studio di Bernatzky a Frankfurt (Germania) ha mostrato che le superfici verdi in un luogo urbano abbassano la temperatura dell'aria da 3 ° C a 3,5 ° C e aumenta l'umidità

relativa dal 5% al 10%, purifica l'aria inquinata e la trasforma in aria fresca in città centro (Giridharan et al. 2008). Alcuni studi hanno utilizzato il telerilevamento per stimare la temperatura della superficie del suolo e la copertura vegetale per diversi luoghi urbani. Molti studi che seguono questo approccio hanno trovato una correlazione negativa tra gli indici di vegetazione, come l'indice di vegetazione della differenza normalizzata *NDVI* e la temperatura della superficie del suolo (Tan, Minghong e Xiubin, 2013). Ciò suffraga l'ipotesi che le superfici verdi siano efficaci nel ridurre la temperatura ambiente circostante, oltre che contribuire al raffrescamento della temperatura *indoor* degli edifici.

La sempre maggiore disponibilità di diverse fonti di dati satellitari, diversificate per risoluzione spettrale, geometrica, radiometrica e temporale; per disponibilità, *free* o commerciali amplifica la possibilità di intercettare l'impatto delle infrastrutture verdi sul clima urbano, sulla temperatura superficiale del suolo (*LST*) e/o del manufatto. L'inclusione in un sistema di decisioni multicriteriale su base *GIS* consente lo studio dell' idoneità spaziale delle singole componenti le infrastrutture verdi, agevola la pianificazione territoriale, il coinvolgimento degli *stakeholders* e lo studio del fenomeno anche su scale regionale piuttosto che urbana (Hung et al., 2006; Tiangco, Lagmay e Argete, 2008).

4.1 Principi di Telerilevamento Termico

Il telerilevamento effettuato con sensori che acquisiscono nella regione dello spettro elettromagnetico corrispondente all'infrarosso termico (*TIR*) è detto *Telerilevamento Termico* (*Thermal Remote Sensing - TRS*). Tutti i corpi con temperatura al di sopra dello zero assoluto emettono energia a causa del loro *status termico*: la quantità di energia emessa dipende dalla lunghezza d'onda e dalla temperatura del corpo in questione (temperatura di radianza) Figura 1.

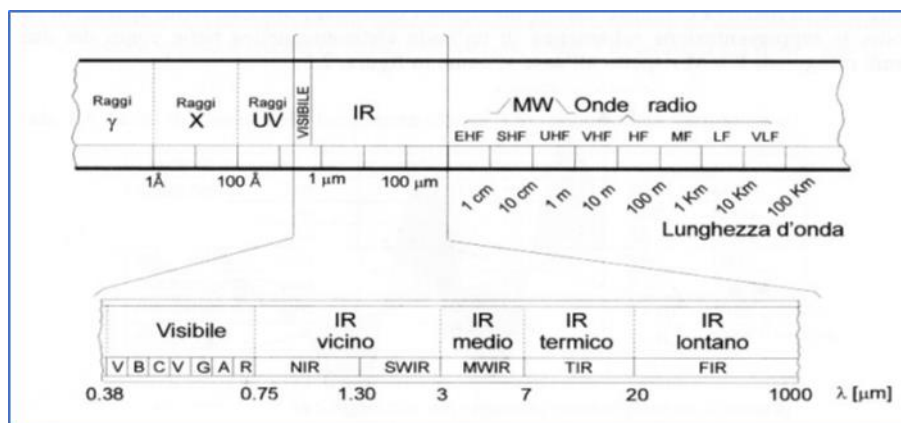


Figura 1 - Spettro elettromagnetico, in dettaglio il *range* del visibile e dell'infrarosso

La finestra di maggior uso per il telerilevamento termico è quella compresa tra 8 – 14 μm (Figura 2). Il picco di radiazione emessa dalla superficie terrestre si trova in questo *range* di lunghezze d'onda. Unico inconveniente è l'interruzione a 9,6 μm , dove è massimo l'assorbimento dovuto all'ozono (O_3) presente nell'atmosfera: a questa lunghezza d'onda l'ozono funge da separatore tra le finestra IR 8 – 9 μm e 10 – 14 μm . Per questo motivo, spesso i sensori vengono progettati per evitare di registrare questa particolare lunghezza d'onda.

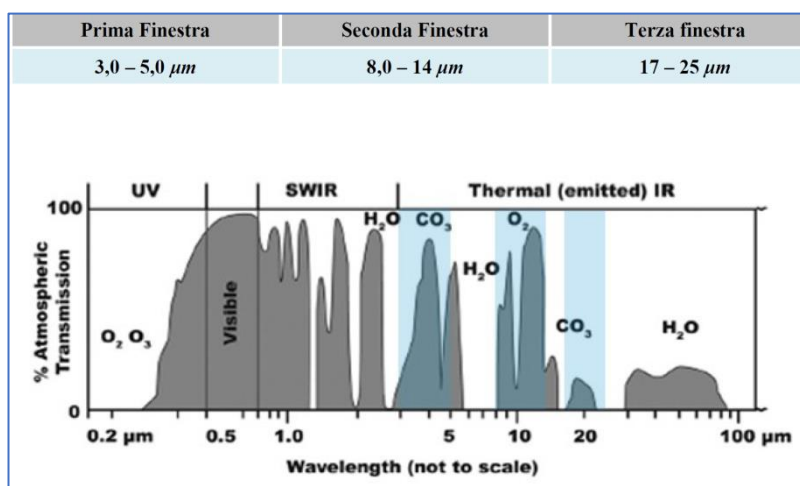


Figura 2 - Finestre atmosferiche

4.2 Il concetto di temperatura radiometrica, emissività, LST (*Land Surface Temperature*)

Le misure radiometriche nell'infrarosso termico sono spesso finalizzate alla determinazione della temperatura (T). Ma quale temperatura?

La *temperatura di radianza*, TR , o anche la misura della concentrazione del flusso radiante in uscita dal corpo, è proprio quella “misurata” nel telerilevamento termico. Tale temperatura può essere vista anche come il valore della temperatura esterna del corpo, la temperatura apparente *ex situ* dell’oggetto (Gherras e Alkama, 2020). La temperatura radiante può essere misurata con termoradiometri o con Spetttroradiometri.

Ciò che “misura” quanta parte della radiazione elettromagnetica è emessa e quanta è “affetta” da componenti riflesse e/o trasmesse è il coefficiente di emissività o semplicemente emissività (ϵ).

L’emissività è la proprietà caratteristica di un mezzo materiale di emettere una radiazione elettromagnetica.

La *Land Surface Temperature (LST)* si definisce usualmente come la temperatura radiometrica superficiale corrispondente al campo di vista istantaneo del sensore (Quattrocchi, Prakash et al., 2009) o, più precisamente, come l’effetto complessivo e direzionale della temperatura radiometrica superficiale (Prata et al., 1995).

La *Land Surface Temperature* è considerata come una sorta di temperatura di “pelle” (Becker e Li, 1995). Questo nonostante la superficie terrestre sia ben lungi dall’essere considerata assimilabile ad una “pelle” o comunque ad una entità “semplicemente bidimensionale”, essendo composta da materiali diversi con varie geometrie, entrambe caratteristiche che complicano la stima della *LST* stessa.

La temperatura superficiale del terreno è un importante parametro per comprendere l’ambiente termico urbano e le sue dinamiche; esso, infatti, modula la temperatura dell’aria dello strato più basso dell’atmosfera urbana ed è il fattore principale nella determinazione degli scambi radiativi ed energetici, del clima interno degli edifici e del comfort percepito dalla popolazione (Dash et al., 2001).

4.3 Dati satellitari disponibili

I dati satellitari possono essere free o proprietari.

La disponibilità di immagini satellitari *free* e *open* è in costante aumento da quando l’USGS (United States Geological Survey) nel 2008 decise di liberare l’accesso al suo sterminato archivio di immagini satellitari Landsat. La data policy free & open è confermata anche per i dati della missione *Landsat 9* che è stato lanciato con successo il 28 settembre 2021. Si prevede che lavorerà per almeno 5 anni in orbita polare a 705 chilometri di altezza, sorvegliando l’intero

pianeta ogni 16 giorni attraverso lunghe strisce fotografiche larghe 185 chilometri su 11 differenti frequenze.

Landsat 9 replicherà ampiamente le funzioni del suo predecessore *Landsat 8*: includerà copie quasi identiche del sensore ottico *OLI-2* (*Operational Land Imager*) e termico *TIRS-2* (*Thermal Infrared Sensor*) quest'ultimo sarà aggiornato a un'implementazione di classe di rischio B (alta priorità, alta rilevanza nazionale, alta complessità (*NASA, Landsat Science*), riuscendo a ridurre all'1% l'interferenza da luce diffusa (*stray light*).

OLI-2 raccoglierà dati per nove bande spettrali con una distanza di campionamento al suolo (*GSD*) di 30 m (Figura 3), di cui quattro bande spettrali visibili, una banda spettrale del vicino infrarosso, tre bande spettrali dell'infrarosso a onde corte; più una banda pancromatica a 15 m di risoluzione spaziale e due bande termiche a una risoluzione spaziale di 100 m.

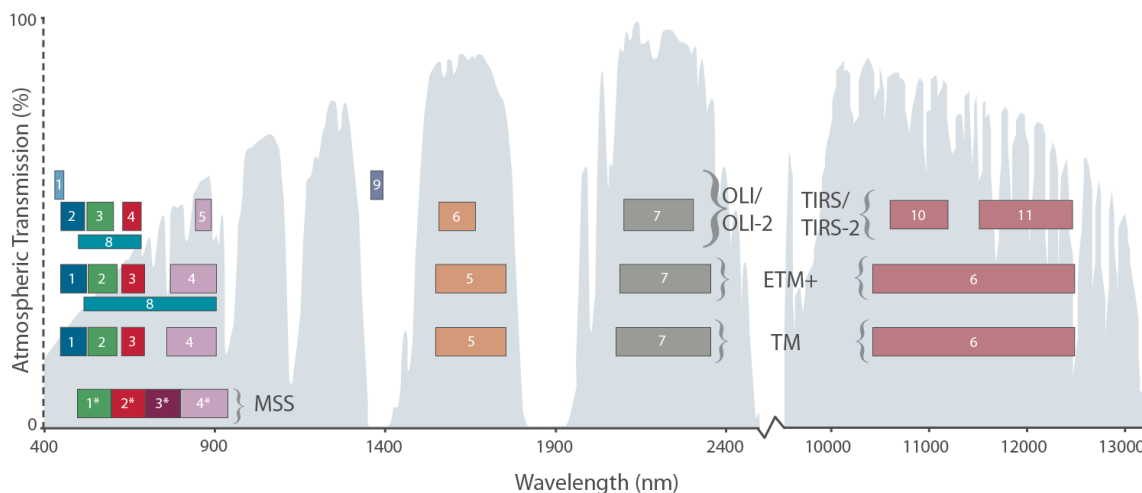


Figura 3 - Risoluzione spettrale dei satelliti *Landsat*

Dal 2014 sono partite le missioni europee *Sentinel*, con un approccio molto più integrato rispetto al programma *Landsat*, perché la strategia europea, anziché ad un solo satellite, è estesa ad un piano pluriennale e ambizioso che prevede il lancio di svariati satelliti di diverso tipo. Tutto questo accade nell'ambito del programma *Copernicus*.

Di interesse specifico è la missione *Sentinel-2*: consiste in due piattaforme multispettrali con 13 bande ad alta e media risoluzione spaziale a seconda della specifica banda (Figura 4). I satelliti *Sentinel-2* si pongono in continuità, come tipo di immagine, con i satelliti *SPOT* e *LANDSAT*, fornendo al programma *Copernicus* dati necessari ad una vasta gamma di applicazioni, anche in combinazione con i dati radar provenienti dalla missione *Sentinel-1*:

- cambiamento climatico;
- monitoraggio del territorio;
- gestione delle emergenze;
- sicurezza.

In generale le bande dei *Sentinel-2* sono più strette dei suoi predecessori come il *LANDSAT*, questo serve a limitare l'influenza atmosferica sulla ricezione delle onde luminose. La banda 8a nell'infrarosso vicino è appositamente progettata con una larghezza "ristretta" per evitare contaminazioni dovute al vapore acqueo presente in atmosfera; nonostante ciò è in grado di descrivere il *plateau* della curva spettrale della vegetazione nell'infrarosso ed è sensibile agli ossidi di ferro nel terreno (Figura 5).

La banda 1, nel campo del blu, è necessaria per la correzione precisa delle deformazioni indotte dall'aerosol atmosferico. La risoluzione radiometrica del *MSI* è di 12 bit con la capacità di acquisire immagini in un *range* di valori di intensità luminosa che va da 0 a 4095.

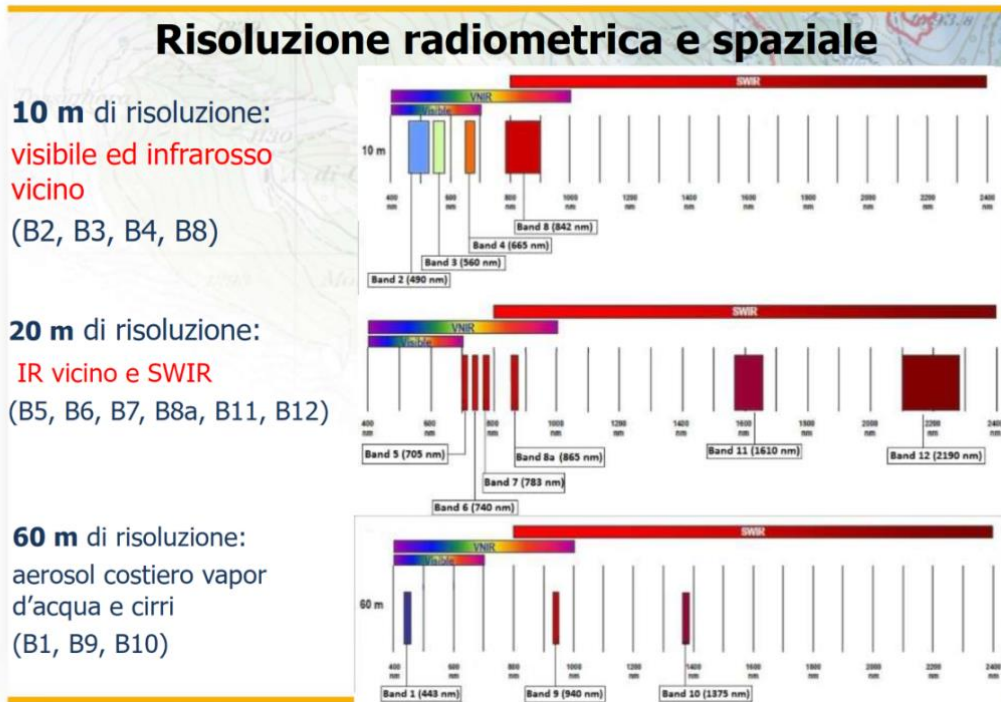


Figura 4 - Bande spettrali e risoluzione geometriche di Sentinel 2

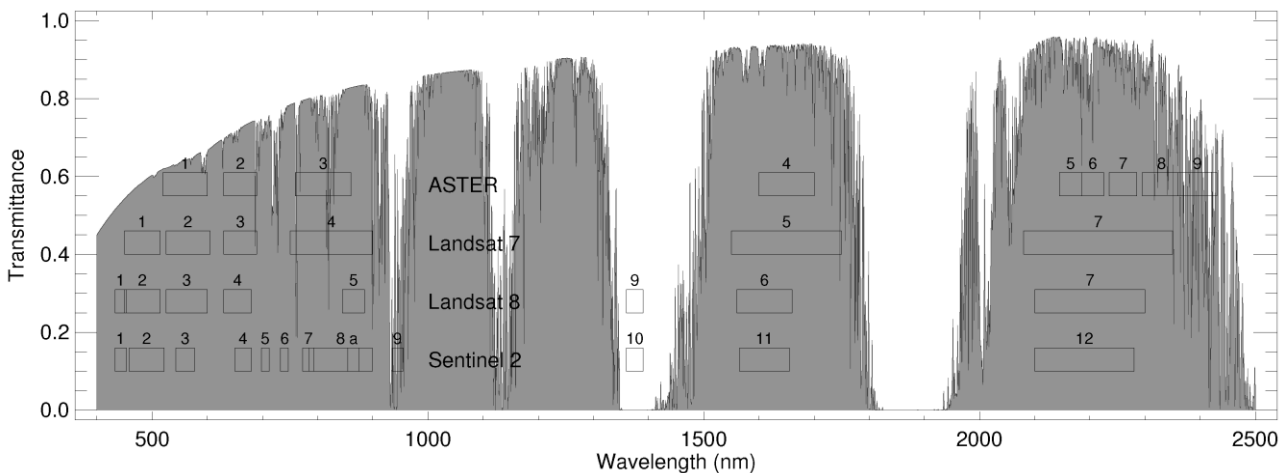


Figura 5 - Raffronto tra risoluzioni spettrali di Landsat's, ASTER e Sentinel 2

Per la visualizzazione e il *download* delle scene è molto utile il sito <http://sentinel-pds.s3-website.eu-central-1.amazonaws.com/image-browser/>: permette di ottenere i tasselli e le singole bande separatamente senza dover scaricare un'intera scena, (Figura 6).

Per trovare le immagini è sufficiente inquadrare l'area di nostro interesse, specificare nuvolosità massima accettabile (consiglio tra 10% e 20%): compare quindi la lista di tutti i tasselli disponibili.

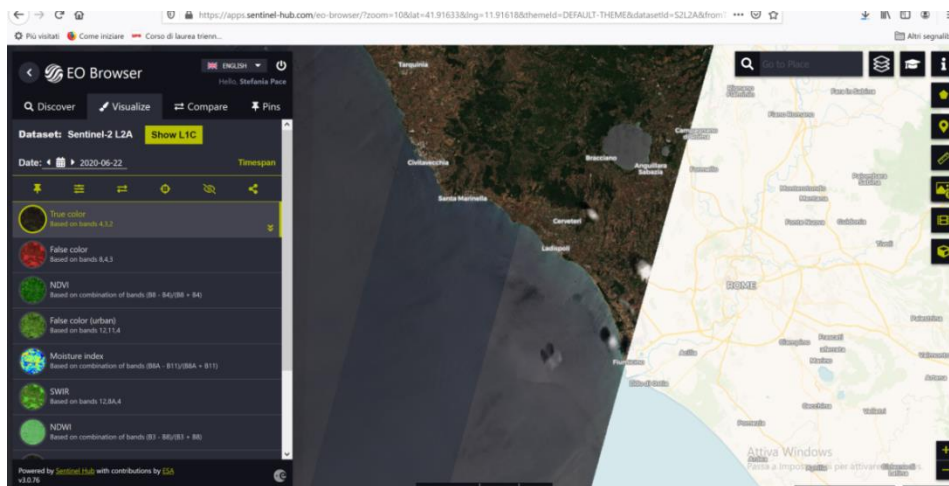


Figura 6 - Visualizzazione di un tassello di *Sentinel 2* in *True color*

Bande, metadati ed anteprime possono essere scaricati separatamente, così se ad esempio ci interessano solo le bande alla massima risoluzione (10 m) ci basta scaricare i *files* *B02.jp2*, *B03.jp2*, *B04.jp2* e *B08.jp2*

PRISMA (PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa), il satellite dell'Agenzia Spaziale Italiana, è un innovativo sistema di osservazione della Terra, dotato di strumenti elettro-ottici, che integra un sensore iperspettrale con una macchina fotografica a media risoluzione sensibile a tutti i colori (pancromatica). Il suo sensore iperspettrale consente di monitorare trasparenza delle acque, stato di salute delle colture, siccità e rischio incendio e inquinamento atmosferico.

Nello specifico, tale strumentazione è composta da uno spettrometro ad immagini in grado di acquisire prodotti *VNIR* (*Visible and Near-InfraRed*) e *SWIR* (*Short-Wave InfraRed*), con una risoluzione spaziale di 30 metri e da una camera pancromatica con risoluzione spaziale di 5 metri

La distribuzione delle immagini è stata aperta a partire da giovedì 21 Maggio 2020 alla comunità scientifica, istituzionale, industriale, italiana e straniera.

Attraverso il portale <https://prisma.asi.it> con una semplice operazione di registrazione si può entrare a far parte della comunità *open* degli utenti di *PRISMA*.

I dati satellitari **Maxar 15 cm High Definition** sono il prodotto proprietario a più alta risoluzione oggi sul mercato, generati dal ricampionamento di dati satellitari alla risoluzione di 30 cm della costellazione *Maxar Technologies: WorldView-3 e WorldView-4*. I dati satellitari 15 cm HD sono disponibili in modalità monoscopica e stereoscopica. Sono inoltre distribuiti nel pancromatico e nelle quattro tipiche bande del Blu, Verde, Rosso ed Infrarosso Vicino e, in funzione del satellite che ha acquisito il dato originario, nelle quattro ulteriori bande multispettrali:

- *Coastal Band*, utile per lo studio di aree costiere, grazie alle sue caratteristiche di penetrazione dell'acqua e ideale per migliorare i risultati nei processi di correzione atmosferica;
- *Yellow Band*, molto importante per rendere meglio i colori naturali delle immagini e per ottimizzare i processi di classificazione;
- *Red Edge Band*, fondamentale per l'analisi approfondita delle condizioni di salute della vegetazione;
- *Near Infrared 2 Band*, una seconda banda nell'infrarosso vicino, meno influenzata dalle condizioni atmosferiche, estremamente utile a supporto dell'analisi della vegetazione e delle biomasse.

La stessa tecnica di ricampionamento dei dati a 15 cm *HD* permette di ottenere dati satellitari **30 cm High Definition attraverso** l'algoritmo proprietario di *Maxar* applicato a dati satellitari con risoluzione nativa di 50 cm *pixel*: *GeoEye-1, WorldView-1, WorldView-2*.

Da Novembre 2021 sono finalmente in commercio le immagini satellitari ad altissima risoluzione della nuova costellazione *Pléiades Neo* di *Airbus*.

I satelliti *Pléiades Neo 3* e *Pléiades Neo 4* già acquisiscono immagini ad altissima risoluzione in tutto il mondo: la costellazione sarà completata da *Pléiades Neo 5* e *6*, il cui lancio è programmato nel 2022. Quattro satelliti identici, in grado di rivistare qualsiasi punto della Terra due volte al giorno, e di acquisire oltre 2 milioni di km quadrati al giorno di dati alla risoluzione nativa di 30 cm.

Si tratta di **immagini particolarmente indicate per tutte le applicazioni geospaziali che richiedono un alto livello di precisione** e aventi la capacità di mostrare un altissimo livello di dettaglio, **come veicoli e segnaletica orizzontale**. I dati *Pléiades Neo* possiedono anche

una maggiore precisione di geolocalizzazione e informazioni sulla banda spettrale più profonde, consentendo di ricavare più informazioni per **varie applicazioni, come quelle in ambito urbano** (espansione urbana, *soil sealing*, *climate change*, inquinamento), **mapping e modelli 3D, difesa e sicurezza.**

4.4 Calcolo della *Land Surface Temperature*

Uno dei principali limiti odierni del telerilevamento satellitare applicato alle analisi del clima urbano consiste nella risoluzione spaziale delle immagini acquisite nell'infrarosso termico dai sensori attualmente disponibili, generalmente molto minore rispetto a quella delle immagini acquisite nelle bande del visibile e del vicino infrarosso. Un'ulteriore difficoltà consiste nella validazione dei risultati ottenuti, a causa della natura puntuale dei dati di temperatura ottenuti dalle stazioni meteorologiche rispetto ai valori areali ottenuti mediante analisi *remote-sensed*.

I dati termici da remoto hanno spesso una bassa risoluzione geometrica, di solito non inferiore ai 50-60 m, poco compatibile con dimensioni sperimentali di ricerca come quella oggetto del presente studio: le pareti verdi e il tetto del prototipo di edificio "verde" dell'ENEA per esempio hanno dimensioni dell'ordine delle decine di metri per lato di estensione (figura 7); situazione analoga si riscontra nelle pareti verdi, *living wall*, *green facades* sparse sul territorio nazionale per motivi sperimentali e/o architettonici-ingegneristici: in figura 8 il liceo Scientifico Keplero di Roma, la prima scuola d'Italia con il giardino sul tetto, fra i vincitori del Premio Internazionale *EcotechGreen*.



Figura 7 - Edificio Prototipo sperimentale ENEA di pareti e tetto verde



Figura 8 - Pareti e tetto verde del Liceo Scientifico Keplero di Roma

Prima di poter tradurre la radianza al sensore in radianza alla superficie ed invertire così gli effetti dell'atmosfera sulla radiazione che l'ha attraversata per giungere al sensore, è necessario effettuare una calibrazione radiometrica dei dati.

Possiamo riassumere brevemente il processo di acquisizione dei dati da parte dei sensori per il Telerilevamento in tre fasi successive:

- un sistema ottico convoglia e raccoglie l'energia raggianti verso il sensore. In questa prima fase si applicano delle operazioni di selezione (polarizzazione) e filtraggio (sulle lunghezze d'onda);
- l'effetto fotoelettrico prodotto dai fotoni incidenti sui rivelatori induce piccole correnti;
- questo segnale elettrico viene amplificato e trasformato in un numero indice *DN* (*Digital numbers*). Questo numero corrisponde alla misura grezza eseguita dal sistema della quantità di energia elettromagnetica che ha raggiunto il sensore.

Questa corrispondenza può risultare alterata a causa di:

- degrado delle componenti ottiche;
- deriva delle caratteristiche degli amplificatori;
- perdita di informazioni nella fase di quantizzazione numerica;
- rumore indotto da diversi sistemi elettronici della piattaforma di osservazione.

Per ricavare informazioni quantitative sulle caratteristiche termiche della superficie, i numeri indice *DN* devono essere trasformati in grandezze fisiche che devono essere quanto più possibili indipendenti dalle cause di variabilità, quali il tipo di sensore che ha effettuato l'acquisizione, l'*IFOV*, l'orbita, ecc.

La calibrazione radiometrica del dato è di fondamentale importanza perché idealmente, se si ripetesse l'acquisizione di uno stesso bersaglio, nelle medesime condizioni di illuminazione ed osservazione, con lo stesso sensore, non dovremmo poter osservare variazioni dei valori di *DN*, cosicché ogni cambiamento sia imputabile a variazioni di caratteristiche del *target*.

Esistono diversi metodi, algoritmi, per la determinazione della temperatura superficiale, *LST*: alcuni prevedono l'utilizzo delle misure di radianza acquisite in una sola banda spettrale, o canale, posizionata entro la finestra atmosferica dell'*IR* termico (*Landsat TM*).

Altri si basano sulla presenza di osservazioni spettrali multiple entro la finestra 8-14 μm : la presenza di più bande nella finestra spettrale dell'*IR* termico, serve per correggere gli effetti dell'atmosfera sulle misure di radianza acquisite dal sensore, sfruttando le proprietà di

assorbimento differenziale da parte dell'atmosfera in due o più bande differenti all'interno della stessa finestra atmosferica.

Metodi della separazione temperatura-emissività (*TES*) sviluppato da Gillespie et al. (1998) è utilizzato per ottenere i prodotti Standard di *LST* ed *LSE* (*Land Surface Emissivity*) da dati *ASTER*.

- *AST_08*: che mostra la temperatura superficiale cinetica;

- *AST_05*: che mostra l'emissività per le cinque bande *TIR*.

Questo algoritmo permette di determinare il valore assoluto dell'emissività spettrale utilizzando le misure eseguite in *N* bande (almeno 4, meglio 5) spettrali dell'*IR* termico,

La determinazione corretta della temperatura superficiale è vincolata ad una accurata conoscenza dell'emissività superficiale (*LSE – Land Surface Emissivity*) e spesso, avendo a disposizione una sola banda spettrale nell'*IR* termico, è impossibile applicare l'algoritmo di separazione temperatura-emissività *TES*, perciò è necessario porsi il problema di come stimare il valore di emissività da attribuire ad ogni singolo pixel dell'immagine, volendo utilizzare gli algoritmi visti per determinare *LST*.

Una possibile alternativa al *TES* potrebbe essere quella di ottenere un'immagine *LSE* da una classificazione, in cui è assunto un valore di emissione per ciascuna classe. Tuttavia, questo spesso risulta poco operativo, perché è necessaria una buona conoscenza dell'area di studio e di misure di emissività sulle superfici

rappresentanti le varie classi, coerenti con l'intervallo di tempo in cui il satellite effettua l'acquisizione (questo perché, ad esempio, la copertura vegetale delle aree agricole potrebbe cambiare con il tempo).

Detto ciò può essere importante nella stima dell'emissività considerare gli effetti di mistura del *pixel*, l'emissività della cella di risoluzione può essere determinata come contributo delle differenti componenti che afferiscono al pixel secondo le loro proporzioni.

Tra le più utilizzate in letteratura vi sono stime che tengono conto dell'indice *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*), in considerazione del fatto che vegetazione e suoli sono le principali coperture delle superfici oggetto di osservazione per la componente terrestre.

4.5 Softwares per l'elaborazione delle immagini

Il software *SNAP* versione 4.0 fornito gratuitamente da *ESA* (*European Space Agency*) nasce appositamente per il trattamento e l'analisi delle immagini *Sentinel* soprattutto per il pre-trattamento dei dati *Radar* e ottici.

L'interfaccia grafica si presenta con una barra di menu principale nelle quali finestre sono raccolte tutte le possibili operazioni eseguibili sulle immagini:

- *Analysis* permette di scegliere opzioni di analisi statistica dell'immagine, visualizzazione di *scatter plot* o istogrammi.
- *Layer* contiene funzioni con le quali è possibile creare diversi livelli sull'immagine sovrapponendo puntatori, griglie o altro.
- *Vector*, questa finestra dà la possibilità di creare file vettoriali sull'immagine.
- *Raster* permette di scegliere funzioni per l'analisi delle immagini o il loro trattamento, è possibile compiere ritagli, operazioni di *resampling*, ri-proiezione dell'immagine, mosaico, *texture analysis* e classificazione.
- *Optical* contiene funzioni che permettono il pre-trattamento dei dati ottici e l'estrazione di alcuni indici come *NDVI*.
- *Radar* permette di compiere tutte le operazioni sulle immagini *radar*, dalla calibrazione alle correzioni geometriche fino alle applicazioni interferometriche.

Il software *ENVI* in versione 5.6 è un software commerciale per il trattamento di dati telerilevati distribuito da *L3Harris Geospatial*. È possibile aprire file provenienti da numerose piattaforme aeree e satellitari, nonché dati *Lidar*. L'interfaccia si presenta come in Figura 9Figura : permette di scegliere quali bande visualizzare e in che combinazione e contiene anche informazioni di georeferenziazione dell'immagine.

C'è la nuova funzionalità di *ENVI Server*: permette di eseguire processi in parallelo (o in *background*) sulla propria macchina. Non è più necessario attendere il completamento del processore di *ENVI* prima di passare alla fase successiva del proprio flusso di lavoro.

È inoltre possibile configurare una *workstation* come *client* per *ENVI Server* in modo da sfruttarne le potenzialità di calcolo per pesanti processi: ciò permette di continuare a utilizzare la propria macchina per altre elaborazioni con *ENVI*, o altri applicativi, senza avere fastidiosi rallentamenti. *ENVI* permette di compiere numerose operazioni come:

- Coregistrazione di più immagini;
- Ortorettifica;
- Ritagli, ridimensionamenti, unione di bande (*Layer stacking*);
- Individuazione di aree di interesse (*ROI tools*);
- Classificazione e operazioni di *post-classificazione*;
- Applicazione di filtri.
- Creazione di modelli digitali del terreno;
- Operazioni su immagini radar.

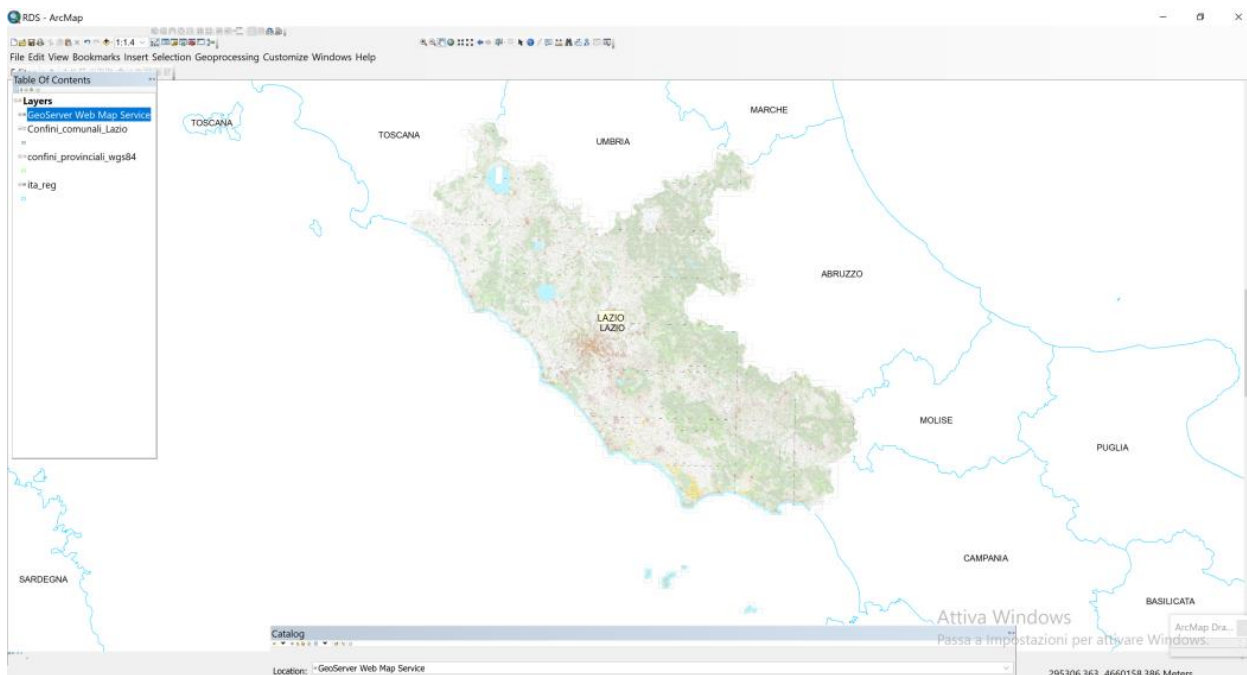


Figura 9 - Interfaccia del Software ENVI 5.6 . Visualizzazione in *wms* (*world map service*) della CTRN 2014 *raster* a colori della Regione Lazio

È necessario disporre anche di un *software GIS* per vagliare diverse soluzioni per il confronto dei risultati della sperimentazione con altri dati vettoriali e *raster* a disposizione. Nel caso di studio specifico sarà utilizzato *Arcgis 10.0 Esri*, Figura 10.

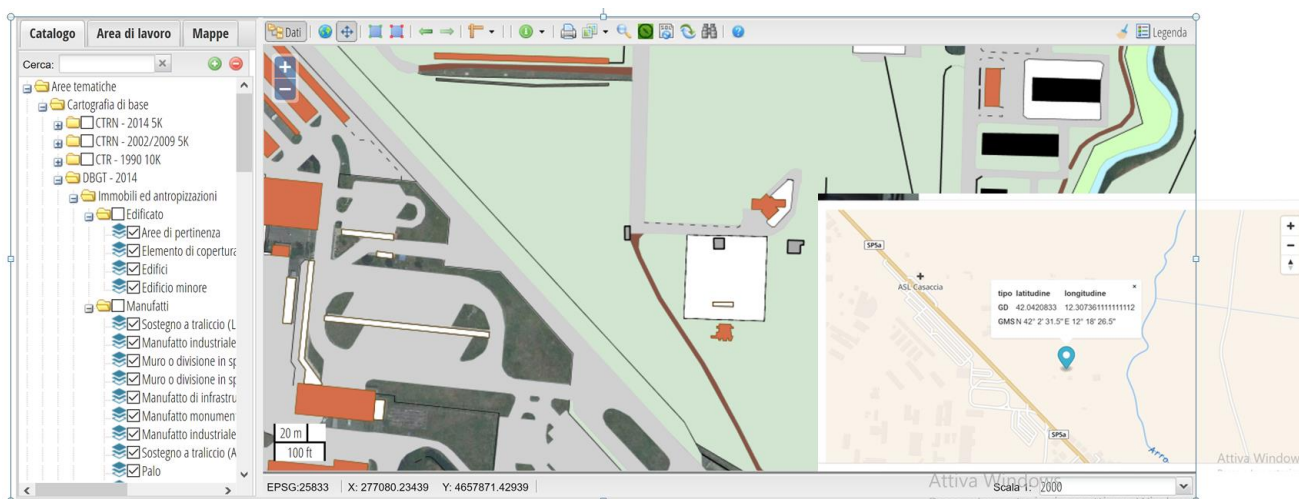


Figura 10 - Geolocalizzazione dell'edificio prototipo di parete e tetto verde dell'ENEA

Bibliografia

- Anderson E., J. Langemeyer , S. Bongstrom, T. McPhearson e et al., «Bioscience,» 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/biosci/biz058>.
- Aniello C., K. Morgan, A. Busbey e L. Newland, «Mapping micro-urban heat islands using Landsat TM and a GIS,» Computers & Geosciences, vol. 8, n. 21, pp. 965-969, 1995.
- Becker F.e L. L. F., «Surface temperature and emissivity at different scales: definition, measurement and related problems,» Remote Sensing Reviews, vol. 12, pp. 225-253, 1995.
- Dash P., F. Gottsche, F. Olesen e H. Fischer, «Retrieval of *Land Surface* Temperature and Emissivity from Satellite Data: Physics, Theoretical Limitations and Current Methods,» Journal of the Indian Society of Remote Sensing, vol. 29, n. 1&2, 2001.
- Depietri, Yaella, Dahal, Khila e McPhearson, «Nat. Hazards Earth System Science,» 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5194/nless-183363-2018>. Elmquist, Thomas, Anderson, Erik, Frantzeskaki,
- Dousset B.e F. Gourmelon, «Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover,» Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 58, n. 1-2, pp. 43-54, 2003. Locke, Dexter, B.
- Frantzeskaki, Niki, McPhearson, Timon, Marcus, Collier, Dave, Kendal e et al., «Bioscience,» 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/biosci/>.
- Garcia A. M., I. Sante', X. Louriero e D. Miranda, «Sustainability,» 2020. [Online]. Available: www.mdpi.com/journal/sustainability.
- Giridharan, Renganatha, Lau, Stephen, Siu Yu., Ganesan, Sivaguru, , Givoni e Baruch , «Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: the vegetation influence,» Building and Environment, n. 43, pp. 1583-2159, 2008.
- Gherraz, Guechi, Imen, Benzaoui e Amel, «Strategy to Improve Outdoor Thermal Comfort in Open Public Space of a Desert City, Ouargla, Algeria,» IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, n. 151, 2018.
- Gherraz e Alkama, «L'estimation de l'impact des espaces verts et des surfaces d'eau sur le climat urbain et la temepature de surface du sol (MILA, ALGÉRIE),» Rev. Roum. Géogr./Rom. Journ. Geogr., vol. 2, n. 64, pp. 155-174, 2020.
- Hall, J. Grove, S. Pickett, L. Ogden e et al., «Urban Sustainability,» 2020. [Online]. Available: <https://osf.io/preprints/socarxiv/97zcs>.
- Hung, Tran, Uchihama, Daisuke, Ochi, Shiro, Yasuoka e Yoshifumi , «Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities,» International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 1, n. 8, pp. 34-48, 2006.

- Keeler, Bonnie, Hamel, Perrine, T. McPhearson, Timon, Hamman et al., «Social-ecological and technological factors moderate the value of urban nature,» *Nat. Sustainability*, n. 2, pp. 29-38, 2019.
- Kong F., Y. Haiwei, J. Philip, H. Lucy, R. He e S. Hong, «Effects of spatial pattern of green space on urban cooling in a large metropolitan area of eastern China,» *Landscape and Urban Planning*, n. 128, pp. 35-47, 2014.
- Mathew A., S. Khandelwal e N. Kaul, «Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities,» *Energy and Buildings Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities*, vol. 159, n. 6, 2017.
- McPhillips, L. E., H. Chang, M. Chester, Y. Depietri, E. Friedman e et al., «Earth's Future,» 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/2017EF000686>.
- Morgan G., I. Ogden, S. Pickett e et al., «The legacy effect: understanding how segregation and environmental injustice unfold over time in Baltimore,» *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 108, pp. 524-537.
- Niki, McPhearson e et al., «*Nat. Sustainability*,» 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41893019-0250-1>.
- Oliveira S., A. Henrique e V. Teresa, «The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: A case study in Lisbon,» *Building and Environment*, vol. 11, n. 46, pp. 2186-2194, 2011.
- Prata J. A., C. V., C. Coil, A. Sobrino e C. Ottlg, «Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: current status and future prospects,» *Remote Sensing Reviews*, vol. 12, pp. 175-224, 1995.
- Taha H., A. Hashem, R. Arthur e H. Joe, «Residential cooling loads and the urban heat island, the effects of Albedo,» *Building and Environment*, n. 23, pp. 271-283, 1988.
- Tan, Minghong, Li e Xiubin, «Integrated assessment of the cool island intensity of green spaces in the mega city of Beijing,» *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, n. 34, pp. 3028-3043, 2013.
- Tiangco M., A. M. Lagmay e J. Argete, «ASTER-based study of the night-time urban heat island effect in Metro Manila,» *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, n. 29, pp. 2799-2818, 2008.
- Voogt J. A. e T. R. Oke, «Effects of urban surface geometry on remotely-sensed surface temperature,» *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, 1998.
- YuanChi, JingkuanSun, YonggenSun, ShengjingLiu e ZhanyongFu, «Multi-temporal characterization of land surface temperature and its relationships with normalized difference vegetation index and soil moisture content in the Yellow River Delta, China,» *Global Ecology and Conservation*, vol. 23, 2020.

5 LA LEGISLAZIONE SUL VERDE: INDAGINE A LIVELLO UE E NAZIONALE (a cura di *Patrizia De Rossi, Susanna Mariani, Lorenzo Gatti, Alessandro Campiotti, Luciano Consorti, Carlo Alberto Campiotti*)

5.1 Indagine a livello UE

Con la Comunicazione **COM(2013) 249** la Commissione Europea adottava una strategia dell'UE per le infrastrutture verdi³ al fine di potenziare i benefici economici attirando maggiori investimenti nel capitale naturale europeo per raggiungere gli obiettivi relativi alla biodiversità entro il 2020. La strategia prevedeva quattro assi di intervento prioritari: promuovere le infrastrutture verdi nelle aree politiche fondamentali; migliorare le informazioni, consolidare la base di conoscenze e incentivare l'innovazione; migliorare l'accesso ai finanziamenti; e contribuire allo sviluppo di progetti di infrastrutture verdi a livello di UE. La strategia prevedeva che entro la fine del 2017 la Commissione procedesse al riesame dei progressi nello sviluppo delle infrastrutture verdi e pubblicasse una relazione sulle esperienze acquisite, corredata di raccomandazioni per le azioni future. Tuttavia, come riportato nel **COM(2019) 236 final**, ad eccezione del "progetto federale per un'infrastruttura verde"⁴ della Germania, gli Stati membri non hanno ancora adottato strategie nazionali specificatamente dedicate a queste infrastrutture.

Le infrastrutture verdi sono state promosse anche nell'ambito della politica urbana dell'UE. Nel 2017, nel quadro dell'agenda urbana per l'UE sull'uso sostenibile dei suoli e sulle soluzioni basate sulla natura è stato previsto un invito a presentare proposte nell'ambito delle Azioni urbane innovative, che offrono finanziamenti alle città per testare soluzioni innovative su argomenti specifici nel quadro dello sviluppo urbano sostenibile. Le infrastrutture verdi sono state inserite nei criteri di aggiudicazione dei premi Capitale verde europea e Foglia verde europea.

³ Le infrastrutture verdi sono definite dall'omonima strategia dell'UE come "una rete di aree naturali e seminaturali pianificata a livello strategico con altri elementi ambientali, progettata e gestita in maniera da fornire un ampio spettro di servizi ecosistemici. Ne fanno parte gli spazi verdi (o blu, nel caso degli ecosistemi acquatici) e altri elementi fisici in aree sulla terraferma (incluse le aree costiere) e marine. Sulla terraferma, le infrastrutture verdi sono presenti in un contesto rurale e urbano".

⁴ <http://www.bfn.de/bkgi.html>

La recente **Direttiva (UE) 2018/844**, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE, riconosce e promuove gli investimenti per *le “soluzioni di tipo naturale, quali una vegetazione stradale ben progettata, i tetti verdi e i muri che garantiscano isolamento e ombreggiamento agli edifici, contribuiscono a ridurre la domanda di energia, limitando la necessità di riscaldamento e rinfrescamento e migliorando la prestazione energetica di un edificio”*.

La Commissione europea ha espresso sostegno alla valorizzazione dei sistemi vegetali per le città con il "Manifesto NbS per il clima (UN Climate Action Summit 2019). L'importanza delle “soluzioni verdi” è stata anche al centro del recente evento del G20, patrocinato dall'Italia come opportunità per l'economia, la resilienza delle città, il benessere dei cittadini oltre che fondamentale per accelerare la transizione ecologica (A working paper for the G20, 2021) (Tabella1).

Documentazione europea per l'impiego del verde nel settore delle costruzioni	
La COM(2013) 249 final "Infrastrutture verdi – Rafforzare il capitale naturale in Europa".	Sottolinea l'importanza per il settore dell'edilizia di soluzioni come verde pensile e muri verdi per ridurre le emissioni di gas a effetto serra, il risparmio di energia per il riscaldamento e il raffreddamento...
Bruxelles, 16.2.2016, COM(2016) 51 final	Una strategia dell'UE in materia di riscaldamento e raffreddamento. {SWD(2016) 24 final}.
Direttiva (UE) 2018/844	...le soluzioni di tipo naturale, come i tetti verdi... contribuiscono a ridurre la domanda di energia....
Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities. Final Report. ISBN 978-92-79-46051-7.	The Horizon 2020 Expert Group on 'Nature-Based Solutions and Re-Naturing Cities'.
Il Green Deal europeo. Bruxelles, 11.12.2019. COM(2019) 640 final.	Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al comitato economico e sociale europeo e al comitato delle regioni.
COM(2019) 236 final	Riesame dei progressi compiuti nell'attuazione della strategia dell'ue per le infrastrutture verdi
COM(2020) 662 final.	Un'ondata di ristrutturazioni per l'Europa: inverdire gli edifici, creare posti di lavoro e migliorare la vita...
EEA Report, No. 01/2021.	European Environment Agency. 2021. Nature-based solutions in Europe: Policy, knowledge and practice for climate change adaptation
A working paper for the G20.	G20: manifestazione che raggruppa le venti nazioni più industrializzate del mondo.

Tabella 1 - Documentazione europea per l'impiego del verde sugli edifici.

5.2 Indagine a livello nazionale

L'Italia si è dotata nel 2013 di una legge apposita in materia di verde pubblico, la legge n.10/2013 "Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani", e di "Linee Guida per la Gestione del Verde Urbano e Prime Indicazioni per una Pianificazione Sostenibile" del Ministero dell'Ambiente del 2017. L'obiettivo è quello di corrispondere all'esigenza diffusa di disporre di indirizzi tecnici omogenei sul territorio nazionale a supporto delle politiche di governo del ricco e biodiverso patrimonio verde delle nostre città. La Legge 10/2013 interviene con una

norma nazionale in materia, promuovendo non solo tutta una serie di misure locali di sensibilizzazione pubblica (artt. 1 e 2), di incremento delle aree verdi (artt. 3 e 6) e di tutela degli alberi monumentali (art. 7), ma anche con azioni di supporto all'azione politica inserendo tra i compiti del Comitato per il verde pubblico quello di proporre un piano nazionale sul verde (art. 3, comma 2, punto c).

Nonostante l'eterogeneità degli strumenti di pianificazione urbanistico-territoriale in essere presso le varie Regioni italiane, esistono essenzialmente tre strumenti di settore: il Censimento del verde, il Regolamento del verde, il Piano del verde.

La normativa italiana non regola in modo definito la progettazione di pareti verticali verdi, siano esse muri vegetali (parti strutturali dell'edificio) o pareti di ombreggiamento (parti non strutturali dell'edificio). Un passo in avanti è stato invece fatto in merito alle coperture verdi, in seguito all'emanazione della normativa UNI 11235

UNI 11235:2015

La progettazione dei tetti verdi e giardini pensili, in Italia segue le indicazioni della normativa tecnica vigente ed in particolare della norma UNI 11235:2015 pubblicata dalla Commissione Tecnica Prodotti, processi e sistemi per l'organismo edilizio. La norma che abroga e sostituisce la UNI 11235:2007, definisce i criteri di progettazione, esecuzione, controllo e manutenzione di coperture continue a verde, in funzione delle particolari situazioni di contesto climatico, di contesto edilizio e di destinazione d'impiego.

Secondo la norma, i tetti verdi si distinguono in due principali tipologie di inverdimento:

- ✓ **verde estensivo** ovvero un sistema che utilizza specie vegetali in grado di adattarsi e svilupparsi nelle condizioni ambientali in cui sono poste, che richiede spessori di substrato di coltivazione limitati e minimi interventi di manutenzione. Le specie sono caratterizzate da una elevata capacità di insediamento, efficienza riproduttiva, resistenza agli stress idrici e termici sia invernali che estivi. Le specie maggiormente utilizzate sono quelle appartenenti al genere *Sedum*. Lo spessore delle stratificazioni è, normalmente, ridotto (< 15 cm). L'accessibilità è normalmente di sola manutenzione e la fruibilità è ridotta.
- ✓ **verde intensivo** con cui si indica un sistema che richiede maggiori cure rispetto al precedente e l'ausilio di una manutenzione di maggiore intensità, in funzione delle

associazioni di specie vegetali. E' impiegata un'ampia gamma di specie e associazioni vegetali: tappeti erbosi, erbacee perenni cespugli, alberi. Lo spessore delle stratificazioni è superiore ai 15 cm (normalmente non supera i 40 – 50 cm). L'inverdimento intensivo viene impiegato soprattutto ai fini di fruibilità della copertura come spazio per attività all'aperto ed a fini estetici.

Il requisito per la progettazione dello strato colturale è il controllo della capacità agronomica. La scelta della tipologia e dello spessore dello strato dipendono dalla tipologia di vegetazione, dalle caratteristiche della copertura e dal contesto climatico. Lo spessore minimo dello strato colturale varia da 8 cm (Sedum) a 100 cm (alberi di I grandezza).

Da un punto di vista tecnico, si riportano di seguito alcuni degli elementi con cui viene realizzato il verde pensile previsti dalla norma:

Strati o elementi primari

- elemento di supporto strutturale,
- elemento di tenuta all'acqua,
- strato antiradice (integrato o meno),
- strato di protezione meccanica,
- strato drenante,
- strato filtrante,
- substrato di vegetazione,
- strato di vegetazione.

Strati o elementi secondari, impianti complementari ed elementi accessori (possono essere introdotti a seconda di particolari condizioni di contesto d'uso)

- strato di barriera al vapore,
- strato termoisolante,
- strato di pendenza,
- impianti di irrigazione,
- sistemi di trattenimento,
- sistemi di ancoraggio della vegetazione.

Al fine della progettazione devono essere considerati:

- i carichi permanenti immessi sulla copertura in ragione del tipo di verde da realizzare e dell'uso cui la copertura verde sarà destinata (svolgimento di attività all'aperto, o

solo valore estetico, e bioclimatico) ed in relazione anche al fatto che questi elementi possono essere saturi di acqua;

- le variabili (climatiche e territoriali) che possono influenzare la tipologia della vegetazione. Le specie vegetali risentono in maniera sensibile del contesto climatico, di conseguenza, la loro scelta deve tenere conto delle caratteristiche del sito, come per esempio: la temperatura media giornaliera dell'aria, l'escursione termica giornaliera e annua, l'umidità, le precipitazioni, il vento, la cui conoscenza è necessaria per una corretta progettazione. Più ci si discosta dalle condizioni ottimali di crescita di una specie vegetale, più sarà necessario apportare energia al sistema sia in fase costruttiva sia in fase manutentiva. Importante è anche valutare altre condizioni particolari come, ad esempio, l'esposizione solare, i venti prevalenti, i carichi di neve, le emissioni di aria o di fumi da impianti tecnici, l'eventuale esposizione alla salsedine o l'inquinamento da polveri.
- l'efficienza energetica della copertura vegetale, in termini di miglioramento della coibentazione termica dell'edificio e di risparmio sul riscaldamento invernale e sulla climatizzazione estiva.

Secondo la norma i benefici garantiti dai sistemi a verde pensile ricadono in 3 macrocategorie specifiche, quali:

- pianificazione urbana;
- valore ecologico;
- tutela economica e ambientale.

La nuova norma passa in rassegna le specifiche progettuali inerenti alla realizzazione di tetti verdi e giardini pensili (capacità agronomica, controllo della capacità drenante e della gestione delle acque meteoriche, aerazione, accumulo idrico), e introduce alcuni parametri funzionali di grande importanza per il sistema (Livello di manutenzione della vegetazione, resistenza agli attacchi biologici e ai microrganismi) con spunti per la loro determinazione, ossia:

MT – massima acqua trattenuta, CI – contenuto intermedio, PA – punto di appassimento, UT – rapporto di utilizzabilità, APD – acqua a potenziale decrescente, EF – rapporto di efficienza.

Il nuovo testo inserisce alcune sottoclassi dipendenti dalle diverse tipologie di vegetazione:

- estensivo a minima manutenzione;
- estensivo a bassa manutenzione;
- intensivo a ridotta manutenzione;
- intensivo a media manutenzione;
- intensivo ad alta manutenzione (in merito alla gestione del sistema, il vecchio codice di pratica contemplava solo tipi estensivi e intensivi).

Inoltre, è riservata maggiore attenzione alla “*Attitudine alla biodiversità*” fondamentale valore ecologico del verde pensile.

Novità sono le tre appendici:

Appendice A, *Caratteristiche di progetto dello strato colturale*: la sezione prende in considerazione tutti gli aspetti riguardanti le caratteristiche dello stato colturale, al fine di una loro adeguata progettazione ed esecuzione.

Appendice B, *Tipologie vegetazionali*. Nella UNI 11235:2015 sono descritte le forme vegetali maggiormente riscontrabili in un sistema d’inverdimento pensile, ossia:

- erbacee;
- bulbose, tuberose e rizomatose;
- arbusti;
- rampicanti e ricadenti;
- alberi.

Appendice C, *Ulteriori informazioni e metodi di prova*. Fornisce delle indicazioni su come migliorare le *performance* del fabbricato: *Controllo dell’isolamento acustico; Assorbimento acustico; Controllo polveri della dispersione degli inquinanti; Controllo del flusso di energia; Determinazione sperimentale dei coefficienti di deflusso e afflusso; Procedura di determinazione degli stati di accumulo idrico negli elementi porosi di sistema; Strato colturale; Altri materiali porosi con capacità di ritenzione idrica (geotessili, materiali granulari, schiume)*.

5.3 Gli incentivi fiscali

Bonus per l’efficientamento energetico

L’integrazione del tetto verde nell’involucro edilizio consente l’incremento dell’efficienza energetica dell’edificio sia nei periodi invernali che estivi, attraverso la schermatura alla radiazione solare e i fenomeni della fotosintesi e della evapo-traspirazione che caratterizzano l’accrescimento vegetale. Il D.M. 19 febbraio 2007, il cosiddetto “Decreto edifici”, che regola le detrazioni fiscali del 65% per il risparmio energetico degli edifici esistenti, all’Art.1 Comma 3 definisce così gli interventi agevolabili ai sensi del comma 345: “*Per interventi sull’involucro di edifici esistenti di cui all’articolo 1, comma 345, della legge*

finanziaria 2007, si intendono.....gli interventi su edifici esistenti, parti di edifici esistenti o unità immobiliari esistenti, riguardanti strutture opache verticali, strutture opache orizzontali (coperture e pavimenti), finestre comprensive di infissi, delimitanti il volume riscaldato verso l'esterno e verso vani non riscaldati, che rispettano i requisiti di trasmittanza termica U, espressa in W/m^2K , definiti dal decreto del Ministro dello sviluppo Economico 11 marzo 2008, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 66 del 18 marzo 2008. Anche la realizzazione di un tetto verde, nel rispetto dei requisiti richiesti, è inclusa tra gli interventi. Secondo l'allegato 1 (articoli 3 e 4) al Decreto del 26 giugno 2015, in prescrizioni 2.3: "Al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti,, per le strutture di copertura degli edifici è obbligatoria la verifica dell'efficacia, in termini di rapporto costi-benefici, dell'utilizzo di: a) materiali a elevata riflettanza solare; b) tecnologie di climatizzazione passiva (a titolo esemplificativo e non esaustivo: ventilazione, coperture a verde)". In requisiti 3.3 è riportato in particolare che: "Il progettista, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti..... c) qualora ritenga di raggiungere i medesimi effetti positivi con l'utilizzo di tecniche e materiali, anche innovativi, ovvero coperture a verde,produce adeguata documentazione e certificazione delle tecnologie e dei materiali che ne attesti l'equivalenza con le citate disposizioni".

Le Tabelle da 1 a 4, estratte dall'Allegato 1, Appendice B al Decreto del 26 giugno 2015, riportano i valori limite di trasmittanza massimi nel caso di interventi che prevedano l'isolamento termico dall'esterno, da rispettare ai fini dell'ammissibilità alle detrazioni del 65%. In caso di interventi di riqualificazione energetica dell'involucro opaco che prevedano l'isolamento termico dall'interno o l'isolamento termico in intercapedine, indipendentemente dall'entità della superficie coinvolta, i valori delle trasmittanze di cui alle Tabelle da 1 a 4 dell'Appendice B, sono invece incrementati del 30%.

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

Tabella 1 - Trasmittanza termica U massima delle strutture opache verticali, verso l'esterno soggette a riqualificazione.

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	0,34	0,32
C	0,34	0,32
D	0,28	0,26
E	0,26	0,24
F	0,24	0,22

Tabella 2 - Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno soggette a riqualificazione

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	0,48	0,42
C	0,42	0,38
D	0,36	0,32
E	0,31	0,29
F	0,30	0,28

Tabella 3 - Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno soggette a riqualificazione

Zona climatica	U (W/m ² K)	
	2015 ⁽¹⁾	2021 ⁽²⁾
A e B	3,20	3,00
C	2,40	2,00
D	2,10	1,80
E	1,90	1,40
F	1,70	1,00

Tabella 4 - Trasmittanza termica U massima delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatizzati soggette a riqualificazione

Calcolo della trasmittanza dello strato colturale

Riguardo alle modalità di calcolo della trasmittanza dello strato colturale, la norma UNI 11235/07 aggiornata nel 2015 “Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde” non fornisce però indicazioni sulle modalità di calcolo della trasmittanza del terreno. Pertanto, il suggerimento del CTI (Comitato Termotecnico Italiano) è quello di utilizzare la classica UNI EN ISO 6946:2018 “Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo” ipotizzando che il terreno sia uno strato facente parte della stratigrafia della struttura (solaio). Per i valori di trasmittanza termica del “sistema tetto verde”, il riferimento normativo si riferisce prioritariamente alla “stratigrafia” che sostiene il “sistema tetto verde”. In generale, il riferimento normativo è la UNI EN 13370:2018 “Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo”.

Conto termico

Il Conto Termico (il cosiddetto Conto Termico 2.0) è un fondo che incentiva **gli interventi mirati a migliorare l’efficienza energetica** e lo sviluppo delle rinnovabili termiche per interventi mirati al miglioramento dell’efficienza energetica di edifici e abitazioni. Il fondo è gestito dal GSE (Gestore Servizi Energetici), che si occupa di stabilire quali sono gli interventi ammessi, chi può accedere agli incentivi e quali sono le modalità di accesso, naturalmente sulla base della normativa vigente decisa dal legislatore. Per quanto riguarda il tetto verde, le regole applicative del D.M. del 16 febbraio 2016, al paragrafo 5.1 “Isolamento termico di superfici opache delimitanti il volume climatizzato (intervento 1.A - art. 4, comma 1, lettera a)” riportano: *l’intervento incentivabile consiste nell’isolamento di coperture, pavimenti/solai e pareti perimetrali di edifici esistenti, parti di edifici esistenti o unità immobiliari esistenti di qualsiasi categoria catastale, dotati di impianto di climatizzazione* (Tabella 5).

[Tabella 5 – Allegato II - DM 16.02.16]			
Tipologia di intervento	Percentuale incentivata della spesa ammissibile (%spesa)	Costo massimo ammissibile (C _{max})	Valore massimo dell'incentivo (I _{max}) [€]
i. Strutture opache orizzontali ¹³ : isolamento coperture			(i+ii+iii) ≤ 400.000
Esterno	40 (*) (**)	200 €/m ²	
Interno	40 (*) (**)	100 €/m ²	
Copertura ventilata	40 (*) (**)	250 €/m ²	
ii. Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti			
Esterno	40 (*) (**)	120 €/m ²	
Interno	40 (*) (**)	100 €/m ²	
iii. Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali			
Esterno	40 (*) (**)	100 €/m ²	
Interno	40 (*) (**)	80 €/m ²	
Parete ventilata	40 (*) (**)	150 €/m ²	

(*) Per interventi realizzati nelle zone climatiche E e F la percentuale incentivata della spesa ammissibile è pari al 50%.

(**) Per interventi che prevedano, oltre all'isolamento termico delle superfici opache, almeno un intervento, a scelta, tra le tipologie 1.C, 2.A, 2.B, 2.C, 2.E, la percentuale incentivata della spesa ammissibile è pari al 55%.

[I totale = 55% delle spese per l'isolamento termico + (a scelta) 55% delle spese per il generatore a condensazione, oppure, + il contributo secondo lo specifico algoritmo per uno degli interventi di categoria 2].

Tabella 5 - Strutture opache: valori necessari per il calcolo dell'incentivo

I soggetti che possono richiedere l'incentivo sono le Amministrazioni Pubbliche direttamente o indirettamente tramite una ESCo, sugli edifici di proprietà della PA. Ai fini dell'accesso agli incentivi del conto termico, nel caso di interventi che prevedano l'isolamento dall'esterno, per ogni tipologia di superficie opaca (copertura, pavimento o parete) è definito un valore limite massimo di trasmittanza, in funzione della zona climatica come specificato nella Tabella 6.

[Tabella 1 – Allegato I – DM 16.02.16]		
Tipologia di intervento	Requisiti tecnici di soglia per la tecnologia	
Strutture opache orizzontali: isolamento coperture	Zona climatica A	≤ 0,27 W/m ² K
	Zona climatica B	≤ 0,27 W/m ² K
	Zona climatica C	≤ 0,27 W/m ² K
	Zona climatica D	≤ 0,22 W/m ² K
	Zona climatica E	≤ 0,20 W/m ² K
	Zona climatica F	≤ 0,19 W/m ² K
Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti	Zona climatica A	≤ 0,43 W/m ² K
	Zona climatica B	≤ 0,40 W/m ² K
	Zona climatica C	≤ 0,30 W/m ² K
	Zona climatica D	≤ 0,28 W/m ² K
	Zona climatica E	≤ 0,25 W/m ² K
	Zona climatica F	≤ 0,23 W/m ² K
Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali	Zona climatica A	≤ 0,38 W/m ² K
	Zona climatica B	≤ 0,38 W/m ² K
	Zona climatica C	≤ 0,30 W/m ² K
	Zona climatica D	≤ 0,26 W/m ² K
	Zona climatica E	≤ 0,23 W/m ² K
	Zona climatica F	≤ 0,22 W/m ² K

Laddove gli interventi prevedano l'isolamento termico dall'interno o l'isolamento termico in intercapedine, i valori di trasmittanza massimi di cui alla Tabella 4 devono essere incrementati del 15%, comunque nel rispetto di quanto previsto dal decreto del 26 giugno 2015 concernente le metodologie di calcolo della prestazione energetica e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici.

Tabella 6 - Valori di trasmittanza riportati dalle regole applicative del GSE

Entrambi gli strumenti di incentivazione sopra riportati, ecobonus e conto termico, si possono riferire non soltanto alla realizzazione coperture verdi orizzontali ma anche alla realizzazione di coperture verdi verticali (verde parietale). Da sottolineare che in entrambi i casi, la riduzione della trasmittanza termica si deve riferire alla stratigrafia, disposta sul lastrico solare o sulle pareti dell'edificio, che sostiene il "sistema verde".

Bonus verde

Il bonus verde consiste in una detrazione Irpef del 36% sulle spese sostenute per i seguenti interventi (LEGGE 27 dicembre 2017, n. 205 e successive proroghe):

Modalità di pagamento	Importo massimo	Detrazione irpef	Detrazione massima	Applicabilità
pagamenti tracciabili (per esempio, bonifico bancario o postale)	5.000 euro per unità immobiliare a uso abitativo	36% delle spese sostenute, l'importo va ripartito in dieci quote annuali di pari importo	max 1.800 euro (36% di 5.000) per immobile	<p>Il limite dei 5.000 euro è calcolato a immobile, non a persona: se un contribuente possiede due abitazioni potrà usufruire due volte del bonus verde;</p> <p>valido anche per interventi eseguiti su parti comuni esterne degli edifici condominiali. In questo caso, ha diritto alla detrazione il singolo condomino nel limite della quota a lui imputabile, a condizione che la stessa sia stata effettivamente versata al condominio entro i termini di presentazione della dichiarazione dei redditi.</p>

Fonte: <https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/aree-tematiche/casa/agevolazioni/bonus-verde>

6 SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DEGLI EDIFICI: CERTIFICAZIONE VOLONTARIA E INDICI DI VALUTAZIONE (a cura di *Patrizia De Rossi, Alessandro Campiotti, Luciano Consorti*)

6.1 Le certificazioni

Negli ultimi anni, diversi paesi hanno cominciato a considerare i cosiddetti “edifici verdi”, ovvero provvisti di sistemi vegetali esterni, nell’ambito delle certificazioni che definiscono gli edifici sotto il profilo sia energetico sia ambientale. I primi schemi di certificazione includono la *Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology-BREEAM* nel Regno Unito nel 1990 (<https://greenwichsrl.it/certificazione-breeam/>) e la *Leadership in Energy and Environmental Design-LEED* negli Stati Uniti nel 1994 (<https://www.certificazioneleed.com/edifici/>). Altri programmi importanti includono il sistema *German Sustainable Building Council-DGNB* (<https://www.teknoring.com/news/efficienza-energetica/dgnb-come-funzione-il-protocollo-di-sostenibilita-tedesco/>) in Germania, il sistema *New Construction, Existing Buildings, and Renovation* - completo di valutazione per l'efficienza dell'ambiente costruito in Giappone- CASBEE (<https://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/certificationE.htm>) e il sistema *Green Star* (<https://new.gbca.org.au/rate/green-star/>) in Australia.

BREEAM e LEED sono indubbiamente le certificazioni più diffuse in materia di sostenibilità, sia per gli edifici esistenti sia per quelli di nuova costruzione. La certificazione risulta spesso in una riduzione (immediatamente) misurabile del consumo idrico ed energetico e in un utilizzo più efficiente dell'edificio, con una conseguente diminuzione dei costi. I protocolli sono accomunati da diversi aspetti, avendo entrambi adottato un sistema di certificazione volontaria e strumenti di valutazione basati su *checklist* di criteri-requisiti ambientali da rispettare obbligatoriamente per accedere alla certificazione e da soddisfare per ottenere punti. Si tratta di strumenti di diffusione di *best practice* che favoriscono e supportano l'innovazione, avendo sempre ben presenti tutti gli aspetti relativi al ciclo di vita dell'edificio (LCA — *Life Cycle Assessment*) e ponendosi obiettivi di riduzione dei costi di gestione e di ottimizzazione dei processi, garantendo allo stesso tempo condizioni di comfort interni elevati.

In funzione del risultato ottenuto l'edificio può accedere a diversi livelli di certificazione, così suddivisi:

-LEED: Certified, Silver, Gold, Platinum.

-BREEAM: Acceptable, Pass, Good, Very Good, Excellent, Outstanding.

6.1.1 BREEAM

La certificazione BREEAM è la più utilizzata nel settore edilizio europeo. La metodologia varia da un Paese all'altro, poiché diversi sono anche le condizioni climatiche e i requisiti legali. È quindi sempre necessaria una versione della certificazione specifica per questo o quel Paese.

Il metodo di certificazione volontaria della sostenibilità BREEAM monitora i parametri sostenibili raggruppandoli in una serie di categorie, che includono i fattori più influenti in termini di progettazione a basso impatto e protezione della biodiversità.

I principali standard BREEAM sono i seguenti:

- New Construction: per nuovi edifici non residenziali
- International New Construction: per nuovi edifici residenziali e non residenziali
- In-Use: per migliorare le prestazioni degli edifici esistenti
- Refurbishment: per interventi di ristrutturazione
- Communities: per progetti di masterplan

Le categorie di riferimento per la certificazione BREEAM sono:

- Energia (monitoraggio dell'energia, emissioni di CO₂, uso di sistemi di trasporto efficienti, ecc. ...)
- Uso del territorio e ecologia (valutazione del sito, impatto sull'ecologia del sito esistente, ecc. ...)
- Acqua (controllo del consumo di acqua, attrezzature efficienti ecc. ...)
- Salute e benessere (relativi al comfort visivo, termico e acustico, qualità dell'aria interna, ecc. ...)
- Inquinamento (monitoraggio dell'impatto dei refrigeranti, inquinamento luminoso notturno, inquinamento acustico, ecc. ...)
- Trasporti (accessibilità dei trasporti pubblici, strutture per ciclisti, ecc. ...)
- Materiali (impatto del ciclo di vita, durata e resilienza, efficienza, ecc. ...)
- Rifiuti (Gestione dei rifiuti di costruzione, ecc. ...)
- Management (pratiche di costruzione responsabili, messa in servizio e consegna, etc...)

- I parametri di valutazione della versione 2014 di BREEAM UK New Construction sono i seguenti: Unclassified (<30%), Pass (>30%), Good (>45%), Very Good (>55%), Excellent (>70%) and Outstanding (>85%).

Il processo di certificazione consiste in due fasi: una valutazione della fase di progettazione, che si traduce in un certificato intermedio e una valutazione successiva alla costruzione, con conseguente rilascio di un certificato finale e un punteggio aggiuntivo.

<https://www.breeam.com/>

<http://www.greenmap.it/it/riferimenti/breeam/>

6.1.2 LEED

Il LEED® è un programma di certificazione volontario che può essere applicato a qualsiasi tipo di edificio (sia commerciale che residenziale) e concerne tutto il ciclo di vita dell'edificio stesso, dalla progettazione alla costruzione. LEED promuove un approccio orientato alla sostenibilità, riconoscendo le prestazioni degli edifici in settori chiave, quali il risparmio energetico ed idrico, la riduzione delle emissioni di CO₂, il miglioramento della qualità ecologica degli interni, i materiali e le risorse impiegati, il progetto e la scelta del sito. Sviluppato dalla U.S. Green Building Council (USGBC), il sistema si basa sull'attribuzione di 'crediti' per ciascun requisito. La somma dei crediti costituisce il livello di certificazione: da certificazione Base a Platino. Pur presente principalmente negli Stati Uniti, va velocemente affermandosi come nuovo standard mondiale per le costruzioni eco-compatibili (viene oggi applicato in 40 paesi diversi). Consente meglio di altri strumenti di esaltare le caratteristiche 'verdi' degli immobili, conferendo loro un significativo valore aggiunto. Consente inoltre un facile confronto tra immobili alternativi, nel mercato.

Iter certificativo

Solo un edificio nel suo complesso può ottenere la certificazione LEED.

Occorre distinguere se si tratta di:

- Un nuovo immobile (commerciale, condominio, per uffici, ricreativo, produttivo).
- Il restauro di un edificio esistente. Un intervento strutturale.
- Scuole, negozi, ospedali.

- Edilizia residenziale. Studio urbanistico.

Successivamente, occorre mappare le caratteristiche del progetto rispetto ai crediti previsti dai diversi standard; registrare il progetto presso il *Green Building Certification Institute* e sottoporre formale richiesta all'ente, fornendo adeguata documentazione relativa alle varie fasi di progettazione e costruzione. Seguiranno l'elaborazione della richiesta da parte dell'ente e la Certificazione, successiva al completamento dell'opera.

Per “**mappatura LEED**”, si intende l'analisi delle caratteristiche dei singoli prodotti o materiali in funzione dei crediti LEED di uno specifico protocollo. Infatti, non esiste una “certificazione LEED di prodotto”, ma di “contributo” ai possibili crediti LEED. Questa “certificazione” deve essere eseguita da tecnico abilitato (LEED AP), il quale individuerà quanto il prodotto/materiale può contribuire al punteggio finale di un edificio LEED. La certificazione LEED viene rilasciata all'edificio, non al singolo prodotto e per questo non si può parlare di “certificazione” di prodotto; ma il punteggio finale attribuito all'edificio, dipende anche dalla corretta selezione ed impiego di prodotti/materiali conformi (fonte: <https://www.certificazioneleed.com/>)

6.1.3 GREEN BUILDING COUNCIL (GBC) ITALIA

Green Building Council (GBC) Italia, è un'associazione senza scopo di lucro nata nel 2008 per diffondere nel nostro Paese la certificazione volontaria di edifici sostenibili LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). GBC Italia fa parte del World GBC, una rete di GBC nazionali presenti in più di 70 paesi, che rappresenta la più grande organizzazione internazionale al mondo attiva per il mercato delle costruzioni sostenibili. Aderiscono all'iniziativa enti pubblici, realtà industriali e del mondo della ricerca. GBC Italia promuove un processo di trasformazione del mercato edile italiano attraverso la promozione del sistema di certificazione di terza parte e dei propri protocolli di certificazione (i sistemi GBC) espressamente sviluppati per le specificità del mercato italiano, i cui parametri stabiliscono precisi criteri di progettazione e realizzazione di edifici salubri, energeticamente efficienti e a impatto ambientale contenuto.

La *mission* è:

- favorire e accelerare la diffusione di una cultura dell'edilizia sostenibile, guidando la trasformazione del mercato;

- sensibilizzare l'opinione pubblica e le istituzioni sull'impatto che le modalità di progettazione e costruzione degli edifici hanno sulla qualità della vita dei cittadini;
- fornire parametri di riferimento chiari agli operatori del settore;
- incentivare il confronto tra gli operatori del settore creando una community dell'edilizia sostenibile.

FONTE: <https://gbcitalia.org/>

6.2 Indici per valutare la riduzione dell'impatto edilizio

6.2.1 PROTOCOLLO ITACA

Il Protocollo ITACA - Istituto per l'innovazione e trasparenza degli appalti e la compatibilità ambientale - Associazione nazionale delle Regioni e delle Province autonome (https://www.itaca.org/valutazione_sostenibilita.asp) è uno strumento di valutazione che supporta le politiche regionali in materia di edilizia, per la promozione della sostenibilità ambientale nel settore delle costruzioni e permette di verificare le prestazioni energetiche di un edificio e il suo impatto sull'ambiente e sulla salute dell'uomo in termini di bioedilizia.

6.2.2 INDICE R.I.E.

Il R.I.E. (Riduzione dell'Impatto Edilizio), è un indice numerico di qualità ambientale che indica l'effetto dell'intervento edilizio rispetto alla permeabilità del suolo e del verde, sviluppato dal Comune di Bolzano nel 2004. L'indice R.I.E. si applica per le nuove costruzioni e le ristrutturazioni di edifici esistenti e per gli interventi di qualsiasi tipo su terreni e/o edifici esistenti che interessano le superfici esterne esposte alle precipitazioni (terrazze, strutture esterne, cortili, spazi verdi, aree con pavimentazioni).

Sia in Italia che all'estero, nell'ultimo ventennio, si è assistito alla formazione di un interesse crescente su questo tema. Indicazioni interessanti sono state sviluppate nei regolamenti edilizi delle città maggiormente sensibili alla risoluzione di problematiche energetiche e microclimatiche, sia attraverso l'intervento a scala urbana che a livello del singolo edificio (*Fonte ARTEC/IUAV Gli strumenti normativi inerenti l'uso del verde in copertura e in facciata*)

L'ESPERIENZA DELLA CITTA' DI BOLZANO (ITALIA)

ALGORITMO DI CALCOLO

L'algoritmo R.I.E. si presenta, nella forma completa, come segue:

$$= \frac{\sum_{i=1}^n S_{v_i} \frac{1}{\psi} + (Se)}{\sum_{i=1}^n S_{v_i} + \sum_{j=1}^m S_{i_j} \psi}$$

Dove:

R.I.E. = *Indice di riduzione dell'impatto edilizio*

S_{v_i} = *i-esima superficie permeabile, impermeabile o sigillata trattata a verde*

S_{i_j} = *j-esima superficie permeabile, impermeabile o sigillata non trattata a verde*

ψ = *coefficiente di deflusso*

Se = *Superfici equivalenti alberature*

Per indicazioni sulla procedura:

<https://opencity.comune.bolzano.it/Documenti-e-dati/Documenti-tecnici-di-supporto/5.3.2->

R.I.E.-Algoritmo

Per indicazioni sull'algoritmo di calcolo:

<https://www.comune.bolzano.it/rie/?encoding=B&lang=it>

http://www.comune.bolzano.it/urb_context02.jsp?area=74&ID_LINK=512&page=8

Per indicazioni sui coefficienti di superficie:

http://www.comune.bolzano.it/UploadDocs/3280_Schede_RIE_Ita.pdf

**Parte II - ECOSISTEMI VEGETALI: BIODIVERSITÀ E MITIGAZIONE
AMBIENTALE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

7 II VERDE PENSILE E LA RIGENERAZIONE ECOLOGICA PER LA SALVAGUARDIA DELLA BIODIVERSITÀ IN AMBIENTE URBANO (a cura di *Antonella Marone*)

L'espansione delle aree urbane ha conseguenze devastanti sugli ambienti naturali: il consumo di suolo e la perdita della vegetazione naturalmente presente che ne deriva, provocano una parcellizzazione territoriale che ha come effetti la frammentazione dell'ambiente e la diminuzione degli habitat per la fauna. Provocando una drastica diminuzione della biodiversità, il processo di urbanizzazione riduce la resilienza ambientale nonché la capacità di autoregolazione degli ecosistemi. Questo oltre a ridurre la capacità dei ecosistemi di agire come regolatori del clima ne diminuisce la possibilità di agire come piattaforme multifunzionale per il benessere umano (Di Leonardo et al, 2020). Le città restituiscono all'ambiente calore e inquinamento e, basando la loro crescita ed espansione sull'uso indiscriminato di risorse, ne alterano i cicli biogeochimici (Fischer e Lindenmayer, 2007). Odum (1983) le ha paragonate a degli organismi eterotrofi i quali, non solo consumano le risorse immediatamente disponibili entro i propri confini fisici, ma hanno un effetto pervasivo su vaste aree, legate alla produzione di beni e servizi commerciabili, necessari al loro sostentamento e sviluppo (Catalano et al, 2016). Inoltre, nelle aree urbane, i cambiamenti dovuti alle diverse proprietà termiche dei materiali impiegati, rispetto agli elementi naturali e, la mancanza di evapotraspirazione, dovuta all'assenza di vegetazione, causano l'aumento della temperatura che determina un microclima più caldo all'interno delle aree urbane cittadine, rispetto alle circostanti zone periferiche e rurali, fenomeno noto come "effetto isola di calore urbano"(Di Leonardo et al, 2020).

Da tutto questo nasce la sempre più pressante esigenza di "ri-generare", "ri-naturalizzare" e cioè "re-inverdire" le città. La reintroduzione della vegetazione in ambiente urbano oltre ad apportare benefici ecologici, come la mitigazione dei cambiamenti climatici e la protezione della biodiversità, offre l'opportunità di ricreare ambienti di vita più naturali che sono anche più salubri e resilienti.

In questo contesto, le infrastrutture verdi costituiscono un terreno fertile per la sperimentazione ed interazione sinergica tra ecologia e pianificazione (Catalano et al, 2016). Oltretutto, tutte le infrastrutture verdi, come giardini urbani o aree naturali, oltre a

costituire una parte importante del paesaggio urbano, garantiscono anche un effetto di raffrescamento degli agglomerati urbani.

Le moderne città, cariche di edifici ed infrastrutture, possono essere raffigurate come delle immense colate di cemento dove la mancanza di suolo naturale pone la necessità di trovare, o letteralmente di “re-inventare” nuovi spazi verdi. Dal momento che le superfici esterne degli edifici (tetti e pareti) offrono una grande quantità di spazio (la superficie coperta dai tetti può rappresentare fino al 32% della superficie orizzontale (2D) della città (Ferguson, 2005), mentre quella delle facciate può corrispondere doppio dell'impronta al suolo degli edifici (Pérez et al., 2011)), questo spazio può essere utilizzato per la reintroduzione della vegetazione in ambiente urbano. Si parla quindi di **verde pensile** ovvero la realizzazione di strati vegetativi su superfici che non sono in contatto con il suolo naturale. Inverdire tetti e pareti rappresenta, attualmente, uno dei modi più innovativi per fornire una serie di servizi ecosistemici in ambito urbano (Di Leonardo et al, 2020). Senza contare il fatto che, il verde pensile, fornisce un isolamento termico rappresentando effettivamente un metodo sostenibile applicabile per rendere gli edifici energeticamente più efficienti e le città più vivibili (Di Leonardo et al, 2020). Esso, può diventare quindi un elemento indispensabile non solo per uno sviluppo urbano sostenibile ma per una pianificazione integrata del paesaggio che preveda la connessione tra gli ecosistemi a diversi livelli e scale territoriali (Catalano et al, 2016).

Di seguito, vengono esaminati i benefici ecologici ed ambientali dell'utilizzo del verde pensile nelle città.

7.1 Ripristino della connettività ecologica

L'espansione delle aree urbane provoca la parcellizzazione territoriale degli ambienti naturali che ha come effetto la diminuzione dell'habitat per la fauna nonché la frammentazione dell'ambiente. Per frammentazione ambientale si intende quel processo dinamico di origine antropica attraverso il quale un'area naturale subisce una suddivisione in frammenti più o meno disgiunti e progressivamente più piccoli ed isolate (Battisti C., 2004).

L'alternarsi di tipologie ecosistemiche, di tipo naturale, seminaturale, artificiale, differenti strutturalmente e funzionalmente che ne comporta, provoca conseguenze su diversi processi e a tutti i livelli di organizzazione ecologica (Debinski e Holt, 2000; Farina, 2001). Tali conseguenze si sovrappongono a quelle di altri disturbi antropogenici provocando effetti cumulativi spesso irreversibili su popolazioni animali e vegetali (Battisti C., 2004). La frammentazione ambientale è un processo in fase di accelerazione esponenziale a livello globale, ed è pertanto riconosciuta come una tra le principali minacce globali alla conservazione della diversità biologica.

Nell'ambito degli ambienti antropizzati, i parchi e le aree naturalistiche urbani e periurbani, si trovano ad essere di fatto vere e proprie isole di biodiversità, che, se da una parte garantiscono salvaguardia del "capitale naturale", dall'altra sono entità fragili a rischio di impoverimento. In quest'ottica, diventa fondamentale ripristinare la connettività ecologica, cioè il mantenimento di una continuità fisico-territoriale ed ecologico-funzionale fra gli ambienti naturali, attraverso un paesaggio sempre più antropizzato. Il ripristino della connettività ecologica in ambiente urbano rappresenta una possibile strategia che si pone come obiettivo la mitigazione degli effetti della frammentazione su popolazioni e comunità (Bennett, 1999).

Una possibile soluzione è quella di integrare l'ambiente urbano e periurbano con parchi e le aree naturalistiche limitrofi. Seguendo questo approccio, le aree urbane, possono essere integrate in un sistema di reti ecologiche, fungendo da sistemi di connessione tra i frammenti rimanenti che permettono la mobilità della fauna tra le varie aree di interesse naturalistico. In questo contesto, le infrastrutture verdi costituiscono opportunità per lo sviluppo sostenibile e l'implementazione di approcci ecosistemici alla pianificazione territoriale.

Tra queste, i tetti verdi, per lo più progettati con terreno poco profondo e vegetazione resistente allo stress, sono stati utilizzati principalmente per proprietà come l'efficienza energetica degli edifici ed il drenaggio, ma poco si è considerato in relazione al loro valore ecologico.

In uno studio del 2014 effettuato su tetti verdi nella città di Zurigo (Braaker et al. 2014) è stato analizzato il valore ecologico dei tetti verdi, valutando l'importanza relativa dell'ambiente locale, del microclima e della connettività per spiegare la composizione delle specie. Campionando gli artropodi (coleotteri, ragni e api) sui tetti verdi ed in aree verdi simili a livello del suolo, è stata confrontata la composizione della comunità tra i siti e analizzata

l'importanza della connettività per la creazione di comunità vicine con una composizione di specie simile. Questi autori hanno scoperto che il microclima per le specie mobili non era importante quanto la connettività che ne ha modellato i movimenti. Inoltre non è stato rilevato alcun effetto delle dimensioni del tetto verde: i tetti verdi piccoli hanno lo stesso effetto di connettività di quelli grandi. Questo documento è il primo del suo genere a dimostrare che i tetti verdi possono aumentare la biodiversità degli artropodi urbani attraverso la connettività.

I tetti verdi, in particolare quelli di tipo estensivo (capitolo - La legislazione sul verde: indagine a livello UE e Nazionale), assumono quindi la funzione di **stepping stones**, cioè frammenti di habitat ottimale o subottimale che possono fungere da aree di sosta e rifugio per determinate specie, altamente vagili. Essendo collocati in una matrice paesistica antropizzata, tali aree sono utili al mantenimento della connettività per specie abili ad effettuare movimenti a medio/breve raggio attraverso ambienti non idonei ma anche per specie che compiono spostamenti a lungo raggio (Battisti C., 2004).

Le pareti verdi teoricamente hanno un potenziale maggiore rispetto ai tetti verdi considerando che nei centri urbani l'entità dell'inverdimento delle facciate può essere il doppio dell'impronta al suolo degli edifici (Köhler 2008; Pérez et al., 2011). La maggior parte degli studi, però, è stata effettuata sui tetti, pochi sono gli studi disponibili sulle pareti e facciate verdi, quindi, ci si riferisce principalmente alle superfici orizzontali. Ciononostante si può ipotizzare gli stessi effetti sulla connettività e, quindi, la biodiversità e la creazione degli habitat delle pareti, specialmente se ci si riferisce a pareti viventi o giardini verticali.

Tali sistemi, infatti, non si basano su una gamma limitata di flora rampicante nella come le facciate verdi, perciò, consentono di piantare una gamma molto più ampia di specie sulla superficie dei muri, in modo da fornire funzioni specifiche che potrebbero mancare nell'ambiente urbano come ad esempio erbe (come il timo) che attraggano gli impollinatori (Köhler 2008).

Inoltre, il potenziale totale dei sistemi d'inverdimento degli edifici può essere incrementato esponenzialmente se le pareti verdi vengono usate in combinazione con i tetti, cioè favorendo la connettività tridimensionale attraverso i paesaggi urbani, ad esempio consentendo alle specie di invertebrati di accedere ai tetti attraverso il fogliame della superficie della parete (Francis e Lorimer, 2011).

Tetti e pareti verdi potrebbero pertanto assumere la funzione di corridoi ecologici (termine “corridoio” nel senso di aree connettive funzionali) sospesi di collegamento tra aree a valenza naturalistica, ad integrazione dei corridoi a terra già esistenti. La diffusione di reticoli verdi sospesi in aree ad alta urbanizzazione, faciliterebbe quindi il collegamento tra aree ad alta valenza naturale, riducendo il carico antropico sull’ambiente. Data l’abbondanza di superfici (tetti e pareti) disponibili in ambienti urbani, l’utilizzo del verde pensile in maniera estensiva potrebbe garantire la creazione di **corridoi diffusi** cioè formati da un mosaico di elementi differenti senza una direzione preferenziale.

L’utilizzo di verde parietale e di tetti verdi in ambito urbano e periurbano in maniera sistematica e diffusa, con particolare attenzione all’impiego di specie vegetali autoctone, con l’obiettivo di ripristinare una naturalità/connettività diffusa a scala di paesaggio, permetterebbe quindi la creazione di una rete ecologica tra aree a più alta biodiversità volta a preservare il capitale naturale e a favorirne i relativi servizi ecosistemici.

Si potrebbe inoltre ipotizzarne l’utilizzo per ottenere un ampliamento delle aree di contorno alle zone parco con la creazione di aree “peri-naturale” a servizio di parchi e riserve naturali per rafforzarne la protezione dai fenomeni di antropizzazione (una “fascia di rispetto ecologica”).

Il verde pensile, in tal modo, può diventare uno strumento delle strategie di preservazione e valorizzazione della biodiversità in ambienti sensibilmente antropizzati e di diffusione di verde urbano, diventando parte integrante dei corridoi e reti ecologiche, in qualità di stepping stones urbane, per determinate biocenosi di riferimento.

Di seguito vengono analizzati i vantaggi ecologici, basati sul principio di connettività, che possono essere raggiunti dalla creazione di un network di corridoi verdi sospesi in area urbana.

7.2 Riduzione/compensazione della perdita degli habitat

La vegetazione propria delle città moderne tende ad essere composta da sporadiche chiazze rimanenti di habitat naturale originale (pre-urbanizzazione) e sezioni colonizzate spontaneamente come lotti vacanti o fessure nella pavimentazione urbana. Per il resto le città sono dominate dall’ambiente edificato che ha sostituito l’ambiente naturale originario

con un'alta densità di superfici dure. Questa caratteristica dell'ambiente costruito che, porta ad una riduzione e parcellizzazione degli habitat naturali originari, può avere numerosi impatti a livello ecologico (Lundholm Jeremy T. 2006). Ad esempio la diversità delle specie tipicamente diminuisce muovendosi dall'esterno verso il centro città (Alberti et al., 2003), dove dominano le superfici dure.

A causa del suolo, poco profondo o inesistente, gli habitats urbani sono spesso troppo secchi per sostenere una vegetazione consistente, oppure potrebbero risultare eccessivamente umidi a causa del drenaggio inadeguato dovuto alle superfici dure (Spirn, 1984). Le aree dominate dalle costruzioni infliggono, quindi, elevate pressioni selettive e condizioni difficili che, condizionano la colonizzazione da parte degli organismi agendo come un filtro, che, impedisce l'instaurarsi di moltissime specie non adatte a questi particolari habitats (Lundholm, 2006). Gli edifici convenzionali, infatti, funzionano da habitat unicamente per particolari specie che possono spontaneamente colonizzare le loro superfici. Queste specie possono avere svariate origini ma spesso sono caratteristiche di habitats naturali rocciosi e dunali, o di altre aree aperte dove le condizioni difficili prevengono la formazione di una copertura forestale (Woodell, 1979). Questa perdita di habitat naturale ha chiaramente forti ripercussioni sulla fauna limitando il pool di colonizzatori disponibili a quelli che già possiedono adattamenti a condizioni simili in natura. Ad esempio, fa sì che le comunità di uccelli locali diventino dominate da abitanti urbani e specie "utilizzatrici" urbane e riduce la quantità di habitat disponibile per gli uccelli migratori e nidificanti (Partridge DR, Clark JA 2018).

I tetti verdi possono aumentare lo spazio verde in paesaggi urbani, potenzialmente fornendo nuovi habitat per la fauna selvatica.

Uno studio recente (Partridge DR, Clark JA 2018), effettuato a New York city, in cui sono stati analizzati gli uccelli e gli artropodi durante la primavera (stagione migratoria) e l'estate (stagione riproduttiva), sia su tetti verdi che su limitrofi tetti convenzionali comparabili, ha evidenziato che sia gli uccelli che gli artropodi erano più abbondanti e diversificati sui tetti verdi rispetto a quelli convenzionali. Mostrando che gli uccelli selvatici usano i tetti verdi come habitat di sosta durante la migrazione e come habitat per il foraggiamento durante la stagione riproduttiva, Partridge e Clark (2018) hanno dimostrato come la creazione di tetti verdi nei paesaggi urbani aumenta la quantità di habitat disponibile per gli uccelli migratori

e nidificanti e può, quindi, parzialmente mitigare la perdita di habitat dovuta alla crescente urbanizzazione.

In un altro studio effettuato da Yalcinalp et al (2017), sono stati esaminati 37 tetti di dimensioni variabili (area superficiale in un range tra 2,22 e 234,6 m²), costruiti da più di 35 anni, in una parte urbana della città di Trabzon, in Turchia, con particolare attenzione all'effetto habitat. Questi autori hanno osservato un totale di 51 differenti specie di piante che crescono su questi tetti, le quali, erano associate a cinque diverse tipologie di vegetazione e quindi di habitat. Dimostrando, così, che la vegetazione dei tetti verdi costituisce un importante supporto per l'ecologia delle aree urbane. Lo studio inoltre ha permesso di stabilire che la superficie del tetto, le dimensioni, la ricchezza delle specie, le dimensioni della parte illuminata dal sole, la durata giornaliera della luce solare e la profondità del substrato erano gli attributi degli habitat più rilevanti per la copertura della vegetazione sui tetti nell'area di ricerca (Yalcinalp et al 2017).

Nella creazione di tetti verdi artificiali, l'industria emergente del verde pensile, utilizza un insieme di piante collaudate che possono tollerare le dure condizioni dei tetti. Queste tendono ad essere piante grasse appartenenti alla famiglia delle Crassulaceae, tra cui dominano in genere le specie del genere *Sedum*.

Una tendenza internazionale attuale nel verde pensile è quella di incorporare piante autoctone regionali appropriate nel tetto verde (vedi ad esempio Monterusso et al., 2005). Alcune funzioni dei tetti verdi, come quella di fornire habitats per la fauna selvatica, sono, infatti, potenziate dall'uso di specie native. Per esempio, gli insetti autoctoni possono essere più attratti dalla vegetazione autoctona poiché essa fornisce una fonte di cibo o di polline più idonea a soddisfare le loro esigenze (Lundholm Jeremy T. 2006).

In realtà, sebbene i tetti verdi siano nati per contribuire alla sostenibilità, sia dal punto di vista economico che ecologico, al giorno d'oggi, essi sono in parte divenuti uno strumento di "public relations" e propaganda per molte aziende, centri commerciali e appaltatori. Ciò fa sì che piuttosto che rischiare l'insuccesso dell'inverdimento si opti, a volte, per l'utilizzo di specie di piante altamente resistenti e più economiche nei progetti di impianto. Questa pratica potrebbe, a scapito dei benefici generalmente apportati dal verde pensile, causare alcuni problemi ecologici, come l'inquinamento genetico, se si utilizzano specie invasive o

esotiche solo perché possono sopravvivere nelle difficili condizioni ecologiche dei tetti (Yalcinalp et al 2017).

Yalcinalp et al (2017) hanno suggerito l'imitazione dei tetti a vegetazione spontanea come metodo per creare tetti verdi più sostenibili per le aree urbane. Gli stress a cui la vegetazione pensile è esposta, come l'eccessiva umidità, la grave siccità, le alte temperature, le intensità luminose elevate ed i venti forti aumentano il rischio di essiccazione e danni fisici alla vegetazione e al substrato (Dunnett, N.P. e Kingsbury, N. 2004). Poiché le specie vegetali che colonizzano e crescono spontaneamente sui tetti hanno già gli adattamenti che gli consentono di sopravvivere in queste condizioni, queste possono essere facilmente utilizzate per creare soluzioni di tetti verdi estensivi sostenibili (non solo dal punto di vista economico) che richiedono meno manutenzione (Yalcinalp et al 2017). Inoltre, le comunità dei tetti verdi sono dinamiche e quindi, con il tempo, è probabile che la vegetazione cambi rispetto alla composizione originale, mentre la vegetazione dei tetti verdi naturali è già stabile o parzialmente stabile come risultato del processo di successione dinamico (Köhler 2006).

Si rimanda al capitolo "Quali piante per un tetto verde mediterraneo? i suggerimenti della ricerca" per la trattazione tecnica dettagliata sulla scelta delle specie vegetali da adoperare nei sistemi d'inverdimento verticali.

Con l'obiettivo di fornire habitats diversificati per la fauna selvatica, secondo le linee guida ISPRA (2012), la qualità ecologica di una copertura verde deve essere incrementata ricorrendo ad una modellazione morfologica superficiale utilizzando diversi spessori di substrato. La modellazione in rilievi permette la costruzione di nicchie ecologiche differenziate, inoltre il maggior spessore di substrato aumenta localmente la disponibilità idrica consentendo lo sviluppo di una vegetazione più articolata (ISPRA 2012).

Alcune ricerche incentrate sullo studio del potenziale di compensazione ecologica dei tetti verdi effettuati a Londra (Kadas 2002 e Jones 2002) hanno, infatti, dimostrato che tetti verdi ben progettati possono fornire habitats per specie rare e minacciate di estinzione.

Gli studi sono stati condotti su tetti verdi strutturati con spessore di substrato variabile, in modo da creare differenti condizioni di habitat, allo scopo di ottenere il massimo beneficio per la biodiversità regionale. La colonizzazione della fauna è stata monitorata e, confrontata, con quella di tetti verdi non strutturati. Come risultato, è stato rilevato che il numero di specie

presenti tendeva ad aumentare lungo un periodo di tre anni sui tetti strutturati, mentre rimaneva costante sui tetti non strutturati, anche se il periodo di osservazione veniva esteso a cinque anni. Con simili ricerche è stato dimostrato che habitats simili a quelli naturali possono essere ricreati sui tetti come elementi della landscape: si possono costruire micro-habitat per gli invertebrati compensativi di habitats naturali quali le sponde dei fiumi, con rocce e detriti rocciosi, o gli habitat di alta montagna e di praterie secche. È inoltre possibile creare praterie umide e habitat di brughiera o di palude sia dove il drenaggio è limitato ed è presente un appropriato ammontare di precipitazioni annuali che dove il substrato fornisce adeguata ritenzione idrica (Brenneisen 2006). Questo è stato dimostrato sia in condizioni climatiche secche, come per esempio Basilea (L'area di Basilea fa parte del mosaico di regioni caldo-secche dell'Europa centrale e ne ospita la flora e la fauna tipiche) che più umide, come ad esempio Zurigo (Brenneisen 2006).

7.3 Aumento della biodiversità

Oltre ai noti impatti sugli habitat naturali degli ambienti antropizzati (i.e. riduzione e frammentazione), come già discusso nel paragrafo precedente, è da evidenziare il venirsi a creare di nuovi habitat, specialmente avvicinandosi ai centri urbani, dove l'ambiente edificato domina il paesaggio (Collins et al., 2000). Le città, caratterizzate dalla prevalenza di superfici dure, sono, pertanto, dominate da specie vegetali provenienti da habitat rocciosi che hanno adattamenti come la tolleranza alla siccità, la dormienza per prevenirne l'esposizione, o, in generale, che consentono loro di sopravvivere in condizioni così difficili (Lundholm 2006). Un caso particolare è quello delle piante come *Cymbalaria muralis* i cui fiori si orientano lontano dalla parete/roccia, presumibilmente per attirare gli impollinatori, ma i cui peduncoli dei frutti mostrano fototropismo negativo e promuovono la crescita verso le crepe nella superficie della roccia, e, quindi, verso micro-siti adatti per la germinazione, piantando, in questo modo, i propri semi d sola (Lundholm 2006).

Ciò suggerisce che lo sviluppo urbano non è semplicemente un processo di distruzione di habitat naturali ma, piuttosto, un processo di sostituzione dell'originale habitat con quelli che possono essere funzionalmente e strutturalmente analoghi agli habitat degli affioramenti rocciosi (ipotesi della scogliera urbana) (Larson et al., 2004). Questa idea è supportata dal lavoro di Lundholm e Marlin (2006) che mostra come specie vegetali che hanno colonizzato spontaneamente habitat urbani, compresi marciapiedi, muri, tetti e prati, siano

sproporzionatamente originarie di habitat rocciosi (Lundholm e Marlin, 2006). Altri habitat che contribuiscono alle specie urbane includono zone ripariali e rive dei laghi (Wittig, 2004), così come dune, spiagge rocciose e praterie (Rodwell, 1992, 2000).

Inoltre, le aree antropizzate ed in particolar modo le città, offrono opportunità di adattamento ambientale a migliaia di esseri viventi, vegetali ed animali, provenienti da tutte le parti del mondo, di cui l'essere umano è veicolo di dispersione più o meno consapevole (i.e. specie antropocore) (Catalano et al, 2016).

Tale dominanza di specie non autoctone nelle aree urbane ha fatto in modo che si negasse il valore ecologico di queste aree (Kowarik, 1990).

Questa linea di pensiero, però si sta riconsiderando e, un crescente numero di ricercatori ritiene, al contrario, che le città potrebbero partecipare attivamente, se progettate e gestite opportunamente, alle strategie di conservazione della biodiversità e dei servizi ecosistemici (Catalano et al, 2016).

Frammenti di paesaggio come le infrastrutture verdi, le linee ferroviarie, le aree industriali dismesse e le coperture verdi non fruibili assumono il ruolo di rifugio all'interno del tessuto antropizzato (Clement 2005). Infatti, è stato dimostrato che le infrastrutture verdi sono sistemi sostenibili a lungo termine che preservano la biodiversità (Lundholm 2006; Francis e Lorimer, 2011). Vari studi hanno dimostrato l'impatto positivo dei tetti verdi per aumentare la biodiversità e migliorare gli habitat urbani (Braaker et al. 2014; Brenneisen, 2006; Francis e Lorimer, 2011, Kadas 2002 e Jones 2002; Partridge e Clark 2018).

In uno studio del 2014 effettuato su tetti verdi nella città di Zurigo (Braaker et al. 2014) è stato analizzato il valore ecologico dei tetti verdi, campionando gli artropodi (coleotteri, ragni e api) sui tetti verdi ed in aree verdi simili a livello del suolo. Una scoperta chiave è stata che i tetti e le aree terrestri avevano comunità di artropodi sostanzialmente diverse per la maggior parte dei gruppi campionati. Ciò significa che i tetti verdi aumentano la biodiversità totale fornendo un habitat distinto che attira gli artropodi dall'esterno delle aree urbane (Braaker et al. 2014).

Partridge e Clark (2018) analizzando gli uccelli e gli artropodi sui tetti nella città di New York hanno dimostrato che gli uccelli selvatici usano i tetti verdi come habitat di sosta durante la migrazione e come habitat per il foraggiamento durante la stagione riproduttiva.

Mentre, 51 differenti specie di piante, associate a diverse tipologie di vegetazione, sono state identificate sui tetti verdi a vegetazione spontanea di un'area urbana della città di Trabzon, in Turchia (Yalcinalp et al 2017).

Dunnett et al. (2008) hanno osservato 35 specie colonizzatrici in un singolo tetto verde sperimentale a Sheffield (Regno Unito). Sia la maggior abbondanza che diversità di specie sono state osservate nelle sezioni del tetto con profondità di substrato di 10 cm.

È interessante notare che sono state riscontrate una vasta gamma di forme di crescita da essenze annuali e perenni, fino ad erbe, arbusti o alberi. Sebbene sia improbabile che le piante con morfologie e requisiti di risorse più grandi, come gli alberi, si stabiliscano o sopravvivano per lunghi periodi (Emilsson, 2008), la presenza di un'ampia gamma di differenti tipologie funzionali significa che la potenziale biodiversità spontanea dei tetti urbani può essere piuttosto alta, se l'habitat del tetto è appropriatamente progettato (Francis e Lorimer, 2011).

Le città offrono, inoltre, una maggiore eterogeneità ecologica rispetto agli habitat circostanti e, ospitano, talvolta, anche specie di interesse conservazionistico (Kowarik, 2011).

Alcune ricerche incentrate sullo studio del potenziale di compensazione ecologica dei tetti verdi effettuate a Londra (Kadas 2002 e Jones 2002) hanno, infatti, dimostrato che tetti verdi ben progettati possono fornire habitat per specie rare e minacciate di estinzione.

Nella città di Basilea, una fitta combinazione di microhabitat è stata identificata sui tetti che mostravano maggiore diversità, i quali, ospitavano 79 diverse specie di coleotteri e 40 specie di ragni. Tra queste, tredici specie di coleotteri e sette specie di ragni sono state classificate come minacciate d'estinzione (Brenneisen, 2006).

Kadas (2007), si concentra sullo studio di ragni, coleotteri e imenotteri aculeati su tetti verdi di Londra. I suoi risultati mostrarono che almeno il 10% di tutte le specie osservate erano interessanti dal punto di vista faunistico. Queste specie erano state designate rare o scarse a livello nazionale, o avevano un raggio di distribuzione limitato. Sugerendo, di conseguenza, che ogni habitat aggiuntivo fornito dai tetti verdi per queste specie è vitale per la loro sopravvivenza a lungo termine (Kadas 2007).

Con un'ottica di conservazione della biodiversità, le linee guida sul Verde Pensile redatte dall'ISPRA definiscono che le opere dovrebbero essere progettate e realizzate in modo da favorire la diversità di specie floristiche e faunistiche che potranno risiedere, o frequentare, il sito in cui l'intervento viene realizzato (ISPRA 2012).

L'uso delle specie autoctone che possono tollerare condizioni difficili è raccomandato in qualsiasi progetto di inverdimento verticale, poiché ha come risultato l'instaurarsi di una maggiore biodiversità che, oltre ad avere elevato valore ecologico, risulta esteticamente piacevole e possiede un grande valore educativo nell'ambiente edificato, il quale, invece, tipicamente è caratterizzato da una scarsa biodiversità (McKinney, 2002).

Nella realizzazione pratica di progetti d'inverdimento degli edifici però, si incontrano spesso grandi difficoltà a reperire sementi delle specie autoctone a meno che queste ultime non siano d'interesse commerciale, cosa che capita molto di rado. In un'ottica di utilizzo del verde pensile come strumento per la salvaguardia della biodiversità si dovrebbe, quindi, prevedere a monte la creazione di "nursery" per sementi autoctone spontanee e di oasi di riproduzione di queste piante, in modo da poter fornire una sorgente di approvvigionamento per tutti i progetti futuri.

Per quanto riguarda la fauna, invece, è da sottolineare che, probabilmente a causa delle dimensioni limitate, gli habitats forniti dai tetti verdi, favoriscono principalmente organismi di taglia limitata, che sono in grado di disperdersi facilmente e che, o hanno un basso fabbisogno di risorse, il che significa che possono completare il loro ciclo di vita sul tetto, o hanno requisiti di risorse più generali, il che significa che possono utilizzare il tetto come parte di una gamma più ampia di habitat (come ad esempio api e vespe) (Francis e Lorimer, 2011). Gli organismi più grandi hanno meno probabilità di nidificare o riprodursi sui tetti inverditi, sebbene possano utilizzare l'habitat temporaneamente, per esempio durante il foraggiamento (Baumann, 2006). Ad eccezione di rari casi in cui è stato osservato che i tetti verdi ospitavano specie di uccelli che sono rare nell'ambiente urbano, come nel caso del piccolo piviere (*Charadrius dubius*) e della pavoncella settentrionale (*Vanellus vanellus*) in Svizzera o, quello dei codirossi neri (*Phoenicurus ochruros*) nel Regno Unito (Grant, 2006). Le specie che non si disperdono facilmente o non sono vagili, hanno meno probabilità di trarre vantaggio dai tetti viventi a meno che non siano deliberatamente introdotte (Francis e Lorimer, 2011). Ad esempio, i lombrichi generalmente non sono presenti tra la fauna del suolo dei tetti verdi in quanto essi non sono in grado di colonizzarlo naturalmente e la maggior parte dei substrati è troppo poco profonda per ospitarli (sono necessari spessori di substrato di almeno 12 cm) con il risultato che altri organismi del suolo, come ad esempio i Collemboli, diventano più abbondanti (Schrader e Böning, 2006).

Brenneisen 2006, evidenzia l'importanza di utilizzare suolo naturale invece dei substrati sintetici appositamente disegnati per aumentare conservazione della biodiversità. L'utilizzo di suolo naturale locale, infatti, oltre a permettere un migliore adattamento della vegetazione e della fauna autoctone, potrebbe garantire un ulteriore apporto di sementi e micro-fauna.

La forza trainante chiave nella selezione delle piante per la realizzazione di tetti verdi è stata, in passato, quella di trovare piante che possono sopravvivere e proliferare in terreni molto poco profondi. Le attuali progettazioni spesso dispongono policolture di specie selezionate individualmente, senza però seguire un studio specifico riguardo il ruolo della diversità delle specie vegetali di per sé sul funzionamento di tetti verdi (Lundholm, 2006).

Le ricerche sulle comunità vegetali hanno identificato che potenzialmente un più ampio numero di specie influenza positivamente le funzioni ecosistemiche come la produzione di biomassa, la stabilità e la ritenzione o assorbimento di nutrienti (Tilman et al., 1997, 2001). In generale, una comunità con più specie potrebbe utilizzare più completamente le risorse esistenti a causa della complementarità delle nicchie, che permette la convivenza di specie che possono utilizzare diverse forme di risorse o consumare le stesse risorse in diversi periodi dell'anno. Secondo l'ISPRA, l'utilizzo negli interventi di verde pensile un buon numero di specie vegetali autoctone, oltre a portare ad un guadagno in termini ecologici, procura vantaggi dal punto di vista applicativo per le esigenze tecniche della copertura (ISPRA 2012). Ciò è basato sul fatto che diversi studi hanno messo in luce come un aumento del numero di specie porti ad un miglioramento sia delle prestazioni termodinamiche che idrauliche, oltre che ad una maggiore resistenza e resilienza della vegetazione (ISPRA 2012; Cook-Patton e Bauerle 2012).

Quando si vuole perseguire l'obiettivo di realizzare un intervento che abbia elevato valore ecologico, si dovrebbe, pertanto, progettare e realizzare l'opera in modo da favorire la diversità di specie floristiche e faunistiche che potranno risiedere, o frequentare, il sito in cui l'intervento viene realizzato (ISPRA 2012).

Questi sono buone raccomandazioni, sebbene i limiti del supporto che i tetti verdi possono offrire alla biodiversità debbano ancora essere determinati, come, per esempio, i taxa che possono essere ospitati dati i limiti di progettazione e struttura del tetto (ad esempio i limiti dati dalla profondità del substrato o dalle dimensioni del tetto), ovvero se la "dimensione del patch" costituito da tali tetti è generalmente inferiore a una soglia che ne preclude l'utilizzo

da parte di alcuni taxa (Francis e Lorimer, 2011). Si deve inoltre determinare se il modello di distribuzione spaziale dei tetti viventi all'interno della matrice urbana può consentire lo scambio degli individui tra i tetti e se le popolazioni che vi abitano sono resilienti e possono quindi essere persistenti all'interno della regione urbana, in modo che i tetti verdi possono davvero sostenere le specie a tempo indeterminato (Oberndorfer et al., 2007).

In accordo con quanto detto sopra, alcune realtà amministrative hanno provveduto a normare la costruzione dei tetti verdi in modo da garantirne la qualità ecologica. Un esempio virtuoso è quello del cantone svizzero di Basilea, il quale ha incluso la progettazione dei tetti verdi nella sua attuale strategia di conservazione della biodiversità, secondo la quale i tetti verdi devono obbligatoriamente essere costruiti su tutti i nuovi edifici con tetti piatti, stabilendo che, sui tetti al di sopra di 500 m², il substrato deve presentare vari spessori e deve essere costituito da idoneo terreno naturale proveniente dalle regioni circostanti. Anche la città di New York ha reso obbligatorio la costruzione di tetti verdi sui nuovi edifici a partire dal 2019.

Tali sistemi di regolamentazione dovrebbero essere presi come esempio anche sul territorio italiano dove la costruzione di sistemi vegetali sugli edifici è stata favorita da incentivi pubblici ma non esistono ancora normative dettagliate che prendano in considerazione gli aspetti ecologici dei tetti verdi né tantomeno, vige l'obbligo di installazione di tali strutture (per i dettagli si rimanda al capitolo: La legislazione sul verde: indagine a livello UE e nazionale).

7.4 Verde pensile come strumento per la “rigenerazione” ecologica in ambiente urbano

Quanto trattato finora evidenzia il ruolo strategico che il verde pensile può giocare nell'ecologia urbana o meglio in quello che possiamo definire “rigenerazione ecologica” dell'ambiente antropizzato. Rigenerare nel senso di “ricreare” e salvaguardare una alta diversità biologica, seppure, come discusso nel precedente paragrafo, non esattamente equivalente a quella esistente precedentemente all'urbanizzazione. Si tratta quindi, di una prassi diversa dalle strategie di conservazione ecologica classiche, le quali si basano su pratiche di conservazione che prevedono la disponibilità di terreni "non utilizzati" (Redford e Richter, 1999), sia che si parli della delimitazione di aree protette preservate dallo sviluppo o dall'uso diretto ("riserve"), che di ripristino (cioè il tentativo di ricreare o simulare un

precedente stato o condizione dell'ecosistema) di ecosistemi degradati (Dobson et al., 1997).

Michael Rosenzweig, nel suo libro *Win-Win Ecology* (Rosenzweig, 2003), dimostrando che non c'è abbastanza spazio per salvare tutta la biodiversità della terra all'interno di riserve naturali espressamente designate, ha articolato per la prima volta il concetto di "Ecologia della riconciliazione" definendola come la branca dell'ecologia che studia i modi per incoraggiare la biodiversità negli ecosistemi dominati dall'uomo. Questa implica la modifica e diversificazione degli habitat antropici in modo tale da sostenere una maggiore varietà di specie, senza però, comprometterne l'uso del suolo, in sintesi una situazione "win-win" sia per l'uso umano che per la biodiversità.

Francis e Lorimer (2011), sottolineando che l'applicazione dell'ecologia della riconciliazione occupa un ruolo particolarmente rilevante nelle città, le quali (come descritto nel paragrafo precedente) esibiscono una biodiversità altamente modificata e cosmopolita, enfatizzano il ruolo del verde pensile. I tetti e le pareti verdi infatti rappresentano una tecnica di ingegneria ecologica con grande potenziale per la rigenerazione ecologica, sia replicando gli ecosistemi naturali e semi-naturali che permettendo il formarsi di nuove combinazioni biologiche spontanee.

A tale proposito, questi autori sollevano un punto interessante: se i tetti verdi debbano essere progettati per replicare gli habitat "naturali" o semi-naturali, o se dovrebbero essere usati come strumento per creare nuove combinazioni "ricombinanti" spontanee che sono comuni negli ecosistemi urbani (Francis e Lorimer, 2011).

Se da un lato i tetti verdi possono essere asserviti alle pratiche di conservazione tradizionale e progettati in modo da poter ospitare una specifica specie o un particolare gruppo di specie in pericolo di estinzione questo, potrebbe richiedere condizioni tecniche altamente specifiche, come il substrato, il suo spessore, il tipo di copertura vegetale e la gestione dell'ecosistema. Dall'altro lato, seguendo il principio di ecologia di riconciliazione, l'ecosistema del tetto può essere progettato in modo tale che un assemblaggio di specie non specifico ma variato e funzionale lo possa colonizzare. Francis e Lorimer (2011) concludono che quest'ultimo è l'approccio migliore, soprattutto considerato il crescente riconoscimento di nuovi ecosistemi (Hobbs et al., 2006) ed i limiti di quello che definiscono "tentativo di aggrapparsi a un'idea, culturalmente costruita, di ciò che è stato perso o si sta perdendo". Aggiungendo che, il disegno dei tetti vari ed eterogenei unito ad un approccio su scala

paesaggistica possono massimizzare il potenziale di biodiversità di tetti e pareti e fare della riconciliazione ecologica urbana una pratica di successo (Francis e Lorimer 2011).

Tali approcci su scala paesaggistica però, sono difficili da realizzare nelle aree urbane a causa della complessità spaziale dei paesaggi fisici e della componente sociale.

Quest'ultima, infatti, resta il principale determinante alla base delle scelte di pianificazione in ambiente cittadino in cui il primo fruitore dell'ambiente è l'uomo e la società di cui fa parte. Qualsiasi pratica di salvaguardia ecologica non potrà mai prescindere dalla percezione e l'uso dello spazio e dell'ambiente da parte dell'uomo, quantomeno in un'ottica di "riconciliazione" del genere umano con l'ambiente naturale.

Per questo sembra opportuno riallacciare il concetto di rigenerazione o trasformazione ecologica in ambiente antropizzato con quello di "rigenerazione urbana", che abbraccia fenomeni ed esperienze molto diversi oscillanti dalla partecipazione civica alla gestione di beni di rilevanza sociale alla trasformazione e ripristino di aree presenti nel tessuto urbano, includendo la pianificazione territoriale, l'efficienza energetica, e più in generale la trasformazione materiale delle città (Cartei 2017).

Bibliografia

- Alberti, M., Marzluff, J.M., Shulenberger, E., Bradley, G., Ryan, C. & Zumbrunnen, C. (2003). Integrating humans into ecology: opportunities and challenges for studying urban ecosystems. *BioScience*, 53, 1169–1179.
- Battisti Corrado. FRAMMENTAZIONE AMBIENTALE CONNETTIVITÀ RETI ECOLOGICHE. Pubblicato da, Provincia di Roma Dipartimento V, Servizio 1°. Luogo di pubblicazione, Rom. ISBN/ISSN, 88-900297-6-5.
- Baumann, N., 2006. Ground-nesting birds on green roofs in Switzerland: preliminary observations. *Urban Habitats* 4, 37e50
- Braaker, S., J. Ghazoul, M. K. Obrist, and M. Moretti. 2014. Habitat connectivity shapes urban arthropod communities – the key role of green roofs. *Ecology*. DOI: 10.1890/13-0705.1
- Brenneisen 2006. *Space for Urban Wildlife: Designing Green Roofs as Habitats in Switzerland*. URBAN HABITATS, VOLUME 4, NUMBER 1 ISSN 1541-7115
- Cartei Gian Franco. *Rigenerazione urbana e governo del territorio. Le istituzioni del federalismo : bimestrale di studi giuridici e politici della Regione Emilia Romagna / Regione Emilia Romagna, Servizio affari istituzionali e autonomie locali , V. 38, A. 2017, n. 3, 603-624 p.*
- Catalano Chiara, Stephan Brenneisen, Nathalie Baumann, Riccardo Guarino. *I tetti verdi di tipo estensivo: biodiversità ad alta quota*. RETICULA ISSN 2283-9232
- Clement G., 2005. *Manifesto del Terzo paesaggio*. Quodlibet, Macerata
- Collins, J.P., Kinzig, A., Grimm, N.B., Fagan, W.F., Hope D., Wu J. & Borer, E.T. (2000). A new urban ecology. *American Scientist*, 88, 416–425.
- Cook-Patton Susan C., Bauerle Taryn L. Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: A literature review. *Journal of Environmental Management*. Volume 106, 15 September 2012, Pages 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.003>
- Debinski D.M., Holt R.D., 2000. A survey and overview of habitat fragmentation experiments. *Conserv. Biol.*, 14: 342-355.

- Dobson, A.P., Bradshaw, A.D., Baker, A.J.M., 1997. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science* 277 (5325), 515e522.
- Dodds, W.K., 2009. *Laws, Theories and Patterns in Ecology*. University
- Dunnett, N., Nagase, A., Hallam, A., 2008. The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001e2006: influence of substrate depth. *Urban Ecosystems* 11, 373e384.
- Dunnett, N.P.; Kingsbury, N. *Planting Green Roofs and Living Walls*; Timber Press: Portland, OR, USA, 2004.
- Emilsson, T., 2008. Vegetation development on extensive vegetated green roofs: influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecological Engineering* 33, 265e277.
- Emrah Yalcinalp 1,*, Selva Ozveren 1, Alperen Meral 2, Muberra Pulatkan 1 and Sefa Akbulut. Habitat Effect on Urban Roof Vegetation. *Sustainability* 2017, 9, 1985; doi:10.3390/su9111985
- Farina A., 2001. *Ecologia del Paesaggio. Principi, metodi e applicazioni*. UTET Libreria, Torino, 673 pp.
- Ferguson, B.K., 2005. *Porous Pavements*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Francis R, Lorimer J. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. *J Environ Manag* 2011;92:1429–37.
- Grant, G., 2006. Extensive green roofs in London. *Urban Habitats* 4, 51e65.
- Gyongyver Kadas 2007 Rare Invertebrates Colonizing Green Roofs in London. *URBAN HABITATS, VOLUME 4, NUMBER 1*
- Gyongyver Kadas. (2002): Study of invertebrates on green roofs; how roof design can maximise biodiversity in a urban environment. MSc thesis University College London.
- Hobbs, R.J., Arico, S., Aronson, J., Baron, J.S., Bridgewater, P., Cramer, V.A., Epstein, P.R., Ewel, J.J., Klink, C.A., Lugo, A.E., Norton, D., Ojima, D., Richardson, D.M., Sanderson, E.W., Valladares, F., Vila, M., Zamora, R., Zobel, M., 2006. Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order. *Global Ecology and Biogeography* 15, 1e7.
- ISPRA, Verde pensile: prestazioni di Sistema e valore ecologico. Manuali e Linee Guida 78/ 2012.. ISBN 978-88-448-0534-0
- Jones RA (2002): Tecticolous invertebrates; A preliminary investigation of the invertebrate fauna on ecoroofs in urban London. *English nature*, London
- Köhler, M. Green Facades - A Wiev Back and Some Visions. *Urban Ecosyst.* **2008**, 11, 423–436.
- Köhler, M. Long term vegetation research on two extensive green roofs in Berlin. In *Urbanhabitats*; Bot. Garden: Brooklyn, NY, USA, 2006; Volume 4.
- Kowarik I., 2011. Novel urban ecosystems, biodiversity, and conservation. *Environmental Pollution*, 159, 1974–83.
- Lundholm Jeremy T. 2006. *Green Roofs and Facades: A Habitat Template Approach*. *URBAN HABITATS, VOLUME 4, NUMBER 1* ISSN 1541-7115
- Manso M., Castro-Gomes J.(2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41: 863-871)
- McKinney, M.L. (2002). Urbanization, biodiversity, and conservation. *Bioscience*, 52, 883–890.
- 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.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R.R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K.K.Y., Rowe, B., 2007. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions and services. *BioScience* 57, 823e833
- Partridge DR, Clark JA (2018) Urban green roofs provide habitat for migrating and breeding birds and their arthropod prey. *PLoS ONE*13(8): e0202298. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202298>
- Pérez G, RincónL, VilaA, GonzálezJ, CabezaL. Greenverticalsystemsfor buildings aspasive systems forenergysavings. *ApplEnergy*2011;88:4854–9.
- Redford, K.H., Richter, B.D., 1999. Conservation of biodiversity in a world of use. *Conservation Biology* 13 (6), 1246e1256.
- Rosenzweig, Michael (2003). *Win-win Ecology, How the Earth's species can survive in the midst of human enterprise*. Oxford, UK: Oxford University Press.

- Schrader, S., Böning, M., 2006. Soil formation on green roofs and its contribution to urban biodiversity with emphasis on Collembolans. *Pedobiologia* 50, 347e356.
- Spirn, S.A. (1984). *The granite garden: urbannature and human design*. New York: Basic Books.
- Tilman D., Knops J., Wedin, D., Reich, P., Ritchie, M. & Siemann, E. (1997). The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, 277, 1300–1302.
- Tilman, D., Reich, P.B., Knops, J., Wedin, D., Mielke, T. & Lehman, C. (2001). Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science*, 294, 843–845.
- Woodell, S. (1979). The flora of walls and pavings. In I.C. Laurie (Ed.), *Nature in cities* (pp. 135–156). New York: John Wiley & Sons.

8 QUALI PIANTE PER UN TETTO VERDE MEDITERRANEO? I SUGGERIMENTI DELLA RICERCA (a cura di *Rita Di Bonito*)

8.1 Caratteristiche del substrato del tetto verde

La struttura delle coperture a verde è considerata parte integrante del tetto e la sua progettazione, esecuzione, controllo e manutenzione è stata inizialmente regolata dalla norma UNI 11235:2007, aggiornata nel 2015. La copertura prevede una stratigrafia di materiali depositi sulla struttura portante come illustrato nella Figura 1 e la normativa indica le caratteristiche fisico-chimiche dei componenti in modo da garantire la loro resistenza e funzionalità nel tempo rispetto agli agenti ambientali ed evitare il rilascio di sostanze tossiche. Il primo elemento sulla struttura portante è costituito da uno o più strati aventi la funzione di impermeabilizzazione e barriera di protezione alla penetrazione delle radici. E' possibile l'inserimento di uno strato di isolamento termico. Successivamente viene depositato un elemento rigido drenante e di supporto, a cui si aggiungono elementi per l'accumulo di acqua. In molti prodotti commerciali questo strato è costituito da pannelli che si depongono ad incastro per costituire una superficie rigida aventi contemporaneamente sia la funzione di drenaggio che di accumulo idrico. Su questa struttura viene depositato un telo filtrante che fa da supporto al substrato colturale impedendo la sua dispersione durante il drenaggio delle acque in eccesso. Il substrato colturale è l'elemento fondamentale per il supporto e la nutrizione delle piante ed usualmente non è costituito da suolo o ne presenta una piccola percentuale in quanto questo materiale ha un elevato peso specifico e tendenza alla compattazione. Il substrato deve avere un grado di resistenza alla compattazione, agli agenti atmosferici ed avere una porosità che permette la presenza di aria per evitare l'anossia delle radici, deve permettere l'accumulo idrico e la ritenzione dei nutrienti. La porosità totale deve essere >60%. La densità apparente di un substrato deve essere compresa tra 350 g/l e 1000 g/l in quanto non deve appesantire la struttura portante. Sono disponibili numerosi prodotti commerciali costituiti da miscugli di materiali inorganici (perlite, pomice, argilla, lapillo, sabbia, zeolite). Pomice, lapillo e perlite hanno una porosità che conferisce leggerezza e ritenzione idrica e la zeolite, essendo in grado di ritenere N e K ha anche una funzione nella nutrizione delle piante. La granulometria dei componenti è oggetto di regolamentazione e sono ammesse piccole percentuali (fino a 0-15%) per frazioni con

diametro < 0.05 mm, e fino al 100% per frazioni comprese tra 16,00 e 20,00 mm. Il substrato deve incorporare una frazione di sostanza organica nella misura <60 g/l per substrati di tipo estensivo e <80 g/l per intensivo. E' prevista la presenza di fertilizzante a lento rilascio. Il peso del tetto verde è dato dalla sommatoria dei pesi di tutti gli elementi a massima saturazione di acqua. Per quanto riguarda il substrato di coltivazione si calcola il peso al netto dell'acqua eliminata per gravità. E' importante valutare il peso del tetto verde in relazione alla portata del solaio. Parametro importante nella realizzazione del tetto verde è il coefficiente di deflusso, definito come la percentuale di acqua che fuoriesce dal sistema rispetto a quella ricevuta nell'unità di tempo per una determinata superficie. Oltre al substrato, l'acqua viene assorbita anche dal tessuto filtrante su cui è deposto il substrato di drenaggio e viene in parte trattenuta negli elementi di raccolta presenti nell'elemento rigido. Con il termine di "volano" idrico si intende la quantità di acqua risultante dalla somma della quantità di acqua ricevuta dal sistema e quella eliminata sia dal deflusso che dall' evapotraspirazione ed è di fondamentale importanza per garantire la disponibilità di acqua alle piante negli intervalli tra le precipitazioni. La normativa UNI prevede dei valori di riferimento per il volano idrico differenti per zone geografiche, valutati in base alla frequenza delle precipitazioni. La capacità di accumulo idrico è un fattore particolarmente importante nella progettazione dei tetti verdi in ambiente mediterraneo, caratterizzato da lunghi periodi con assenza di precipitazioni in estate e intensi ma brevi periodi di precipitazioni nelle altre stagioni. La somministrazione di irrigazione di supporto nel periodo estivo si rende spesso necessaria in ambiente Mediterraneo in quanto le scarse precipitazioni e l'evapotraspirazione dovuta alla elevata temperatura non garantiscono la sopravvivenza delle piante. La presenza di serbatoi per il recupero delle acque di deflusso è una strategia per una corretta gestione delle risorse idriche, che in ambiente mediterraneo non possono essere sottratte alle attività produttive. In base alla profondità dei substrati, le coperture vengono suddivise in estensive (8-20 cm), semi-estensive ed intensive (20-100 cm) e per ogni valore minimo di spessore è indicata una tipologia di piante. Per substrati di cm 8 vengono raccomandate esclusivamente le specie di *Sedum*, per substrati di 10 cm si possono aggiungere erbacce perenni a piccolo sviluppo, mentre per substrati di 15 cm possono essere installati con successo grandi erbacee perenni, piccoli arbusti tappezzanti o tappeti erbosi. Gli arbusti di piccola taglia sono raccomandati per substrati di 20 cm mentre arbusti di grande taglia o addirittura piccoli alberi sono ammessi quando la profondità è di

almeno 30 cm. L'installazione di alberi di III, II e I grandezza è possibile per substrati di almeno 50 cm, 80 cm o 100 cm rispettivamente, con delle opportune misure di ancoraggio. La normativa prevede il controllo delle opere a 12 mesi dall'impianto per la verifica di parametri di copertura che dipendono dal tipo di piante. Le erbacee perenni ed il *Sedum*, devono aver raggiunto una copertura di almeno il 60% della superficie con la presenza di almeno il 75% delle specie utilizzate. Se vengono utilizzate stuoie pre-coltivate di *Sedum* o altre erbacee perenni, la copertura deve raggiungere un valore minimo del 90 %, mentre per i tappeti erbosi, sia realizzati con semina che con rotoli, la copertura deve raggiungere 95%. Se si utilizzano piante pre-coltivate in vaso, dopo 12 mesi la copertura deve essere del 90% e tutte le piante devono mostrare un buon attecchimento e sviluppo dell'apparato radicale nel substrato. La normativa prevede inoltre una bassa presenza di infestanti (7% della superficie), anche se alcuni autori hanno rivalutato la presenza delle piante cresciute spontaneamente, in quanto contribuiscono alla biodiversità e resistenza del tetto verde. La normativa prevede anche un piano di manutenzione dei sistemi di drenaggio, raccolta e smaltimento delle acque, dell'elemento di tenuta e degli impianti. La manutenzione dello strato vegetativo è prevista sia nelle fasi iniziali dell'impianto che periodicamente comporta irrigazioni, concimazioni, sfalci, potature, eliminazione di infestanti. Occorre tempestivamente intervenire sullo strato colturale per controllarne lo spessore, arieggiare ed eventualmente riempire le fallanze con introduzione di nuove piante. La manutenzione deve avvenire secondo un piano prestabilito a seconda del tipo di vegetazione ed è minimo per gli impianti di tipo estensivo con *Sedum* e specie erbose e più impegnativo per arbusti e alberi.

8.2 Il valore ecologico del tetto verde

Un aspetto importante indicato nella normativa 2015 è il riconoscimento del valore ecologico delle coperture verdi, che rappresentano corridoi ecologici in grado di contrastare la perdita della biodiversità dovuta agli insediamenti urbani. La progettazione deve essere finalizzata il più possibile al ripristino del ciclo dell'acqua ed alla conservazione di flora e fauna. L'installazione deve avere come obiettivo la conservazione di flora e fauna e prevede il raggiungimento di almeno uno di 4 livelli diversi di mitigazione ecologica. Il livello A è il più ambizioso e prevede una dettagliata analisi vegetazionale e faunistica e accorgimenti

tecnicamente, in modo da ricreare un ambiente simile a quello naturale che possa efficacemente fungere da corridoio ecologico. Il livello B prevede un certo grado di biodiversità, con tre diverse tipologie di vegetazione a scelta tra *Sedum*, piccole piante erbacee, prato naturale, suffrutici, arbusti e la presenza di almeno 1/3 di piante autoctone o spontanee e 3 livelli diversi di profondità di substrati. Il livello C richiede soltanto 1/3 di piante autoctone e spontanee mentre il piano D non richiede nessuno dei parametri dei livelli precedenti ed ha il valore più basso di mitigazione ecologica. L'implementazione di coperture verdi nelle aree urbane è considerata un'azione finalizzata all'aumento delle aree verdi richieste per il raggiungimento degli obiettivi della strategia EU per la biodiversità nel 2030. Le coperture verdi sono molto diffuse in Nord Europa e Nord America ma stentano ad affermarsi negli ambienti Mediterranei caratterizzati da temperatura elevate e scarse precipitazioni nei mesi estivi. L'Italia rientra nella zona a clima temperato-caldo piovoso, con estate secca ma presenta diversità nelle caratteristiche geografiche che hanno notevole influenza sul clima. Alle differenze di latitudine (da 47° 05' N a settentrione a 35° 29' N a meridione), e longitudine (da 18° 31' E a 6° 37' E) si sommano le differenze in altitudine, in quanto soltanto il 23,2% del territorio è pianeggiante e l'effetto della presenza del mare. Secondo la classificazione rivista delle zone climatiche di Köppen-Geiger, (Beck et al. 2018) ne consegue una suddivisione del territorio in 6 zone climatiche diverse indicate nella figura 2, con la presenza di una regione litoranea caratterizzata da clima temperato caldo (Csa) o temperato subtropicale (CSb) una regione del Nord Est e alto-adriatica con clima temperato sub-continentale o continentale (Cfa), caratterizzato da maggiori precipitazioni nel periodo estivo, una regione pre-alpina e medio-appenninica con clima temperato fresco (Cfb), una regione alpina e alto-appenninica (Dfa e Dfb). La notevole differenza nelle temperature e nella quantità e distribuzione delle precipitazioni nelle varie zone influenzano significativamente la scelta delle piante. Le zone climatiche Cfa e Csa sono le più estese e come esempio vengono considerate le variazioni mensili di temperatura e precipitazioni delle città Milano (Cfa) e Roma (Csa). Mentre a Milano la temperatura media annuale è 13,0 °C circa e le precipitazioni annuali raggiungono mm 1162 circa, distribuiti su tutti i mesi con valori più bassi nel mese di luglio, a Roma la temperatura media raggiunge 15.8 °C circa ed esiste un periodo di siccità estiva (Climate-Data ORG). La scelta della tipologia di impianto e delle specie da installare deve quindi necessariamente tenere conto del microclima. Nelle aree Mediterranee, la presenza di zone climatiche con caratteristiche di piovosità e

temperatura differenti si riflette nell'esistenza di notevole diversità negli insiemi di specie spontanee presenti. Caneva et al. (2013) hanno prodotto un database di piante Mediterranee spontanee potenzialmente adatte alla coltivazione in tetti verdi sulla base dell'osservazione delle loro caratteristiche sinecologiche, morfologiche, coriologiche ed ecologiche, adatte alla crescita in ambiente con poca disponibilità di acqua e nutrienti.

8.3 Le sperimentazioni in ambiente Mediterraneo

Numerose sperimentazioni sono state finalizzate alla ricerca di soluzioni sostenibili ed economiche ed in massima parte le valutazioni delle piante sono avvenute in substrati di basso spessore adatti a coperture estensive (da 7,5 cm a 20 - 30 cm) in quanto tale tipologia è di più facile realizzazione considerando i bassi costi e la minima necessità di manutenzione. La capacità di accumulo idrico è stata considerata un fondamentale parametro di valutazione dei substrati, mentre per i componenti sono stati scelti spesso materiali disponibili a livello locale in molte zone Mediterranee, come ghiaia, sabbia e materiali porosi di origine vulcanica (lapillo, pomice, perlite, zeolite). Alcuni materiali ottenuti dal riciclo di scarti di attività industriali o edili sono stati sperimentati con successo e attualmente utilizzati in prodotti commerciali. La necessità di trovare un'alternativa alla torba, materiale organico di origine fossile comunemente utilizzato nei substrati fuori suolo, ma presente in EU solo in alcune zone ed in via di esaurimento, ha portato all'utilizzo di compost ottenuto dal trattamento di rifiuti alimentari o agricoli. Di Bonito et al.,(2014) hanno sperimentato l'aggiunta di 10% di compost al substrato composto da 40% Agrilit™(agropelite) e 50% Agriterram™ TSV (lapillo, pomice, zeolite, torba) e riscontrato un significativo aumento della crescita di Crassulaceae. in presenza di limitata fertilizzazione con irrigazione modesta nel periodo estivo (Figura 3). Alcuni lavori eseguiti in Grecia, zona climatica Csa, hanno sperimentato formulazioni di substrati contenenti pomice, perlite, zeolite a varie concentrazioni, con eventuale aggiunta di argilla attapulgite, sabbia, torba e compost ottenuto da rifiuti verdi e letame, riscontrando un positivo effetto del compost sulla crescita di piante erbacee ed arbustive (Nektarios 2015). Nelle isole Baleari Azenas et al. (2018, 2019) hanno utilizzato substrati commerciali ottenuti da mattoni di argilla frantumati con il 10,6% di sostanza organica per la crescita di specie spontanee. Un interessante esperimento presso Haifa, Israele, zona climatica Csa, ha valutato sia l'utilizzo di materiale di scarto per i substrati che di acque grigie per l'irrigazione (Agra et al. 2018). Il substrato

era composto di cenere con particelle di grosse dimensioni (2-8 mm) proveniente da un impianto di biomassa a carbone, con l'aggiunta di compost 20% utilizzato per la crescita di specie erbacee a carattere strisciante: lippia nodiflora (*Phyta nodiflora*, Famiglia *Verbenaceae*), naturalizzata nel mediterraneo e convolvolo (*Convolvulus mauritanicus*). Il substrato risultava confacente alla normativa di riferimento (FLL 2008) sia per quanto riguarda la capacità di accumulo idrico (72%) che per il coefficiente di drenaggio ed ha avuto un effetto positivo sulla crescita delle piante, come pure l'utilizzo di acque grigie, senza compromettere le qualità fisico- chimiche delle acque di deflusso, e risultando un'alternativa sostenibile in zone caratterizzate da carenza di acqua. Essendo la disponibilità idrica limitata in ambiente Mediterraneo, molte sperimentazioni sono state condotte paragonando la risposta delle piante a diversi livelli di irrigazione che andavano da assenza, irrigazione di soccorso nei periodi di siccità e irrigazione periodica sia inferiore che uguale alla capacità di ritenzione. Le irrigazioni venivano spesso somministrate considerando l'evapo-traspirazione potenziale del sistema pianta-substrato (ET). Le caratteristiche idrologiche dei substrati sono importanti non solo perché la loro ritenzione idrica viene utilizzata dalle piante nei periodi di siccità ma anche perché possono regolare il deflusso delle acque piovane che possono essere molto consistenti in alcuni periodi dell'anno. A Beneguasil, nel sud della Spagna in zona climatica Csa, è stata valutata l'efficienza idrologica di una copertura verde di 315 m² realizzata con un substrato senza suolo di 10 cm di spessore e vegetazione composta da un insieme di *Sedums*. La misura delle precipitazioni, del deflusso di acqua, dell'evapo-traspirazione hanno dimostrato una superiore capacità idrologica del tetto verde nei confronti di un tetto convenzionale che fa predire una significativa riduzione del deflusso delle acque piovane (Andrés-Doménech et al., 2018). Il limitato spessore dei substrati dei tetti verdi richiede una attenta selezione delle specie da utilizzare, e caratteri vantaggiosi sono la capacità di crescita prostrata che permette la copertura della superficie del substrato, la velocità di crescita e la quantità di biomassa prodotta. Molti lavori hanno preso in considerazione specie Mediterranee locali native di terreni marginali con poca disponibilità di nutrienti e acqua. Le sperimentazioni hanno paragonato le singole specie in colture singole, ma le colture miste di diverse specie sono considerate più vantaggiose, resistenti alle variazioni climatiche e di superiore capacità estetica. Le specie erbacee succulente del genere *Sedum* sono molto utilizzate in tetti verdi per le capacità di crescita prostrata tappezzante, l'apparato radicale superficiale che permette la crescita su substrati

di basso spessore, la rusticità e la capacità di propagazione vegetativa. I *Sedums* possono diffondersi tramite dispersione di frammenti di rami (propaguli) e tale capacità è utilizzata per l'allestimento dei tetti verdi. Numerose specie di *Sedum* native dell'ambiente Mediterraneo sono state oggetto di sperimentazioni ed hanno mostrato maggiore adattabilità rispetto ad altre piante in regimi di irrigazione sub-ottimali. *Sedum sediforme* ha dimostrato un buon adattamento alle condizioni del tetto verde in diverse località Mediterranee, come pure buone capacità termiche. Nelle Isole Baleari, zona climatica Csa, Azenas et al. (2018, 2019) hanno valutato la capacità di colonizzazione e sviluppo nei primi stadi di crescita di un gruppo di specie perenni native di zone rocciose, costali aride, saline o marginali su un substrato di 12 cm e 3 livelli di irrigazione (100% 75% e 50% dell'acqua consumata). Il miglior sviluppo ed aspetto estetico in relazione alla limitazione di acqua si è avuto per le specie *S. sediforme*, e *Brachypodium phoenicoides* comunemente chiamato Paléo dei campi abbandonati, una pianta erbacea monocotiledone a portamento cespuglioso della famiglia Poaceae. Il paleo è comune in Italia e simile a *Festuca arundinacea* una Poacea utilizzata per tappeti erbosi e sperimentata in substrati per tetti verdi in Grecia, zona Csa (Nektarios e Ntoulas 2017). A livelli sub-ottimali di irrigazione (ET= 50% e 25% rispettivamente del potenziale di evapo-traspirazione) *S. sediforme* ha mostrato una migliore capacità termica, con ridotti flussi di calore, in primavera-estate rispetto a *B. phoenicoides*. (Azenas et al. 2018). Shindler et al. (2018) hanno confrontato monoculture di *S. sediforme* nei confronti di colture miste con un gruppo di erbacee locali: indivia (*Chicorium endivia*), ranuncolo (*Ranunculus scandiacinus*) borsa del pastore (*Capsella bursa-pastoris*), 'echinum (*Echinum joudaeum*), trifoglio (*Trifolium purpureum*, e *Trifolium palesinum*), senape (*Sinapsis alba*), reseda (*Reseda alba*), *Lomelosia prolifera*, *Glebionis coronarium*, in un substrato di profondità 13-19 cm, ed hanno riscontrato una migliore capacità di isolamento termico della monocoltura con *Sedum* in quanto nella coltura mista le altre erbacee tendevano a scomparire. A Lleida, Spagna, zona climatica semiarida Bsk, le migliori capacità di copertura in monocoltura su un substrato di spessore cm 10, in assenza o con minima irrigazione di soccorso è stata riscontrata per *S. album*, *S. sediforme* e *S. sexangulare*, mentre due varietà di *S. spurium* hanno avuto una crescita stentata (Perez et al., 2018). Le limitate capacità di crescita di una accessione di *S. spurium* raccolto in Italia sono state riscontrate anche nel CR Casaccia, Roma, zona climatica Csa (Giagnacovo et al. 2014). Tuttolomondo et al. (2018) hanno valutato 15 specie di *Sedum* autoctone di zone

aride marginali della Sicilia (zona Csa), riscontrando buone capacità ricoprenti di *S. sediforme*. Buone capacità di attecchimento ed interessanti caratteri morfologici sono stati individuati anche per *S. amplexicaule*, *S. dasyphyllum* e *S. ocrholeucum*, mai utilizzate in tetti verdi ma tali specie andrebbero valutate per periodi più lunghi. Nello stesso ambiente, *S. sediforme* si è mostrato particolarmente adatto ad applicazioni tecnologiche per la facilità di germinazione dei propaguli direttamente nel substrato rispetto ad altre specie (Aprile et al. 2019) A Ebeneguasil, Spagna, la copertura di m² 315 caratterizzata da buone capacità di ritenzione idrica è stata realizzata con 7 specie di *Sedum*: *S. album* 20%, *S. acre* 18%, *S. florifeum* 34%, *S. spurium* 17%, *S. rupestre* 3%, *S. sediforme* 3%, *S. sexangulare* 5% (Andrés-Doménech et al. 2018). In Grecia, zona climatica Csa, buone capacità di crescita a condizioni limitanti di irrigazione sono state riportate per *S. sediforme*, pianta indigena diffusa lungo le coste rocciose fino ad un'altitudine di 400 m (Nektarios et al., 2015). In Italia Centrale, zona Csa, Benvenuti e Bacci (2010) hanno riscontrato resistenza alla siccità su substrati per tetti verdi di profondità cm 7 e cm 12 di *Sedum rupestre* e del finocchio marino (*Chrytium marinum*), una erbacea perenne alofita della famiglia delle Apiaceae, con fusto lignificato alla base, tipica di dune costiere. Nella stessa sperimentazione hanno avuto buona capacità di crescita sul substrato più spesso alcune specie spontanee Italiane tipiche di dune, suoli rocciosi, rocce costiere, caratterizzate da fioritura nel periodo primaverile estivo. Nella famiglia delle Asteraceae, sono state considerate il dente di leone (*Leodonton tuberosus*), erbacea perenne molto diffusa in Italia, con rizoma tuberoso e infiorescenze di capolini, la santolina delle spiagge (*Othantus maritimus*), pianta tomentosa cespugliosa tipica di dune, la camomilla marina (*Anthemis maritima*), pianta perenne di piccole dimensioni presente in dune, e gli elicrisi, (*Helychrisum italicum* e *E. stoechas*), piante cespugliose perenni, tomentose, con infiorescenze gialle a capolino. Sono inoltre state considerate l'erbacea perenne vedovina selvatica, (*Scabiosa columbaria*, famiglia delle Caprifoliaceae) caratterizzata in natura da abbondante e lunga fioritura, il garofano dei certosini (*Dianthus carthusianorum*, famiglia delle Cariophyllaceae), il papavero giallo (*Glaucium flavum*, famiglia delle Papaveraceae), la valeriana rossa (*Centrathus ruber*, famiglia delle Valerianaceae) caratterizzata da fusto lignificato alla base. Una specie di garofanino tappezzante (*Dianthus gratianopolitanus*) è stata utilizzata anche in Calabria, zona Csa insieme alla peverina tomentosa (*Cerastium tomentosum*, famiglia delle Cariophyllaceae), una pianta tappezzante tomentosa con rizoma ipogeo, e al fico di mare

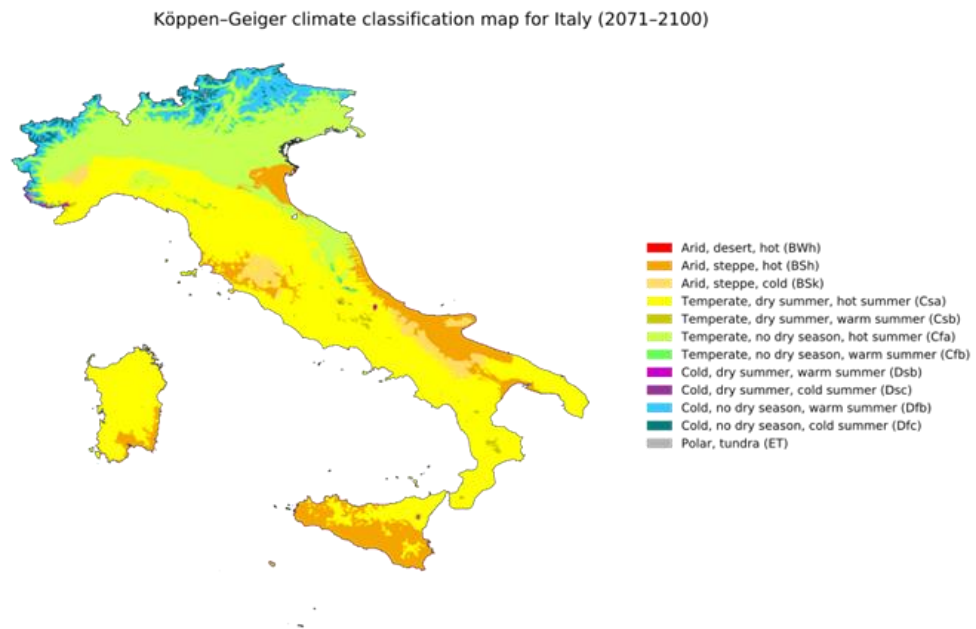
(*Carpobrotus edulis*, famiglia delle Aizoaceae), pianta strisciante con foglie succulente, originaria del sudafrica ma naturalizzata nelle dune italiane (Algieri et al. 2014). In Casaccia, Roma, Giagnacovo et al. (2014) hanno valutato accessioni raccolte in Italia centrale (*S. spurium* e *Sempevivum tectorum*) e lungo le coste adriatiche (*S. album*, *S. acre*, *S. hispanicum*, *S. rupestre*, *S. sediforme*, *S. reflexum*) per capacità di crescita tappezzante confermando le buone capacità in coltura singola di *S. rupestre* mentre *S. album* ha mostrato superiore capacità di competizione in coltura mista di lunga durata (Giagnacovo, comunicazione personale). Nella stessa zona sono state realizzate coperture con un insieme di Crassulaceae (*S. acre*, *S. spurium*, *S. reflexum*, *S. palmeri* e *Sempervivum tectorum*) che hanno dimostrato buone capacità di mitigazione della temperatura estiva (Figura 3, Biagiotti 2017). La coltura di *Sedum* in combinazione con altre specie caratterizzate da limitata capacità tappezzante risulta vantaggiosa, in quanto la sua crescita strisciante contribuisce alla copertura del substrato. A Cordoba, zona climatica Csa, *S. sediforme* è stato utilizzato in colture miste comprendenti 20 specie tra erbacee e cespugliose suffruticose (Porcaro et al. 2019) mentre Van Mechelen et al. (2015) in Avignone, zona Csa ha sperimentato un tetto verde composto da *S. acre*, *S. album* e 16 diverse specie comprendenti erbacee, geofite e suffruticose sia annuali che perenni. Benvenuti e Bacci (2010) hanno valutato anche alcune specie della famiglia Lamiaceae, piante con portamento arbustivo e con fusto parzialmente lignificato. Le Lamiaceae prese in considerazione sono native dell'ambiente mediterraneo e tradizionalmente coltivate per le proprietà aromatiche e officinali delle foglie. Sono state considerate la lavanda (*Lavandula stoechas*) la mentuccia (*Calaminta nepeta*), la santoreggia (*Satureja montana*). Il finocchio selvatico ha dato buoni risultati anche in Grecia, dove sono state valutate con buoni risultati alcune arbustive Mediterranee in sperimentazioni che prevedevano sempre livelli limitanti di irrigazione e due profondità di substrato. Buone capacità di crescita nel substrato di cm 7.5 e resistenza alla siccità sono stati riscontrati per le Lamiceae lavanda, santoreggia, rosmarino, (*Rosmarinus prostratus prostratus*), il timo, (*Thymus vulgaris*), l'origano (*Origanum dictamnus L.*) il tè greco di montagna (*Sideritis athoa*) mentre la salvia (*Salvia fruticosa*), ha avuto una crescita limitata. (Kotsiris et al, 2012, Nektarios and Ntoulas 2017, Papafotiou et al. 2016). Anche in Portogallo, zona Csb, caratterizzata da temperature più miti, le Lamiaceae aromatiche coltivate su substrati a base di argilla espansa hanno dato buoni risultati. (Monteiro et al. 2017). Nel CR Casaccia, Roma, è stata eseguita una

copertura con piante di rosmarino (*Rosmarinus officinalis*), salvia, timo (*Thymus citriodorus*) in substrato avente spessore di cm 17, riscontrando dopo 18 mesi, buona crescita di tutte le specie con una migliore resistenza alla siccità di rosmarino e migliore sviluppo in presenza di compost 10% (Figura 4, Di Bonito et al, 2018). La copertura ha mostrato buone capacità termiche. Poche sono le sperimentazioni di specie arbustive o piccoli alberi in un substrato senza suolo, tra cui ricordiamo in Grecia la coltivazione del pitosforo (*Pittosporum tobira*, famiglia delle Pittosporaceae), piccolo albero ornamentale di origine orientale e olivo (*Olea europea*, famiglia Oleaceae) in substrati con una profondità di 30 cm o 40 cm (Kotsiris et al. 2013). La possibilità di utilizzare in tetti verdi specie cespugliose arbustive e piccoli alberi sia decidui che sempreverdi, è stata valutata a Trieste zona Cfa senza estate arida. Savi et al. (2016) hanno scelto 11 specie di origine Mediterranea caratterizzate da resistenza alla siccità, a elevate temperature e capacità di colonizzazione di ambienti con poca disponibilità di suolo comprendenti sia cespugli con fusto parzialmente legnoso (Salvia), che cespugli legnosi come il cisto (*Cistus silvifolius*), lo scotano (*Cotynus coggyria*), il dondolino (*Emerus majus*), il ligustro (*Ligustrum vulgare*), e piccoli alberi: la spina di Cristo (*Paliurus spina-christum*), la fillirea (*Phillyrea angustifolia*), il lentisco (*Pistacia lentiscus*), il ciliegio selvatico (*Prunus mahaleb*), il prugnolo selvatico (*Prunus spinosa*). L'esperimento è stato condotto in substrati di profondità cm 10 e 13 per un periodo di 2 anni con una minima irrigazione di supporto nel periodo estivo in quanto le precipitazioni naturali della zona erano in grado di sopperire al fabbisogno di acqua delle piante. Le varie specie hanno presentato differenze nei tratti funzionali che conferiscono resistenza alla siccità, come il turgore, la bassa evapo-traspirazione, il basso consumo di acqua. Il migliore sviluppo delle piante si è avuto nel substrato più spesso e gli autori hanno ipotizzato che il fattore limitante per la crescita delle piante sia l'aumento di temperatura del substrato dovuto alla carenza d'acqua, che produce stress alle radici. Quindi, nella coltivazione di piante cespugliose arbustive è necessario scegliere uno spessore di substrato adeguato a garantire la ritenzione di acqua evitando lo stress da temperatura alle radici. Infine tra le sperimentazioni che hanno considerato l'utilizzo di specie esotiche in tetti verdi, ricordiamo i buoni risultati ottenuti nel CR Casaccia con la Crassulacea *Aeonium castello-paivae*, pianta succulenta a portamento cespuglioso con fusto parzialmente lignificato, originaria delle Canarie (Figura 5, Giagnacovo et al., 2014), e in Grecia con

alcune specie di origine orientale utilizzate per i tappeti erbosi (*Zoysia matrella* e *Z. japonica*, *Paspalum* sp., *Cynodon* sp., Nektarios and Ntoulas, 2017).



Figura 1. Elementi strutturali della copertura verde (Foto ZinCo Int.)



Source: Beck et al.: Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution, Scientific Data 5:180214, doi:10.1038/sdata.2018.214 (2018)

Figura 2 - Mappa delle zone climatiche secondo la classificazione rivista di Köppen-Geiger (Beck et al. 2018)



Figura 3 - Coltura mista di Crassulaceae a due anni dall'impianto nel CR Casaccia, Roma.



Figura 4. Coltura mista di Lamiaceae (Timo, rosmarino, salvia, santoreggia)



Figura 5. Pianta di *Aeonium castello-paivae*

Bibliografia

- Agra H., Solodar A., Bawab O., Levy S., Kadas G.J., Blaustein L., Greenbaum N., 2018. Sci. Tot. Env. 633 11272-1279.
- Algieri M. C., Mazza M., Stephanich D. 2014. X Convegno Nazionale sulla Biodiversità. Roma 3-5 settembre.
- Andrés-Domenéch, Perales-Momparler S., Morales-Torres A. and Escuder-Bueno I., 2018. Sustainability 10, 3125.
- Aprile, S., Tuttolomondo, T., Gennaro, M.C., Leto, C., La Bella, S., Licata, M. 2019. Sci. Hort. 262, 109091.
- Azeñas, V., Cuxart J., Picos R., Medrano, H., Simo G.; Lòpez-Grifol A., Gulías J. 2018. Energy & Building. 164, 276-238.
- Azeñas, V., Janner, I., Medrano, H., Gulías J. 2018. J. Environ. Manage. 212, 236-247
- Azeñas, V., Janner, I., Medrano, H., Gulías, J. 2019. Urban For. Urban Green. 141, 158-169.
- Beck H.E., Zimmermann N.E. McVicar T.R., Vergopolan N. 2018. Scientific Data 5:180214.
- Benvenuti, S. and Bacci, D. 2010. Urban Ecosyst. 13, 349-363.
- Biagiotti D. 2017. Messa a punto di tecniche e sistemi colturali per la realizzazione di superfici verdi per l'efficientamento di edifici urbani. Tesi di Dottorato in Ecosistemi Produttivi, Dip. Scienze Agrarie e Forestali, UNITUS, Viterbo.
- Caneva, G., Kumbaric, A., Savo, V., Casalini, R. 2013. Plant Biosyst. 149, 374-383.
- Di Bonito, R., Biagiotti, D., Giagnacovo, G., Cauditelli, M., Campiotti, C.A. 2016. Acta Hort. 1146, 143-148.
- Di Bonito, R., Biagiotti, D., Giagnacovo, G., Viola, C., Campiotti, C.A. 2018. Acta Hort. 1215. 383-388.
- FLL 2008. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing.
- Giagnacovo G. Biagiotti D., Di Bonito R., Mascioli C., Campiotti C. A. 2014. X Convegno Nazionale sulla Biodiversità. Roma 3-5 settembre.
- Kotsiris G., Nektarios P., and Paraskevopoulou A. 2012. HortSci. 47(2) 311-317.
- Kotsiris, G., Nektarios, P., Ntoulas, N., Kargas, G. 2013. Urban For. Urban Green. 12, 380-392.
- Monteiro, M.V., Blanuša, T. Verhoef, A., Richardson, A., Hadley, P., Cameron, R.W.F. 2017. Energ. Build. 141 56-68.

- Nektarios, P.A., Ntoulas, N. 2017. *Acta Hortic.* 1189, 197-202.
- Nektarios, P.A., Ntoulas, N., Nydrioti E., Kokkinu I., Bali E.-M. 2015. *Sci. Hortic.* 181, 52-61.
- Papafotiou, M., Tassoula, L., Liakopoulos, G. and Kargas, G. 2016. *Acta Hortic.* 1108, 309–316.
- Perez, G., Chocarro, C., Juárez, A., Coma, J., 2020. *Urban For. Urban Green.* 48, 126566.
- Porcaro M., Ruiz de Adana M., Comino F., Peña A., Martín-Consuegra E., Vanwallegeghem T. 2019. *En. Build.* 197. 18-33.
- Savi, T., Dal Borgo, A., Love, V., Andri, S., Tretiach, M., Nardini, A. 2016. *Sci. Total Env.* 566-567, 753-760.
- Schlinder, B.Y., Blaustein, L., Vasl, A., Kadas, G.J., Seifan, M. 2019. *Urban For. Urban Green.* 38. 392-396.
- Tuttolomondo, T., Fascella, G., Licata, M., Schicchi, R., Gennaro, M.C., La Bella, S., Leto, C., Aprile, S. 2018. *Italian J. Agron.* 13, 1077.
- UNI 11235:2015. Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde.
- Van Mechelen C., Dutoit T., Hermy M., *Ecol. Eng.* 2015 82, 571-582.

9 PIANTE SPONTANEE SUI TETTI VERDI PER EFFICIENTAMENTO ENERGETICO DEGLI EDIFICI CON SALVAGUARDIA DELLA NOSTRA BIODIVERSITA' DI FLORA E FAUNA (a cura di *Susanna Mariani, Arianna Latini, Lorenzo Gatti, Patrizia De Rossi*)

Questo capitolo riporta un “caso studio” inerente alla valutazione del potenziale di resistenza e resilienza sul tetto verde del C.R Casaccia di due specie erbacee, spontanee ed autoctone, al fine di una loro inclusione in miscele di semi per prati fioriti, soprattutto, per tetti verdi e altri inverdimenti urbani in ambiente mediterraneo.

Questo studio mostra anche come nei terreni antropizzati, a causa di pratiche del sistema agricolo e dello sfalcio dei prati, si verifichi una continua perdita di biodiversità; tuttavia, la fragilità di tali specie botaniche in declino, spesso entomogame, non è correlata all'incapacità di tali piante di adattarsi a condizioni ambientali avverse. Inoltre, evidenzia come tale biodiversità a rischio, con elevata resistenza agli ambienti estremi mediterranei, dovrebbe essere sempre di più studiata e testata per verificarne le potenzialità di inclusione nel verde pensile urbano per la salvaguardia delle piante stesse e degli impollinatori specifici la cui sopravvivenza è da esse dipendente.

9.1 Favorire la biodiversità e la salvaguardia degli impollinatori tramite i tetti verdi in città

Attualmente, nonostante a livello globale la maggior urgenza si focalizzi sulla protezione della biodiversità e su fattori - come il consumo di suolo, l'urbanizzazione, le emissioni di inquinanti e climalteranti - che mettono a repentaglio questa ricchezza, una delle maggiori minacce per l'umanità è rappresentata dal collasso dell'ecosistema globale causato dalla perdita delle api e degli impollinatori (Dicks et al. 2021, ISPRA 2021). Negli ultimi decenni, infatti, è aumentata notevolmente la consapevolezza sia scientifica che pubblica di quanto la sicurezza alimentare sia dipendente dal servizio di impollinazione fornito da specie selvatiche e gestite (Nicole 2015, Christmann et al. 2021). A questo proposito, l'Europa ha già approvato diverse strategie e politiche incentrate sul capitale naturale e sullo sviluppo di servizi ecosistemici, individuati come gli elementi principali di nuovi modelli urbani, che promuovano soluzioni basate sulla Natura (NBS) per aiutare le società ad affrontare in modo sostenibile una varietà di problemi ambientali e sfide sociali ed economiche. In questo ambito, la UE riconosce una elevata valenza ambientale al verde urbano che può fungere

da rifugio per gli impollinatori e può svolgere un ruolo cruciale per la protezione della biodiversità degli insetti pronubi minacciati nelle campagne dall'utilizzo di pesticidi (Commissione Europea 2015).

Tra le infrastrutture verdi degli edifici, i tetti verdi sono già riconosciuti come elementi essenziali per la realizzazione di corridoi ecologici, finalizzati ad una urbanizzazione più sostenibile ed alla rigenerazione delle città (Commissione Europea 2015, Direttiva Tetti Verdi tedesca 2018). Negli ultimi anni, in Europa nord-occidentale e nei paesi nordamericani, la ricerca e l'installazione di tetti verdi sono stati oggetto di una prospera crescita (Lundholm et al. 2010, Lönnqvist et al. 2021). Finalmente, nell'attuale fase di transizione ecologica, anche in Italia sono previsti copiosi investimenti, finanziati nell'ambito del Piano Nazionale Resistenza e Resilienza (PNRR), per rendere le nostre città più sostenibili, in linea con l'obiettivo previsto dall'Agenda UE 2030 (Commissione Europea 2020). Ed è in questo contesto, che anche nel nostro paese è auspicabile lo sviluppo di grandi estensioni di superfici verdi su edifici, come già avvenuto in altri paesi europei, che potrebbero espletare funzioni quali la mitigazione dell'inquinamento atmosferico, il sequestro del carbonio, la gestione delle acque piovane nelle regioni piovose ed il risparmio idrico in quelle aride, oltre che funzioni di difesa della biodiversità di flora e fauna, supplementari alla funzione di risparmio energetico (Campiotti et al. 2019a, Campiotti et al. 2021).

Naturalmente, lo sviluppo delle infrastrutture verdi nelle aree mediterranee richiederà il reperimento e la selezione di piante specifiche, diverse da quelle utilizzate nelle coperture verdi nei climi temperati, in grado di adattarsi alle condizioni tipiche di questa zona climatica definita come "Cs" e classificata come clima temperato, con estate secca secondo la classificazione Köppen dei climi, la maggiormente utilizzata, considerando inoltre che le condizioni ambientali sui tetti possono risultare estremamente critiche (Benvenuti e Bacci 2010). Le conoscenze a tal riguardo sono, purtroppo, ancora limitate; infatti, allo stato dell'arte, le piante grasse, soprattutto specie del genere *Sedum* della famiglia delle *Crassulaceae*, sono tradizionalmente considerate le più adatte all'applicazione sui tetti verdi mediterranei, per il loro apparato radicale poco profondo, il metabolismo CAM, il loro efficiente utilizzo dell'acqua e tolleranza a condizioni di estrema siccità (Oberndorfer et al. 2007, Rowe et al. 2012).

Attualmente però, in zona mediterranea, si sta affermando una differente visione, che necessita di ulteriori conferme, rivolta a pianificare l'inclusione di maggiore biodiversità di piante erbacee nel verde pensile al fine di ottenere maggiori vantaggi ambientali. In accordo con la rivoluzione verde che guida il nuovo *Green Deal* europeo, si consiglia infatti di “rinaturalizzare” le città inserendo anche specie erbacee spontanee autoctone, provenienti da ambienti aridi e con radici poco profonde (Van Mechelen 2015), oltre alle sopramenzionate *Crassulaceae*. Già nell'ultimo decennio, anche in Italia, grazie alla Legge del 14 gennaio 2013, n. 10, che sancisce nuove “Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani”, la flora spontanea, includendo tanto specie erbacee quanto arboree, è stata individuata come una preziosa risorsa in grado offrire importanti prestazioni ambientali ed energetiche nelle nostre città. Tuttavia, al momento, le esperienze di utilizzo delle piante erbacee spontanee autoctone, specialmente dei fiori di campo ad impollinazione entomogama, negli spazi verdi urbani sono ancora pionieristici (ISPRA 2013). Si rendono pertanto necessari sia lo sviluppo di studi e ricerche per acquisire una maggiore conoscenza sulle esigenze ecologiche e fisiologiche delle piante più idonee, sia un incremento di monitoraggi sul territorio che forniscano dati aggiornati riguardanti il declino di specie botaniche e dei loro impollinatori (Dicks et al. 2021). Oggi, infatti, in relazione alla minaccia della scomparsa degli impollinatori, tali monitoraggi sono divenuti una tra le più importanti priorità in Europa e ne viene fortemente raccomandata la realizzazione al fine di poter effettuare, a posteriori, verifiche e valutazioni dei risultati dei progetti di rinaturalizzazione delle città in termini di incremento di impollinatori, in funzione della reintroduzione e salvaguardia di biodiversità botanica.

9.2 Caso studio ENEA

9.2.1 IDENTIFICAZIONE DI SPECIE ADATTE AI TETTI VERDI PER LA SALVAGUARDIA DEGLI IMPOLLINATORI

Con l'obiettivo di contrastare il declino della biodiversità con particolare riguardo anche agli impollinatori, è stata condotta un'attenta indagine bibliografica della letteratura disponibile su specie adatte ai tetti verdi estensivi che esibissero caratteristiche di resistenza a stress idrico, buona capacità di auto propagazione e di adattamento ai climi aridi tipici delle aree

mediterranee, e che, nello stesso tempo, offrirono lunghe fioriture idonee ad attrarre e sostenere gli impollinatori. A valle di tale studio sono state selezionate due specie appartenenti al genere *Echium*, rispettivamente *Echium vulgare* L. ed *Echium plantagineum* L., come adatte ed interessanti per lo studio che era proposto (Figura 1) (Piggin 1982, Klemow et al. 2002).

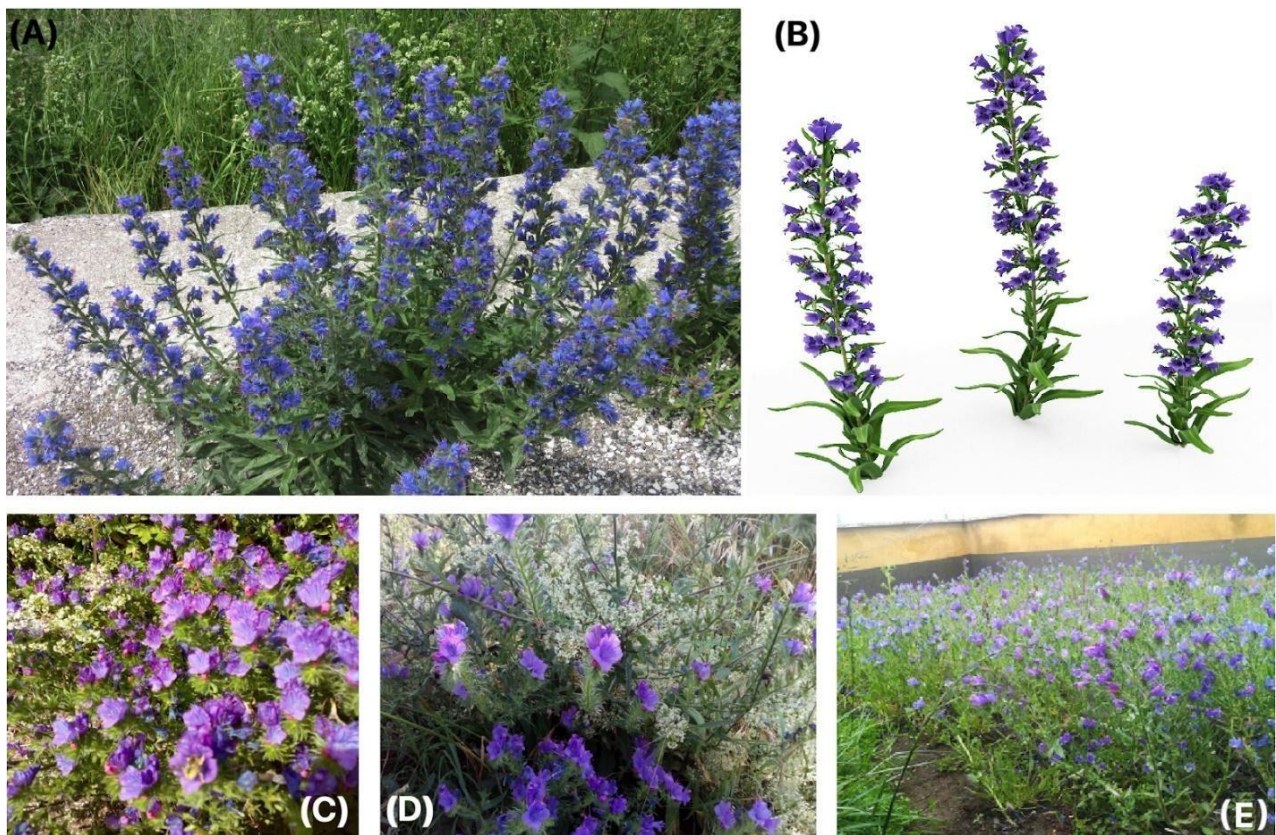


Figura 1 - (A) Fioritura di *Echium vulgare* (foto tratta da <https://itineraritrekking.com/flora-2/viperina-azzurra-echium-vulgare/>); **(B)** Immagine *Echium vulgare* 3D (foto tratta da <https://www.turbosquid.com/3d-models/echium-vulgare-3d-model-1658631>); **(C)** fioritura di *Echium plantagineum* e consociazione selvatica *Echium plantagineum* e *Galium album* Mill **(D)** nelle aree verdi presso il C.R. ENEA Casaccia; fioritura di *Echium plantagineum* sul tetto verde ENEA **(E)**.

E. vulgare L. è un'erba appartenente alla famiglia delle *Borraginaceae*, anche nota come viperina vulgare (Figura 1A-B). Si tratta di una pianta entomogama, originaria dell'Europa, dell'Asia e della Cina occidentali, data come presente nella nostra penisola (Pignatti 1982), ma rara o non comune in alcune regioni (ISPRA 2013), e nota per essere particolarmente tollerante agli stress abiotici. Essendo questa specie notoriamente utilizzata già da tempo

nei tetti verdi europei a clima temperato, la valutazione delle prestazioni di *E. vulgare* anche in un tipico tetto verde di area mediterranea è risultata di particolare interesse. Si è voluto verificare se, anche nelle estati mediterranee con condizioni ambientali più critiche per temperatura e siccità, cause di assenza di fioriture in campo a sostegno dell'entomofauna, la viperina vulgare mantenesse le tipiche fioriture estive che esibisce nei climi più temperati. Inoltre, si è voluto constatare se, in accordo con le conoscenze disponibili, questa specie potesse favorire la connettività tra diverse aree verdi urbane essendo in grado di stimolare la mobilità degli impollinatori grazie all'abbondante offerta di nettare delle sue fioriture oltre che alla sua specifica composizione (Figura 2) (Hicks et al. 2016, Rivest e Forrest 2020).

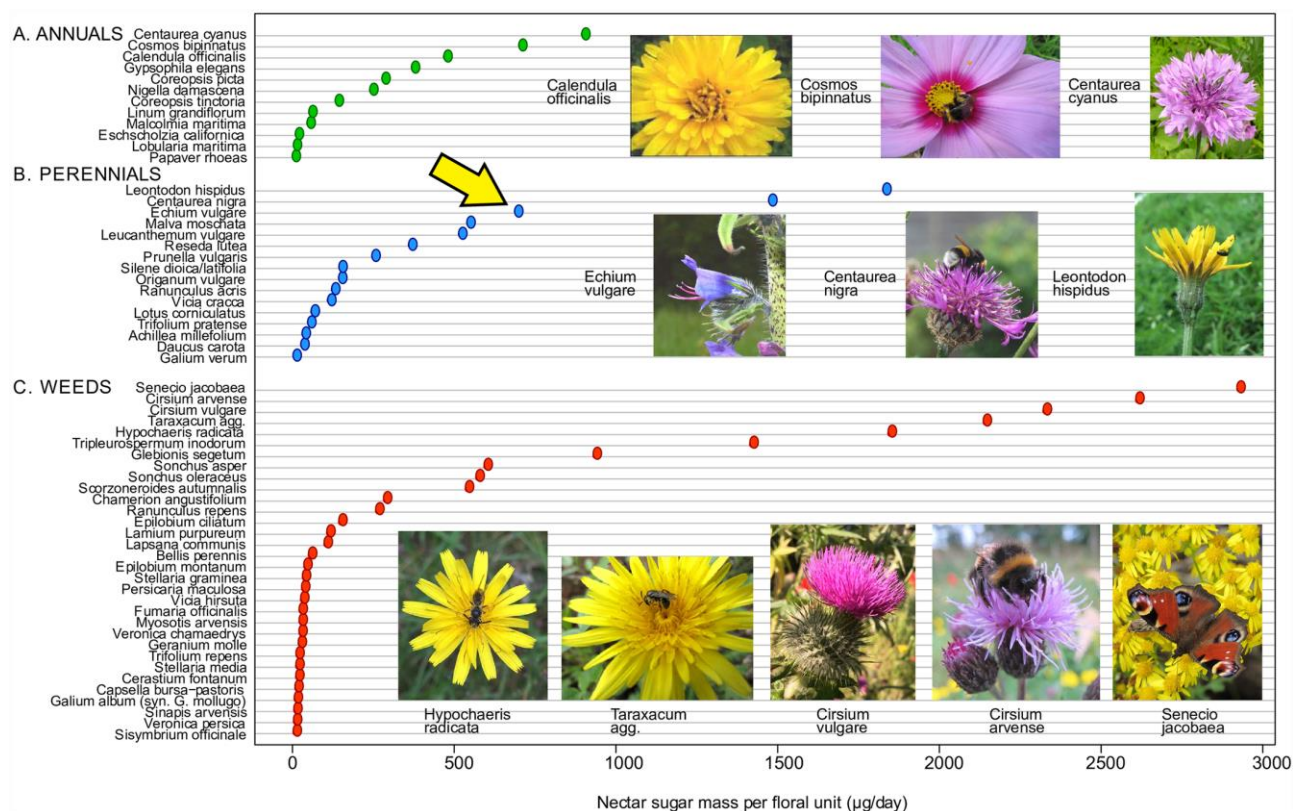


Figura 2. In base alla massa di zucchero presente nel nettare per unità di fiore, *Echium vulgare* è risultata essere, tra le numerose analizzate, la terza specie con maggiore quantità di zuccheri nel polline (foto tratta da Hicks et al. 2016).

Per effettuare tali verifiche è stata realizzata una campagna di monitoraggi in campo, in aree verdi situate nella regione Lazio, precisamente presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia ed entro i confini del Parco di Veio; oltre che in un'ampia rete di aree verdi e parchi situati nelle aree centrali della capitale. Nei monitoraggi, si è da subito verificata l'impossibilità di rintracciare la viperina vulgare, sebbene la specie fosse ancora censita come presente nel Lazio. Non avendo a disposizione esemplari di *E. vulgare* come riferimento, nel primo anno diversi esemplari rinvenuti in campo di *Echium plantagineum* (Figura 1C-E) sono stati erroneamente identificati come *E. vulgare*. Infatti, poiché le differenze tra le due specie appartenenti allo stesso genere sono esigue, la sicura identificazione deve essere fatta allo stadio di rosetta svernante (Pignatti 1982). Pertanto, tale identificazione si è resa possibile solo dopo aver reperito il seme di *E. vulgare* e dopo aver ottenuto piantine e rosette da confrontare con quelle di *E. plantagineum*. Quest'ultima specie è originaria delle regioni mediterranee e dell'Europa occidentale atlantica ed è data come molto comune nelle aree mediterranee, tanto in ambienti rurali che urbani (Figura 1C-E) (ISPRA 2013, CABI).

Dal punto di vista della forma biologica, *E. vulgare* è biennale o perenne di breve durata; diversamente, *E. plantagineum* si presenta sia come forma biologica annuale che biennale. Il monitoraggio in campo ha evidenziato la completa assenza di *E. vulgare* nei territori di osservazione e, allo stesso tempo, la presenza, seppur limitata, di *E. plantagineum*. Le osservazioni sul territorio hanno permesso di assegnare un elevato valore alle fioriture di *E. plantagineum*, sia per il loro colore ed appariscenza, che per attrattività per gli impollinatori e durata delle loro visite. L'inclusione di *E. plantagineum* nella sperimentazione sul tetto verde ENEA è stata anche suggerita dal fatto che in bibliografia questa specie non risulti ancora utilizzata né raccomandata per l'inserimento nel verde pensile ed urbano (ISPRA 2013). Inoltre, la selezione di *E. plantagineum* per questo studio è stata avvalorata anche a seguito dei risultati di successivi monitoraggi in campo, che hanno evidenziato come questa specie sia un'erba fragile, nei territori osservati, solo a causa degli sfalci dell'erba primaverili, trattandosi infatti di una specie in grado di affrontare le condizioni ambientali avverse della stagione estiva mediterranea, rese ancor più critiche dalle condizioni estreme sui tetti verdi. In particolare, indagando le performance di questa specie a livello globale, si è evidenziato che *E. plantagineum* è ben nota come specie aliena, essendo divenuta altamente infestante nelle vaste ed aride distese sabbiose dell'Australia (Piggin 1982, Parsons et Cuthbertson 2001). Probabilmente, in tali condizioni estreme, la sua diffusione

non viene controllata dalla presenza di altre infestanti proprie del suo originale areale di distribuzione, che invece alle nostre latitudini competono per la stessa nicchia ecologica, limitando le sue potenzialità invasive nel nostro paese. Nelle nostre condizioni climatiche, i risultati della sperimentazione condotta suggeriscono che *E. plantagineum* nei tetti verdi potrebbe garantire una buona copertura, in grado di autorigenerarsi stagione dopo stagione, e delle fioriture persistenti per il sostentamento di api ed impollinatori.

9.2.2 ANALISI COMPARATIVA DELLE DUE SPECIE DI ECHIUM SUL TETTO VERDE ENEA

L'ENEA, sull'edificio 92 nell'Area Capanna presso il C.R. Casaccia, situato a nord di Roma, ha sviluppato un prototipo di tetto verde estensivo, già descritto in altri lavori prodotti dal gruppo del Laboratorio di Carlo Alberto Campiotti (Campiotti et al. 2017, 2019a), ove vengono condotte diverse attività di ricerca con lo scopo di contribuire alla mitigazione dei cambiamenti climatici. La localizzazione è rappresentativa delle aree mediterranee. La superficie del tetto verde è suddivisa in diversi settori; uno di questi settori di ~8 m² è stato dedicato alla sperimentazione su specie erbacee spontanee. Il substrato del terreno (8 cm di profondità) è costituito da una miscela di granuli di origine vulcanica (lapilli lavici, pietra pomice), per garantire la leggerezza, abbinati a terriccio, compost naturale, sabbia e torba. L'irrigazione automatica è stata fornita giornalmente con un consumo idrico medio calcolato di circa 6 L/m² durante la stagione primaverile-estiva (fatta eccezione per il periodo di imposizione dello stress idrico).

Uno studio comparativo è stato condotto sul tetto verde ENEA nell'ambito di una sperimentazione di durata triennale. Le due specie di *Echium* sono state valutate in relazione a diverse caratteristiche delle piante, tra cui la morfologia dei semi, dello stadio di rosetta e dell'infiorescenza, oltre che altri tratti relativi ai fiori, alle radici e alle caratteristiche del loro ciclo biologico. Nonostante le due specie di *Echium* condividano numerosi tratti simili, si distinguono nettamente per altre caratteristiche, come ad es. la morfologia dei semi e della rosetta (Figura 3).

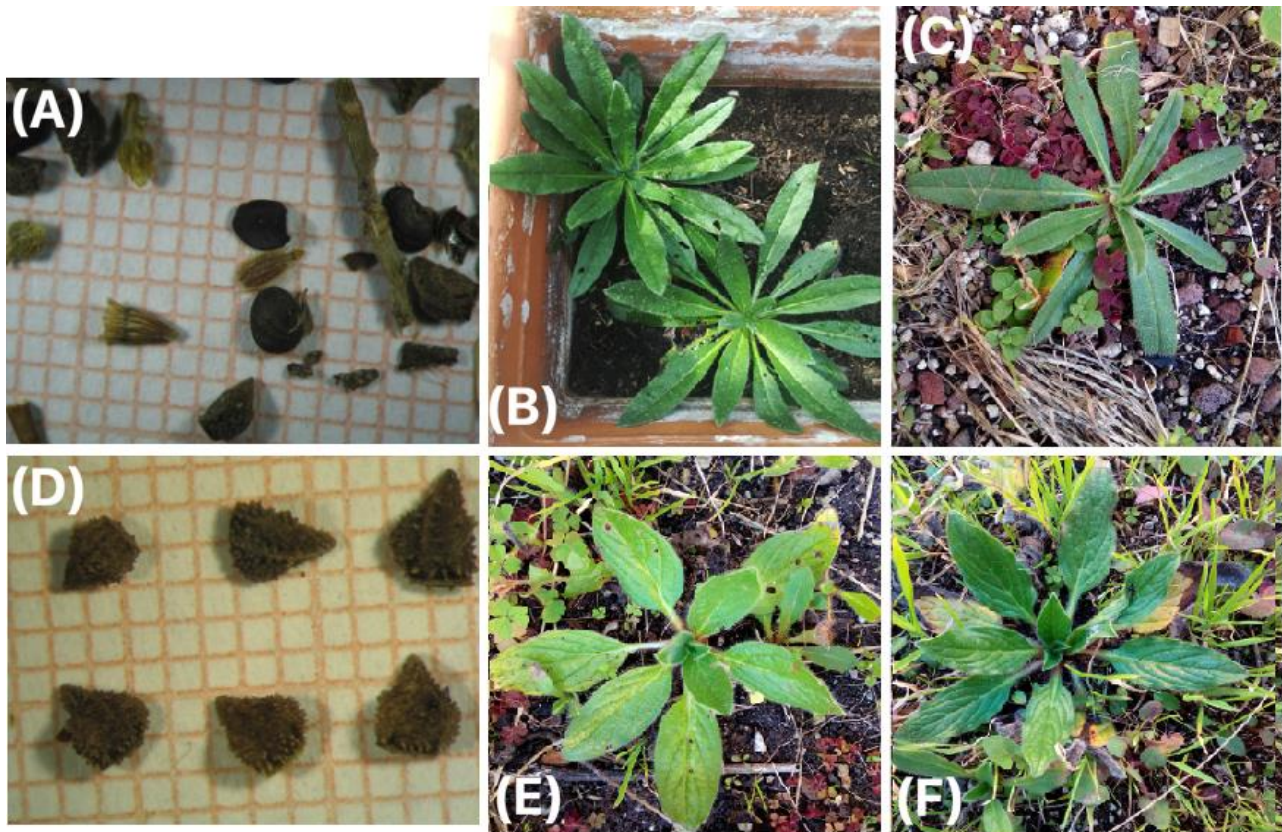


Figura 3 - Analisi morfologica comparativa tra le due specie di *Echium*. **(A)** Semi osservati al microscopio ottico e **(B-C)** rosette di *Echium vulgare*, **(D)** semi osservati al microscopio ottico e **(E-F)** rosette di *Echium plantagineum*.

Inoltre, in accordo con la letteratura, sono state osservate per *E. plantagineum* forme annuali o talvolta biennali, a seconda delle condizioni stagionali di crescita. In particolare, l'andamento della crescita delle rosette della forma biennale di *E. plantagineum* è risultato più rapido rispetto a *E. vulgare*, presentando anche dimensioni maggiori. La radice fittonante delle piante adulte di *E. vulgare* è risultata essere di maggiori dimensioni rispetto a quella di *E. plantagineum*, anche nelle condizioni, limitanti la crescita, dovute all'esiguo spessore del tetto verde ENEA. Alcuni altri risultati di tale analisi comparativa sono stati recentemente presentati al convegno nazionale "Biodiversità 2021" (Papagni et al. 2021).

Per valutare la capacità rigenerativa e il livello di resistenza alla siccità delle due specie, prima della fine della calda stagione estiva, è stato imposto un forte stress idrico sul tetto verde, interrompendo l'irrigazione per 1 mese. La risposta allo stress idrico ha determinato rapida senescenza e disseccamento delle piante. In seguito, per una valutazione complessiva dello sviluppo vegetativo a valle dello stress idrico, in relazione alla capacità

delle due specie vegetali di rientrare in vegetazione ed auto propagarsi, sono state calcolate le percentuali di copertura come indice di copertura vegetale (*vegetation coverage index*, VCI). Dopo lo stress idrico applicato a fine agosto (Figura 4A), *E. plantagineum* ha subito ripreso lo sviluppo vegetativo ad ottobre, con prime fioriture a dicembre e piena fioritura nella primavera dell'anno successivo (Figura 4B).

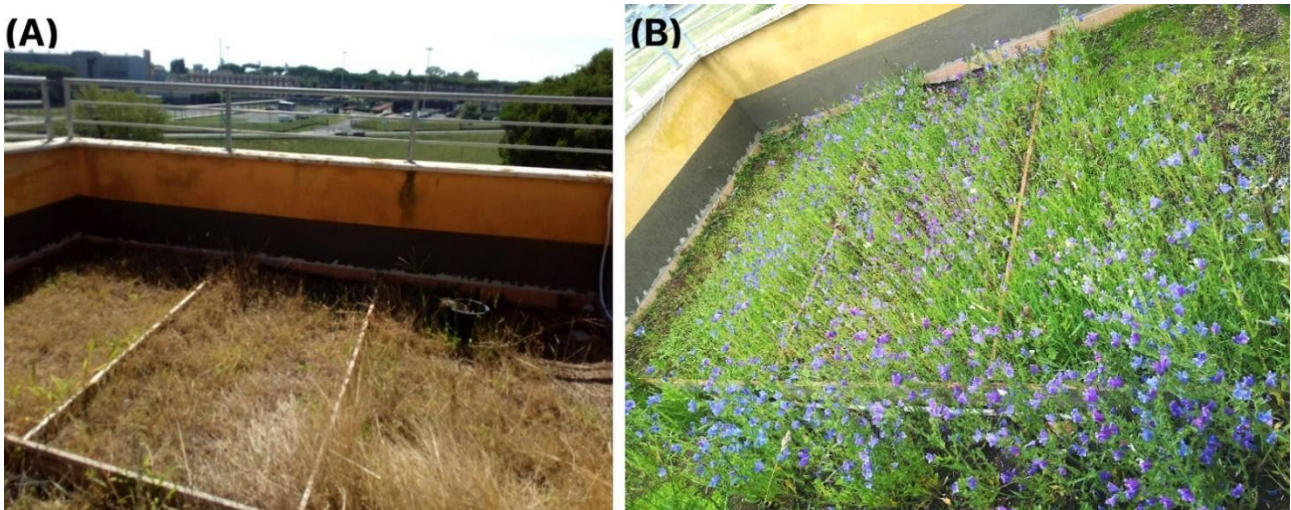


Figura 4 - (A) Aspetto del tetto verde ENEA dopo applicazione dello stress idrico a fine agosto 2019; **(B)** ripresa vegetativa ed esplosione della fioritura di *E. plantagineum* in primavera 2020.

La sperimentazione ha rivelato che *E. plantagineum*, emicriptofita e terofita annuale, pur non essendo in grado di resistere al disseccamento estivo, è una specie molto resiliente con elevata capacità di auto propagazione; infatti è riuscita a riprodurre una buona copertura verde già nell'autunno successivo allo stress idrico estivo, grazie al suo rapido ciclo biologico con produzione di semi fertili durante tutte le stagioni tranne che in pieno inverno. Inoltre, a favore dell'utilizzo di questa specie nei prati fioriti pensili, è importante riportare che durante il primo anno di sperimentazione, le piantine di *E. plantagineum*, dopo essere state trasferite sul tetto verde, sono entrate rapidamente nella fase di fioritura senza aver precedentemente sviluppato lo stadio di rosetta, completando la prima fioritura e la prima maturazione di seme già in primavera: quindi, grazie alla sperimentazione è stato rilevato questo comportamento della forma annuale, non riportato nei testi botanici, che consente un rapido sviluppo delle fioriture primaverili di prati pensili. Tale caratteristica ne costituisce un valore aggiunto per il suo utilizzo nei miscugli di seme.

Diversamente, *E. vulgare*, nell'autunno successivo allo stress idrico estivo, trattandosi di una specie emicriptofita biennale, non è riuscito a rientrare in vegetazione, né a completare la maturazione del seme, e quindi non è stato in grado di auto rigenerarsi. Nonostante ciò, *E. vulgare* è stato in grado di garantire un efficiente manto vegetale secco, di ridotto sviluppo radicale, che ha contribuito al raffrescamento estivo degli spazi interni dell'edificio sotto al tetto verde.

I principali *output* di questo studio, indicano che, in area mediterranea, *E. plantagineum* possa essere raccomandato per tetti verdi estensivi con substrati poco profondi (6-10 cm, corrispondenti ad un tetto verde *Sedum*) e per giardini pensili anche con scarsa irrigazione; mentre *E. vulgare* sia da preferire in coperture a verde estensivo o intensivo con substrato di maggiore profondità (15-20 cm), dotato di irrigazione estiva per consentire il completamento del ciclo biennale e lo sviluppo di un apparato radicale con fittone più lungo e robusto.

Si ipotizza, inoltre, che gli alti livelli di diversità genetica di *E. plantagineum*, insieme alla sua capacità di produrre metaboliti secondari difensivi, potrebbero rappresentare i fattori chiave nel determinare le strategie di successo e di diffusione di questa specie, proprio perché si rafforzano in condizioni avverse (Zhu et al. 2017). Diversamente, il declino di *E. vulgare* in alcune regioni a clima mediterraneo, si suppone che possa essere dovuto alla sua maggiore suscettibilità, derivante dalle caratteristiche del ciclo biologico biennale, all'aumento delle temperature e della siccità causato dai cambiamenti climatici.

9.2.3 VANTAGGIO DELLE FORME ANNUALI NELL'AFFRONTARE LE AVVERSITÀ DELLA STAGIONE ESTIVA

Gli esiti di questo lavoro hanno fornito dati rilevanti per la pianificazione della composizione di miscugli di semi per tetti verdi e prati pensili in ambiente mediterraneo. Generalmente si suggerisce di adottare miscele di semi che includano numerose specie con differenti cicli stagionali e differenti forme biologiche, le attuali conoscenze sulle diverse consociazioni più appropriate che possano coesistere al meglio nelle diverse regioni climatiche sono ancora insufficienti (Van Mechelen 2015).

Le metodologie di aggregazione delle specie per coltri verdi che si basano sul concetto di "*Habitat Template*" (Lundholm 2006), utilizzano gli spettri corologici e biologici dei territori geografici nativi. Tali metodologie si basano su analisi floristiche di zone climatiche casuali,

ottenute utilizzando la percentuale di diffusione dei nove gruppi ecologici, o classi di forme biologiche, del sistema Raunkiær. Tale sistema è molto usato nelle analisi floristiche poiché è in grado di fornire le percentuali delle varie forme biologiche presenti in tutte le zone pianeta che condividono le stesse caratteristiche ambientali. In particolare, lo spettro biologico della nostra Penisola mostra una massima incidenza delle terofite (T), erbacee annuali, nelle regioni più meridionali; mentre nel Nord Italia si riscontra un progressivo aumento delle forme cosiddette emicriptofite (H), erbacee biennali o perenni, che ad es. sulle Alpi vanno a costituire circa il 50%-60% delle specie spontanee alpine (Pignatti 1994, ANPA 2001). Il variare della composizione dello spettro biologico delle forme vegetali in funzione delle diverse condizioni climatiche è un segno di un adattamento alle condizioni climatiche avverse. In particolare, appare che nelle regioni centro-meridionali, dove l'estate è il periodo più critico per la sopravvivenza vegetale, il miglior adattamento sia il ciclo annuale: ogni pianta compie il proprio ciclo biologico in un solo anno, spargendo i propri semi al completamento della fioritura. Dai semi si svilupperà una nuova pianta nella stagione successiva. Pertanto, in accordo alla metodologia di aggregazione di specie secondo il modello dell'"*Habitat Template*", le specie annuali fino ad ora scarsamente considerate per l'inserimento nei tetti verdi, nonostante rappresentino un'importante percentuale della vegetazione mediterranea, dovranno essere considerate con maggior attenzione.

Nel caso studio ENEA, realizzato in condizioni estive mediterranee particolarmente calde e siccitose, si dimostra l'utilità di includere nei tetti verdi anche forme annuali maggiormente resistenti e resilienti delle forme biennali nella nostra zona climatica, proprio in accordo con le frequenze dello spettro biologico centro meridionali. I risultati di questo studio portano alle seguenti raccomandazioni: *E. plantagineum* dovrebbe essere privilegiato nei tetti verdi estensivi, di spessore ridotto, in clima mediterraneo, in associazione con *Poaceae* e/o altre graminacee selvatiche. Inoltre, la maggiore adattabilità riscontrata di *E. plantagineum* rispetto a *E. vulgare* suggerisce che, in ambiente mediterraneo, l'inserimento di piante annuali (terofite) dovrebbe essere incoraggiata di rispetto alle piante biennali e perenni (emicriptofite), che invece trovano maggior applicazione con successo nei tetti verdi del Nord Europa (Van Mechelen 2015).

9.2.4 RUOLO DELLA MANUTENZIONE DEL VERDE TRAMITE SFALCIO NEL DECLINO DI BIODIVERSITÀ

La manutenzione delle aree verdi tramite lo sfalcio di tappeti erbosi si rende necessaria quando queste siano localizzate in alcuni contesti, in quello urbano per permettere di rendere fruibili gli spazi verdi e per mantenere nel tempo il giusto livello di compattezza, di omogeneità e in genere per motivi estetici, in quello extra-urbano per evitare incendi e preparare i terreni agricoli ad ulteriori lavorazioni. Inoltre, particolari operazioni di sfalcio sono realizzate anche lungo i bordi stradali e ferroviari per la manutenzione della viabilità.

Durante i monitoraggi in campo, è stato osservato che *E. plantagineum* è rilevabile solo nell'epoca antecedente lo sfalcio dell'erba primaverile. Infatti, anno dopo anno, la sua diffusione si è ridotta drasticamente in tutte le aree soggette a sfalcio a causa della scarsa capacità di ricaccio della specie dopo il taglio dell'erba. Questo fatto ci ha fatto supporre che il taglio dell'erba primaverile possa essere, almeno in parte, responsabile della sua assenza nei territori monitorati. È possibile supporre, ma tuttavia va ancora verificato, che gli sfalci possano essere stati ancor di più causa avversa per la sua forma biennale.

In definitiva, i monitoraggi effettuati in campo e le osservazioni condotte sul tetto verde ENEA hanno permesso di identificare nel taglio dell'erba una minaccia, che pone a rischio la salvaguardia di tali specie botaniche, oltre che il sostentamento di api e di apoidei che si nutrono di nettare e polline dei loro fiori.

Un ulteriore risultato della sperimentazione effettuata è stato dunque quello di individuare specie erbacee resistenti e resilienti alle condizioni avverse dei tetti verdi pensili, ma non in grado di contrastare l'avversità dovuta al taglio del prato. Più in generale, si è dimostrato come la salvaguardia della biodiversità botanica a rischio per via delle pratiche di sfalci urbane, o pratiche agricole, possa rappresentare una straordinaria opportunità per la selezione di specie resistenti al secco ed adatte ai tetti verdi mediterranei. Infatti, i tetti verdi, per tutte le piante che soffrono le pratiche di gestione umana del territorio, rappresentano realmente ambienti protetti e ideali, in quanto a livello pensile le lavorazioni del verde necessarie a livello del terreno, sono invece controindicate anche ai fini energetici.

9.2.5 PROTEZIONE DELLA BIODIVERSITÀ VEGETALE E SALVAGUARDIA DELLE API

Il mancato ritrovamento di *E. vulgare* e la scarsa diffusione osservata per *E. plantagineum* a seguito degli sfalci primaverili dei prati hanno dimostrato la fragilità di queste specie nelle aree monitorate del Lazio, motivando l'interesse del loro inserimento in miscugli di semi per tetti verdi in area mediterranea al fine di proteggere biodiversità botanica e quella entomologica da essa dipendente. È noto che gli impollinatori forniscano una vasta gamma di benefici alla società, compreso il contributo alla sicurezza alimentare, e che ora purtroppo stiano affrontando severe minacce (Christmann et al. 2021, Dicks et al. 2021); a contrasto del loro declino, gli ecosistemi urbani si sono confermati un ambiente altamente idoneo ad ospitare e proteggere la vita e le attività dell'entomofauna impollinatrice, per la mancanza di pesticidi e prodotti utilizzati per la concia dei semi, ancora molto diffusi negli ecosistemi agricoli, nonostante sia noto che costituiscano le principali cause di morte delle api (Ostiguy et al. 2019).

Il genere *Echium* è notoriamente una specie entomogama dalle caratteristiche fiorali particolarmente attraenti per gli apoidei e per gli impollinatori in genere (Hicks et al. 2016), pertanto il valore aggiunto per l'inserimento di specie di *Echium* sul tetto verde è quello offrire una copiosa quantità di nettare e polline di specifica composizione a diversi taxa di insetti impollinatori, soprattutto api selvatiche (Rivest e Forrest 2020). Nell'ultimo anno di sperimentazione per quantificare le visite degli impollinatori sono state condotte osservazioni non strutturate. In particolare, nelle condizioni descritte, l'associazione di *E. vulgare* ed *E. plantagineum* sul tetto verde ENEA si è rivelata in grado di sostenere le visite di preziosi impollinatori selvatici sugli ornamentali fiori blu-violacei delle due specie, da marzo a settembre. Dal punto di vista della tassonomia, sono stati identificati vari apoidei, alcuni anche a livello di specie, inviando segnalazioni al progetto www.beewatching.it, mirato a fare luce sullo stato delle api in Italia (Figura 5).

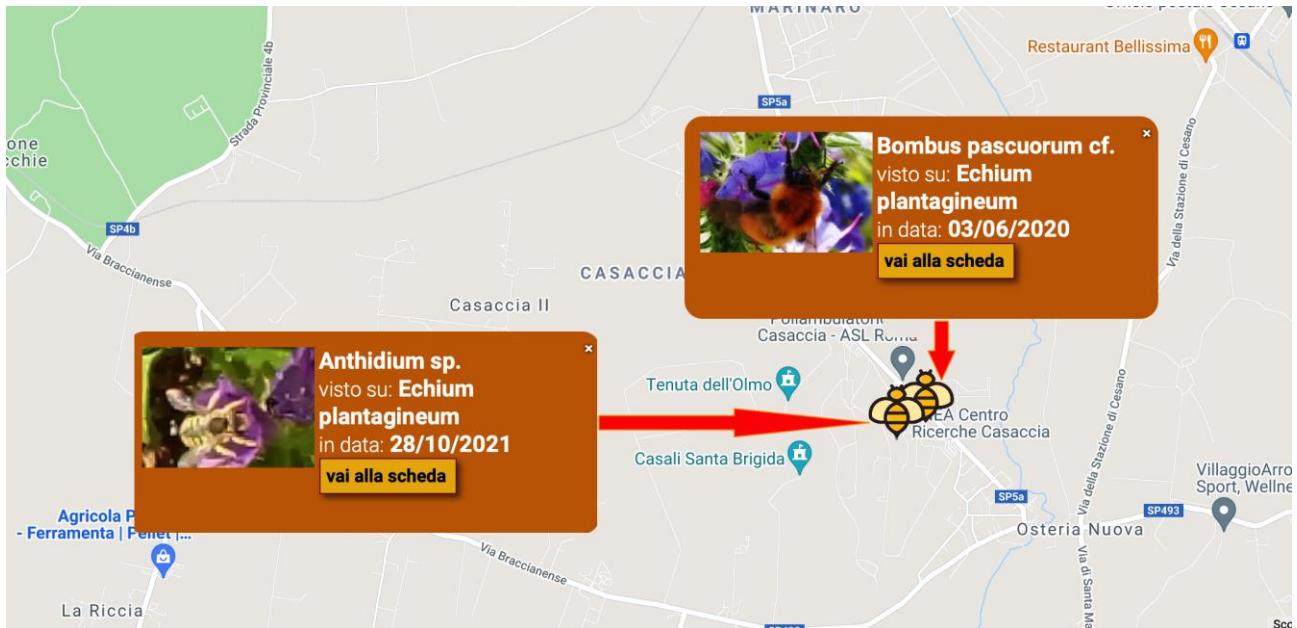


Figura 5 - Alcune api osservate e identificate sul tetto verde attraverso il sito www.beewatching.it.

Sebbene sia la morfologia florale che il profilo dei metaboliti secondari di ambedue le specie presentino un'elevata similitudine, caratteristica che fa supporre l'evoluzione di medesimi apoidei specialisti sui fiori dei due *Echium* (Rivest e Forrest 2020), le nostre osservazioni hanno invece rilevato un'attrattività per un numero maggiore di specie su *E. vulgare* rispetto a *E. plantagineum*.

9.2.6 L'OPZIONE PER UN TETTO VERDE SPONTANEO E SECCO

Dai risultati della sperimentazione condotta presso il C.R. ENEA-Casaccia emerge che tetti verdi con coperture vegetali, secche in estate, sarebbero da privilegiare in tutte quelle aree mediterranee dove il risparmio idrico costituisce un'esigenza primaria. Purtroppo, nonostante un tetto verde a prato naturale, con senescenza estiva, offra vantaggi ambientali, idrici, energetici, oltre che di costi di impianto e manutenzioni, l'opinione pubblica nazionale è ancora piuttosto scettica nell'accettazione dell'ingiallimento di tale tipologia di prato in estate (Dagenais et al. 2010). Malgrado ciò, è ben noto che un tetto verde, anche nella fase di senescenza, continui ad espletare la sua funzione isolante e, pertanto, permetta comunque un risparmio dei costi energetici per il raffrescamento estivo degli edifici (Campiotti et al. 2019b), che possono essere anche molto elevati nelle località a clima arido e sub-arido, sia in termini di impatto ambientale che energetico.

Bibliografia

- ANPA (Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente). Le piante come indicatori ambientali. Manuale tecnico-scientifico. RTI CTN_CON 1/2001. Disponibile alla pagina web https://www.caibergamo.it/sites/default/files/Piante_indicatori_ambientali.pdf
- Benvenuti S, Bacci D. Initial agronomic performances of Mediterranean xerophytes in simulated dry green roofs. *Urban Ecosyst.* 2010, 13, 349-363. <https://doi.org/10.1007/s11252-010-0124-9>
- CABI. Invasive Species Compendium. <http://www.cabi.org/ISC>
- Campiotti CA, Campiotti A, De Rossi P, Gatti L, Fiagnacovo G, Mariani S, Latini A, Sperandei M. Le infrastrutture verdi per migliorare l'efficienza energetica degli edifici e la qualità del microclima nelle aree urbane. Contributo orale per la Sessione 27: Biodiversità e forme di resilienza, pag. 248. Atti del convegno "Biodiversità 2021 – Agricoltura, Ambiente e salute", XIII Convegno Nazionale sulla Biodiversità, 7-9 settembre 2021, Foggia. Disponibile alla pagina web <https://drive.google.com/file/d/1-OjoWIYCRubnt6H8DkwAhe-Tg6jF-R2l/view>
- Campiotti CA, Scibetta C, Caltabellotta N, Consorti L, Joustas A. Green roofs for the energy and environmental sustainability of buildings. *Review of Studies on Sustainability* 2019a, 2, 27-11. ISSN 2239-1959.
- Campiotti CA, De Rossi P, Giagnacovo G, Latini A, Nencini L, Pace S, Sperandei M. Infrastrutture "verdi" per migliorare l'efficienza energetica degli edifici e la qualità del microclima nelle aree urbane. Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PAR2019/042. Settembre 2019b. Disponibile alla pagina web https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2019-2021/tecnologie-efficienza-risparmio-edifici/report-rds_ptr_2019_042.pdf
- Campiotti CA, Giagnacovo G, Latini A, Margiotta F, Nencini L, Pazzola L., et al. Le coperture vegetali per la sostenibilità energetica ed ambientale degli edifici. Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PAR2016/075. Settembre 2017. Disponibile alla pagina web https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/edifici-intelligenti/rds_par2016_075.pdf
- Christmann S, Bencharki Y, Anougmar S, Rasmont P, Smaili MC, Tsivelikas A, et al. Farming with Alternative Pollinators benefits pollinators, natural enemies, and yields, and offers transformative change to agriculture. *Sci. Rep.* 2021, 11, 18206. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97695-5>
- Commissione Europea. EU Biodiversity Strategy for 2030. Bringing nature back into our lives. COM/2020/380 final, 2020. Disponibile alla pagina web <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1590574123338&uri=CELEX:52020DC0380>
- Commissione Europea. Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities. Rapporto finale del gruppo di Esperti Horizon 2020 su "nature-based solutions and re-naturing cities". 2015. Disponibile alla pagina web <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fb117980-d5aa-46df-8edc-af367cddc202>
- Dachbegrünungsrichtlinien (Direttiva sui Tetti Verdi). Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltungen von Dachbegrünungen. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL). 2018.
- Dagenais D, Gagnon C, Pelletier J.L. Development of design criteria to improve aesthetic appreciation of extensive green roofs (EGR). *Acta Hort.* 2010, 881, 703-708. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.881.115>
- Dicks LV, Breeze TD, Ngo HT, Senapathi D, An J, Aizen MA, et al. A global-scale expert assessment of drivers and risks associated with pollinator decline. *Nat. Ecol. Evol.* 2021, 5, 1453-1461. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01534-9>
- Hicks DM, Ouvrard P, Baldock KCR, Baude M, Goddard MA, Goddard MA, et al. Food for pollinators: quantifying the nectar and pollen resources of urban flower meadows. *PLOS ONE* 2016, 11, e0158117. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158117>
- ISPRA (Istituto superiore per la protezione la ricerca ambientale). Piante e insetti impollinatori: un'alleanza per la biodiversità. Serie Rapporti 350/2021. ISBN 978-88-448-1066-5. Disponibile alla pagina web https://development.isprambiente.gov.it/files2021/pubblicazioni/rapporti/rapporto-ispra-350_21.pdf
- ISPRA (Istituto superiore per la protezione la ricerca ambientale). Specie erbacee mediterranee per la riqualificazione di ambienti antropici: Stato dell'arte, criticità e possibilità di impiego. Manuali e Linee

- Guida 86/2013. ISBN 978-88-448-0590-6. Disponibile alla pagina web https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/manuali-lineeguida/manuale_86_2013.pdf
- Klemow KM, Clements DR, Threadgill PF, Cavers PB The biology of Canadian weeds. 116. *Echium vulgare* L. Can. J. Plant Sci. 2002, 82, 235-48. <https://doi.org/10.4141/P01-058>
 - Lönnqvist J, Hanslin HM, Johannessen BG, Muthanna TM, Viklander M, Blecken, G. Temperatures and precipitation affect vegetation dynamics on Scandinavian extensive green roofs. 2021, Int. J. Biometeorol. 65, 837-49. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02060-2>
 - Lundholm JT, Macivor JS, Macdougall Z, Ranalli M. Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions. 2010 PLOS ONE, 5, e9677. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009677>
 - Lundholm JT. Green roofs and facades: a habitat template approach. Urban Habitats 2006, 4, 1. ISSN 1541-7115.
 - Nicole W. Pollinator power: Nutrition security benefits of an ecosystem service. Environ. Health Perspect. 2015, 123, A210–15. <https://doi.org/10.1289/ehp.123-A210>
 - Oberndorfer E, Lundholm J, Bass B, Coffman RR, Doshi H, Dunnett N, Gaffin S, Köhler M, Liu KKY, Rowe B. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. BioScience. 2007, 57, 823-33. <https://doi.org/10.1641/B571005>
 - Ostiguy N, Drummond FA, Aronstein K, Eitzer B, Ellis JD, Spivak M, et al. Honey bee exposure to pesticides: a four-year nationwide study. Insects 2019, 10, 13. <https://doi.org/10.3390/insects10010013>
 - Papagni I, Latini A, Gatti L, De Rossi P, Giagnacovo G, Campiotti CA, Sperandei M, Serafini M, Mariani S. Studio del genere *Echium*: suo utilizzo nel verde urbano pensile. Contributo poster per la Sessione 28: Biodiversità e forme di resilienza, pag. 258. Atti del convegno “Biodiversità 2021 – Agricoltura, Ambiente e salute”, XIII Convegno Nazionale sulla Biodiversità, 7-9 settembre 2021, Foggia. Disponibile alla pagina web <https://drive.google.com/file/d/1-OjoWIYCRubnt6H8DkwAhe-Tg6jF-R2l/view>
 - Parsons WT, Cuthbertson EG. Noxious weeds of Australia (2nd edn). 2001, CSIRO Publishing, Collingwood. ISBN 0-643-06514-8.
 - Piggin CM The biology of Australian weeds. 8. *Echium plantagineum* L. J. Australian Inst. Agric. Sci. 1982, 48, 3-16. ISSN 0045-0545.
 - Pignatti S. Ecologia del paesaggio. UTET, Torino, 1994.
 - Pignatti S. Flora d'Italia. Edagricole, Bologna, 1982.
 - Rivest S, Forrest JRK. Defence compounds in pollen: why do they occur and how do they affect the ecology and evolution of bees? New Phytol. 2020, 225, 1053-1064. <https://doi.org/10.1111/nph.16230>
 - Rowe DB, Getter KL, Durhman AK. Effect of green roof media depth on Crassulacean plant succession over seven years. Landsc. Urban Plan. 2012, 104, 310-19. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.11.010>
 - Van Mechelen C. Nature as a template for a new concept of extensive green roofs. Agricultural sciences. 2015. Université d'Avignon. English. NNT: 2015AVIG0334. 2015. Disponibile alla pagina web <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01252839>
 - Zhu X, Weston PA, Skoneczny D, Gopurenko D, Meyer L, Lepschi BJ, et al. Ecology and genetics affect relative invasion success of two *Echium* species in southern Australia. Sci. Rep. 2017, 7, 42792. <https://doi.org/10.1038/srep42792>

10 ARCHITETTURA VERDE COME STRATEGIA DI MITIGAZIONE/ADATTAMENTO DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO: ATTIVITÀ SULLA CONCENTRAZIONE DI CO₂ ATMOSFERICA (a cura di *Maria Sperandei, Arianna Latini, Patrizia De Rossi, Lorenzo Gatti, Rosario Muleo*)

Come è ampiamente noto la concentrazione atmosferica dell'anidride carbonica (CO₂) sta aumentando in modo costante (IPCC, 2014), *in primis* a causa delle attività legate al settore energetico, ed è passata col tempo dai 315 ppm degli anni '50 ai circa 414 ppm di oggi, media mensile di ottobre 2021 riportata dall'Osservatorio del NOAA di Mauna Loa (www.esrl.noaa.gov). L'innalzamento di anidride carbonica è parte cruciale del riscaldamento globale in atto, per cui gran parte del dibattito sulla mitigazione del clima si è concentrata su come agire per ridurre la concentrazione della CO₂ nell'atmosfera. Secondo il programma delle Nazioni unite per l'ambiente (UNEP) il settore edilizio è responsabile del 36% delle emissioni di CO₂ e del 40% del consumo di energia (www.unenvironment.org). In larga misura questa energia viene utilizzata per la climatizzazione degli edifici tramite l'utilizzo degli impianti di riscaldamento e raffreddamento. Per questo motivo la nuova direttiva 2018/844/UE (Direttiva CEE 30/05/2018) che aggiorna sia la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia sia la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica promuove l'uso di nuovi materiali e di nuove soluzioni nella progettazione degli edifici con l'obiettivo di renderli "Nearly Zero Energy Building" (NZEB). Alla luce di quanto detto, elementi ecologici strutturali come giardini pensili e muri verdi suscitano sempre più interesse come sistemi di adattamento/mitigazione del cambiamento climatico, in quanto possono contribuire alla riduzione delle emissioni di CO₂ sia in modo diretto attraverso la fotosintesi che indiretto ombreggiando gli edifici, deviando le radiazioni solari e rilasciando umidità nell'atmosfera, tutte attività che diminuiscono il fabbisogno energetico degli edifici e quindi le emissioni di CO₂ (Figura 1).

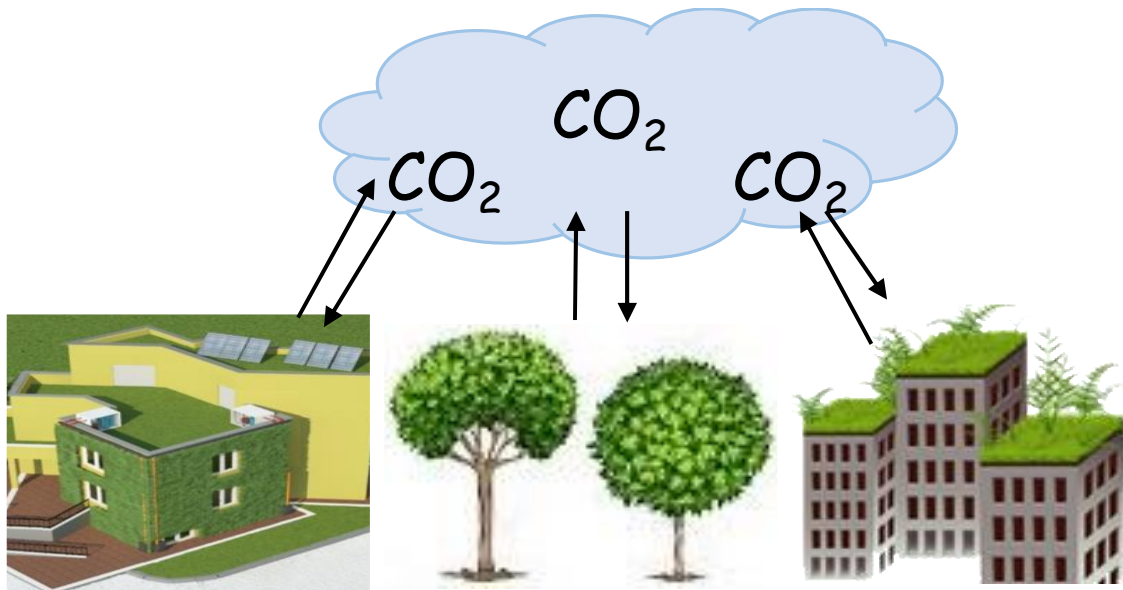


Figura 1 Strutture verdi come piante e alberi, scambiano CO₂ con l'ambiente permettendo di ridurre le emissioni in atmosfera

10.1 Criteri per la scelta di specie vegetali idonee al sequestro di carbonio

L'estensione delle aree verdi in ambiente urbano viene ormai considerata una soluzione, vantaggiosa e sostenibile per la riduzione del consumo di energia e per la mitigazione dei cambiamenti climatici. L'integrazione della vegetazione negli edifici, in passato adottata principalmente con finalità estetiche, oggi è fortemente caldeggiata anche per ragioni ambientali ed economiche (Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs (FLL), Germany 2018; UNI 11235, Italy 2015; ASTM E 2400, USA 2006). I tetti e le pareti verdi sono solitamente le due alternative utilizzate in architettura per integrare la vegetazione sugli edifici. Entrambi i modelli strutturali sono efficienti dal punto di vista energetico e ambientale ed ecocompatibili verso standard di costruzione a basse/zero emissioni di carbonio.

La vegetazione presente sulle strutture verdi svolge un ruolo decisivo nella rimozione diretta della CO₂ dall'atmosfera grazie al processo fotosintetico (Shafique *et al.*, 2020; Zaid *et al.*, 2018; Pugh *et al.*, 2012).

Tuttavia, occorre tener presente che l'assorbimento della CO₂ è influenzato sia dalle condizioni ambientali (temperatura, irraggiamento, umidità etc.), sia dalle caratteristiche

delle specie vegetali (superficie fogliare, tassi di crescita, etc.) (Zhang et al., 2019; Besir et al., 2018). La scelta della struttura verde va quindi fatta, rispetto a tutte le sue componenti, tenendo ben presenti la morfologia e le condizioni ambientali dell'area urbana in cui va inserita.

Gli ecosistemi bio-artificiali come i tetti (Oberndorfer et al., 2007) e le pareti verdi (Manso and Castro-Gomes, 2015) dovrebbero fornire, per quanto possibile, una serie di servizi ecosistemici tra cui il sequestro della CO₂. Considerato che numerosi studi sia teorici che sperimentali suggeriscono che l'insieme delle comunità vegetali presenti negli ecosistemi naturali grazie alle loro diverse caratteristiche funzionali influenzano e stabilizzano il sequestro della CO₂ (Keenan and Williams, 2018; Daba and Dejene, 2018), la scelta delle piante con specifiche proprietà è il principale fattore da considerare nella progettazione di una infrastruttura verde con questa finalità (Figura 2). Inoltre, considerato che in ogni regione è presente un gran numero di specie vegetali che può essere utilizzato per le strutture verdi associate agli edifici, è opportuno selezionare le piante in base a tratti generali di adattamento che generano la funzionalità in modo da ottimizzare le prestazioni della struttura verde rispetto alle condizioni ambientali dell'area urbana scelta (Verheijen et al., 2016; Kattge et al., 2011).

Alcune caratteristiche da valutare nella selezione valgono per tutte le specie considerate:

- resistenza ad agenti inquinanti,
- resistenza ad agenti patogeni e parassiti,
- frequenza di manutenzione,
- specifici fabbisogni irrigui.

Altri aspetti sono vincolati alle caratteristiche fisiologiche e morfologiche delle piante e al servizio eco-sistemico che si desidera (Kuronuma and Watanabe, 2016; Osborne et al., 2014; Lundholm et al., 2015).



Figura 2 - Schema dei tratti funzionali e dei processi chimico-fisici che favoriscono il sequestro e la diminuzione della CO₂ atmosferica.

Le piante in base al processo fotosintetico svolto per fissare la CO₂ vengono classificate come C₃, C₄, CAM. L'efficienza nell'assorbimento del carbonio varia in relazione al tipo di percorso (anche qui parlerei di sistema) fotosintetico.

Piante C₃: queste piante mantengono aperti gli stomi durante il giorno per consentire la fissazione della CO₂, questo determina un continuo rilascio d'acqua attraverso la traspirazione. Con temperature elevate per evitare il rischio di disidratazione chiudono gli stomi con conseguente diminuzione dell'attività fotosintetica. Questo tipo di fotosintesi è effettuato dalla maggior parte delle piante in natura. Le piante C₃ occupano principalmente aree con temperature e intensità della luce moderate (climi temperati).

Piante C₄: queste piante presentano un sistema spazialmente separato di cattura e pompaggio della CO₂ che ne rende più efficiente il processo fotosintetico. Le piante C₄ possono eseguire la fotosintesi anche quando gli stomi sono chiusi e con intensità di luce molto elevate e basse concentrazioni di CO₂. Queste caratteristiche funzionali consentono loro di sopravvivere anche in ambienti caratterizzati da elevate temperature ed elevate intensità di luce con ridotta disponibilità idrica.

Piante CAM: queste piante attuano un ciclo di tipo C₄ ma separato nel tempo. La fotosintesi CAM agisce aprendo gli stomi durante la notte per assorbire CO₂ e immagazzinarla sotto forma di acido organico nei vacuoli delle cellule. Durante il giorno gli stomi rimangono chiusi, riducendo la perdita d'acqua per traspirazione, mentre l'acido organico immagazzinato viene decarbossilato producendo la CO₂ che entra nel normale

processo fotosintetico. Le percentuali di assimilazione giornaliera del carbonio da parte di una pianta CAM sono da 1/2 a 1/3 di quelle delle specie non CAM. Le specie CAM hanno meno capacità di catturare la CO₂ ma sono in grado di sopravvivere anche a condizioni estreme.

L'indice di area fogliare (LAI) di una pianta o di un ecosistema di piante (Bréda, 2008), definito come il rapporto tra l'area totale delle foglie e la superficie del terreno, è una delle variabili più utilizzate per caratterizzare e misurare la quantità di fogliame di una chioma vegetale (canopy) (Goret, 2019). Questa variabile determina la dimensione dell'interfaccia pianta atmosfera ed è direttamente correlata all'efficienza di vari processi chimico-fisici come la fotosintesi, la traspirazione, la respirazione, la riflessione e la rifrazione della radiazione solare incidente (questi sono molto più correlati ed inoltre sono più coerenti con le finalità di questo contesto). Quindi, il LAI appare come una variabile chiave in molti modelli che descrivono le interazioni vegetazione-atmosfera, in particolare per quanto riguarda i cicli del carbonio e dell'acqua. L'indice di area fogliare viene utilizzato anche per comprendere meglio la dinamica dei cambiamenti della vegetazione e l'impatto dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi. I valori tipici di LAI vanno da 1,0 per piante erbacee a >10 per cespugli e alberi, normalmente oscillano tra 2 e 6. Maggiore è questo valore maggiore è la capacità di assorbimento della CO₂.

Tetti verdi

Il tetto verde è un ecosistema suolo-pianta, abbastanza presente nelle aree urbane, che può avere funzioni ecologiche simili a quelle legate agli ecosistemi naturali. Il tetto verde può contribuire alla mitigazione del clima urbano e al miglioramento della qualità dell'aria grazie al sequestro della CO₂ mediante la fotosintesi (Chi-Feng, 2015; Getter et al., 2009; Kuronuma et al., 2018; Li et al., 2010). In teoria, numerose specie vegetali possono essere utilizzate per le applicazioni a tetto verde, a condizione che siano adatte al clima locale, al substrato utilizzato e fornite di un'adeguata irrigazione. Nondimeno visto che i tetti verdi possono essere soggetti a condizioni ambientali difficili per effetto di eventi climatici come la mancanza di precipitazioni durante determinati periodi dell'anno, le alte temperature per

irraggiamento, l'intensità elevata della luce e del vento, solo poche specie sono state utilizzate nella pratica realizzativa. *Sedum* è il genere più utilizzato grazie alla sua resilienza in condizioni estreme. Al genere *Sedum* appartengono essenzialmente specie CAM, che come esplicitato in precedenza sequestrano meno CO₂ rispetto alle piante C3 o C4. Le piante erbacee, le piante succulente e gli arbusti striscianti sono le altre tipologie comunemente utilizzate per un'ampia vegetazione del tetto verde. Aumentare il numero e il tipo di specie in questi sistemi, selezionando specie appartenenti a differenti gruppi funzionali (ad es. piante grasse, graminacee ed erbacee C3, C4 e leguminose) permetterebbe di trattare i tetti verdi come comunità ecologiche e di ottimizzarne le prestazioni a breve e lungo termine. Ci sono pochi studi che esaminano la rilevanza dei tratti fisiologici e morfologici e la competenza per il sequestro del carbonio nelle piante impiegabili nei tetti verdi. Alcuni di questi indicano che un aspetto importante nel migliorare le prestazioni del tetto verde nel sequestro del carbonio è la densità delle foglie della vegetazione.

Pareti verticali

Diversamente dai tetti verdi l'utilizzo delle pareti è una pratica meno consolidata malgrado potenzialmente abbiano più effetto sul sequestro della CO₂ e sulla mitigazione del clima visto che la superficie delle pareti è sempre maggiore dell'area del tetto (Marchi, et al., 2015; Pérez-Urrestarazu et al., 2015; Pérez et al., 2014). Dal punto di vista architettonico i sistemi di supporto progettati per la vegetazione verticale sono molteplici e il termine generalmente usato di "verde verticale" non ne identifica nello specifico nessuna. Le tecniche più utilizzate per inverdire le facciate degli edifici sono la **green façade** (facciata verde) e il **living wall** (muro verde). Una facciata verde avrà generalmente piante rampicanti radicate nel terreno o in vaso, che si intrecciano dentro e intorno a una struttura a graticcio (maglie, fili o cavi) che viene fissata alla facciata. Diversamente i muri verdi è previsto l'utilizzo di elementi modulari in materiali inorganici, dove di solito sono sistemate delle tasche nelle quali viene predisposto il terriccio e impiantata l'essenza vegetale selezionata. I muri verdi offrono più opzioni per la scelta delle piante, gli arbusti e le piante erbacee sono le più comuni. Le piante utilizzate sui muri verdi sono sostanzialmente specie sempreverdi mentre quelle utilizzate

per le facciate verdi possono essere decidue o sempreverdi. Diversi studi mettono in evidenza che nel caso in cui si scelgano piante decidue deve essere presa in considerazione anche l'influenza sull'edificio durante i periodi di transizione, cioè primavera e autunno. Infatti, foglie di specie diverse crescono in momenti diversi e con velocità diverse durante la primavera, e non tutte le specie perdono le foglie nello stesso momento durante l'autunno.

Come per il tetto verde, la chioma, la struttura della chioma e un elevato indice fogliare delle piante scelte sono i principali fattori che contribuiscono positivamente al sequestro di CO₂. Chiaramente oltre al clima locale e all'orientazione della parete va valutata anche la fisiologia delle piante.

10.2 Caso studio ENEA nel C.R. Casaccia: CO₂ assorbita dalle essenze vegetali

L'obiettivo di questo studio è di verificare e quantificare sperimentalmente le prestazioni ambientali di una struttura di inverdimento verticale, posizionata sulle facciate sud-est e sud-ovest di un edificio (Figura 3) all'interno del centro di ricerca Casaccia (Pérez et al., 2017). Tramite l'uso di specifici sensori, vengono monitorati una serie di parametri microclimatici: temperatura ed umidità relativa dell'aria, temperature superficiali delle pareti schermate e non schermate dalla coltre vegetale, radiazione solare incidente, CO₂ assorbita dalle essenze vegetali. I risultati consentono di evidenziare il potenziale contributo delle pareti verdi all'efficienza energetica dell'edificio e di fornire informazioni sui benefici ambientali offerti agli occupanti dell'edificio. La definizione dell'entità dei benefici offerti dalle strutture verdi può aiutare a sviluppare il loro inserimento nelle aree urbane motivando strutture pubbliche e privati cittadini a mutare atteggiamento nei confronti di soluzioni con maggiore costo realizzativo e manutenzione.



Figura 1. Struttura verde realizzata presso il C.R. ENEA Casaccia

Le pareti verdi sono state installate su un edificio situato all'interno del Centro "Casaccia" ENEA. Il sito sperimentale è situato a nord di Roma (latitudine: $42^{\circ}02'36''$, longitudine: $12^{\circ}18'28''$) e ha un clima mediterraneo classificato come CSA, inverni miti ed estati da calde a molto calde, dal sistema Köppen-Geiger (Peel et al. 2007). Il progetto ha previsto l'uso di piante a comportamento rampicante e a sviluppo verticale e decombente. La lista di piante scelte ha compreso sia specie sempreverdi che caducifoglie. Sono state inoltre inserite sia piante autoctone della vegetazione mediterranea sia piante naturalizzate nei nostri climi, infine sono state considerate anche piante a valenza alimentare e usate nei paesi del mediterraneo da tempi immemorabili quali la vite.

Specie Botanica	Tipologia di pianta	
<i>Lonicera japonica</i> Thumb "Hall' prolific"	Rampicante/semperverde	alloctona naturalizzata
<i>Partenocissus quinquefolia</i> L. Planch	Rampicante/decidua	alloctona naturalizzata
<i>Edera helix</i> L.	Rampicante/semperverde	autoctona
<i>Trachelospermum jasminoides</i> Lindl. Lem	Rampicante/semperverde	alloctona naturalizzata
<i>Vitis vinifera</i> L.	Rampicante/decidua	autoctona mediterraneo
<i>Solanum jasminoides</i>	Rampicante/ semperverde	alloctono
<i>Wisteria sinensis</i> (Sims) Sweet	Rampicante/decidua	alloctona naturalizzata
<i>Rosmarinum officinalis</i> L.	Arbusto/ semperverde	autoctono mediterraneo

Tabella 1. Specie selezionate

Specifici sensori associati ad un *data logger* sono stati utilizzati per acquisire in continuo una serie di parametri ambientali.

In Figura 2 sono riportati il prospetto della struttura di supporto del verde, la sezione della parete con evidenziati i sensori posizionati ed il dettaglio dei sensori.

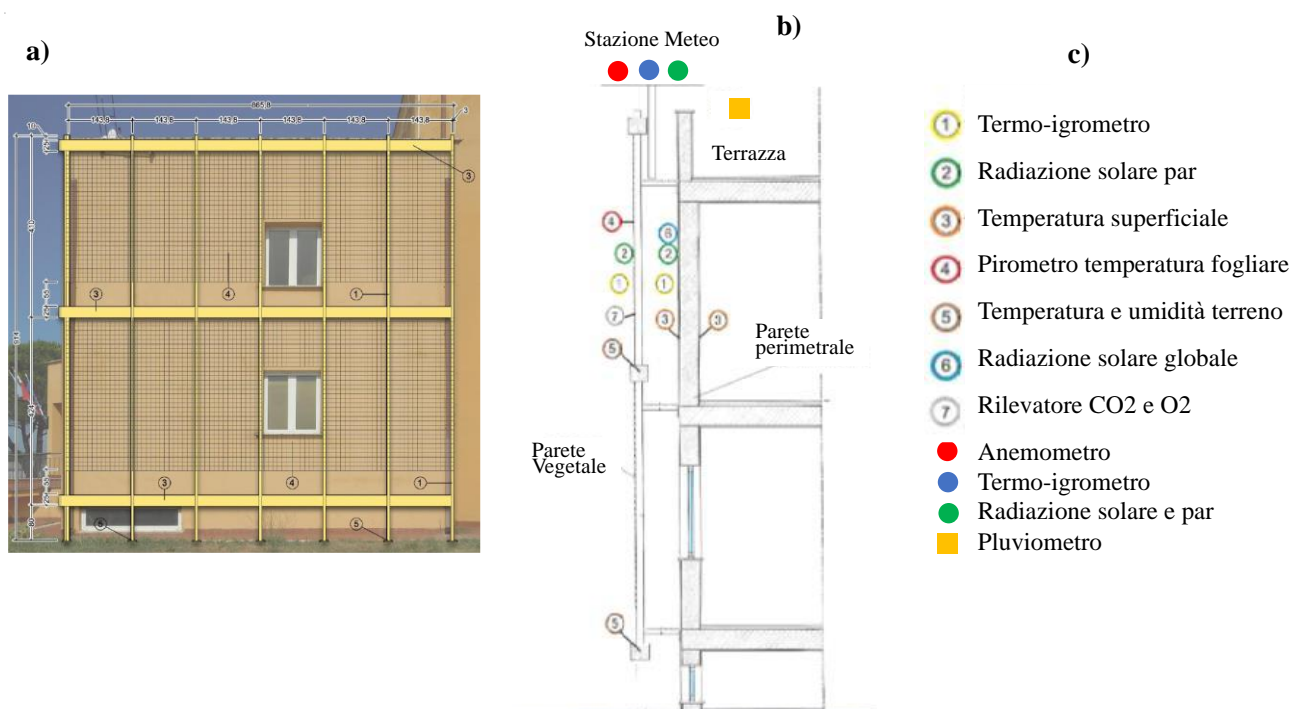


Figura 4 - a) Prospetto della struttura di supporto del verde; b) Sezione della parete con evidenziati i sensori posizionati; c) Dettaglio dei sensori

Nella figura 5, per rendere evidente la risposta fisiologica delle piante al variare della durata del giorno, viene rappresentato l'andamento, durante le 24h, della concentrazione di CO₂ e quello della PAR (*photosynthetically active radiation*) che misura la radiazione solare effettivamente disponibile per la fotosintesi. I due parametri PAR e valore della CO₂ sono associati al processo fotosintetico delle piante e quindi alla funzionalità delle essenze vegetali rispetto al sequestro di CO₂. Confrontando gli andamenti di un mese invernale e di un mese estivo (febbraio e luglio) si vede che all'aumentare delle ore di luce (PAR) aumentano le ore in cui la concentrazione di CO₂ si mantiene più bassa. In conclusione, partendo dai dati ottenuti dalla campagna di rilevamento del 2020 possiamo affermare che l'uso delle facciate verdi è positivo nell'azione esercitata sul controllo della concentrazione della CO₂ nell'ambiente circostante l'edificio. Probabilmente il sito sperimentale già ricco di vegetazione ha reso meno evidente l'effetto sulla concentrazione dovuto alla parete verde.

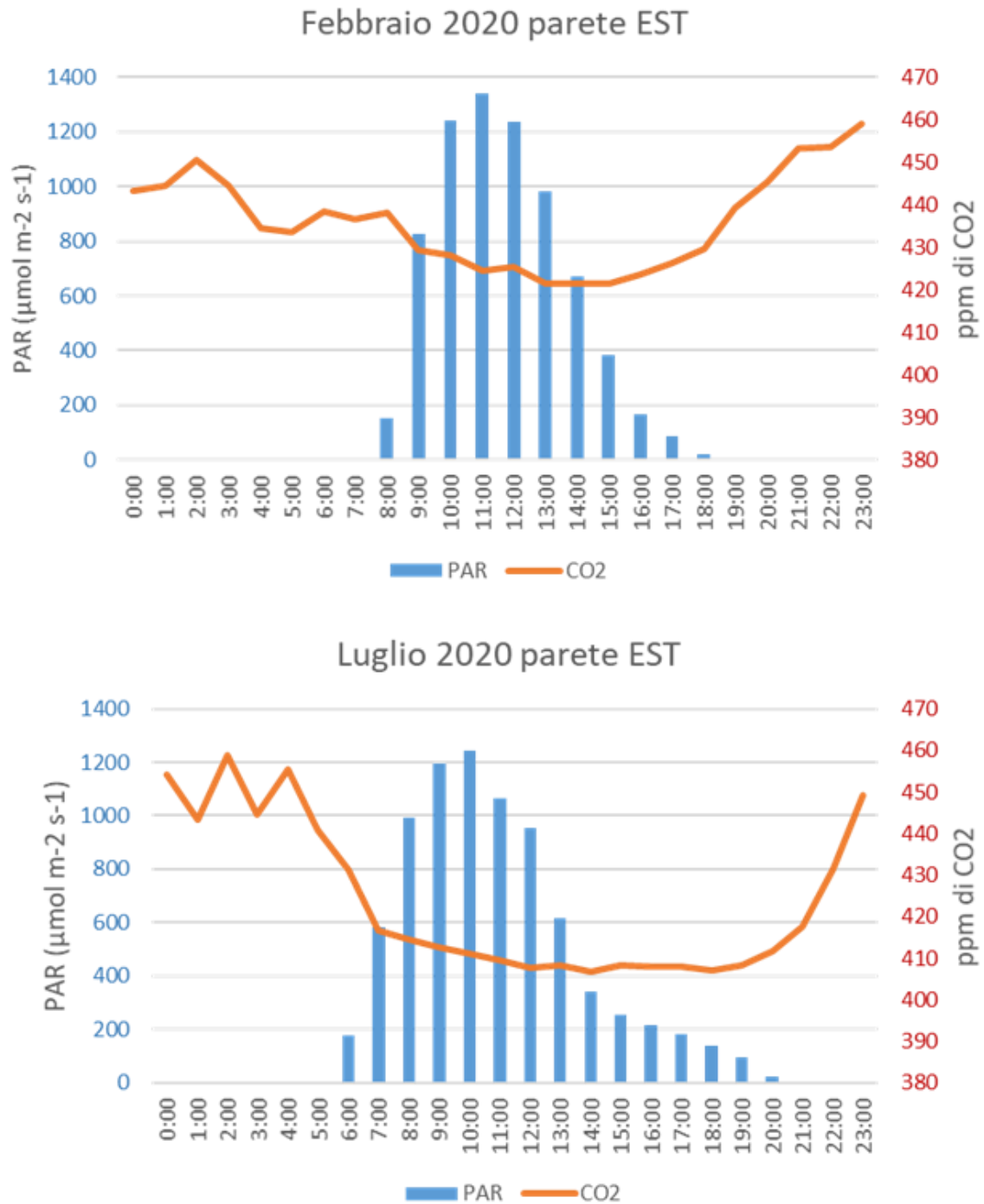


Figura 5 - Andamento durante le 24h della concentrazione di CO₂ e PAR rilevate nelle settimane dal 10 al 16 di ciascun mese, anno 2020.

Bibliografia

- ASTM E 2400, 2006. Standard Guide for Selection, Installation, and Maintenance of Plants for Green Roof Systems. ASTM International, West Conshohochen, PA 19428-2959, United States
- Besir A. B.; Cuce E. Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018) 915–939 <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Bréda N.J.J. Leaf Area Index General Ecology 2008 Elsevier
- Chi-Feng Chen A Preliminary Study on Carbon Sequestration Potential of different green roof plants *International Journal of Research Studies in Biosciences (IJRSB)* (2015) 3(5) 121-129
- Daba M. H. and Dejene S.W. The Role of Biodiversity and Ecosystem Services in Carbon Sequestration and its Implication for Climate Change Mitigation. *Int J Environ Sci Nat Res.* (2018) 11(2): 555810. DOI: 10.19080/IJESNR.2018.11.555810.
- Direttiva CEE 30/05/2018 n. 2018/844/U. *Gazzetta Europea* 19/06/2018 n L 15
- Getter K.L.; Rowe D. B.; Robertson G. P.; Cregg B.M. and Andresen J. A. Carbon Sequestration Potential of Extensive Green Roofs *Environ. Sci. Technol.* (2009), 43, 7564–7570 10.1021/Es901539x
- Goret M.; Masson V.; Schoetter R.; Moine M. P. Inclusion of CO₂ flux modelling in an urban canopy layer model and an evaluation over an old European city centre. *Atmospheric Environment: X* 3 (2019) 100042 <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100042>
- Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs; Landscape Development and Landscaping Research Society e.V. (FLL): Bonn, Germany, 2018.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer.
- Kattge J. et al. Try – A Global Database of Plant Traits. *Global Change Biology* (2011) 17, 2905–2935
- Keenan T.F. and Williams C.A. The Terrestrial Carbon Sink *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2018. 43:219–43 <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030204>
- Kuronuma T. and Watanabe H. Physiological and Morphological Traits and Competence for Carbon Sequestration of Several Green Roof Plants under a Controlled Environmental System *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* (2016) 141(6):583–590. 2016 doi:10.21273/JASHS03909-16
- Kuronuma T.; Watanabe H.; Ishihara T.; Kou D.; Touda K.; Ando M. and Shindo S. CO₂ Payoff of Extensive Green Roofs with Different Vegetation Species *Sustainability* (2018) 10, 2256; doi:10.3390/su10072256
- Li J.; Wai O.W.H.; Li Y.S.; Zhan J.; Ho Y.A.; J. Li; Lam E. Effect of green roof on ambient CO₂ concentration Building and Environment 45 (2010) 2644e2651 doi: 10.1016/j.buildenv.2010.05.025
- Lundholm J.; Tran S. and Gebert L. Plant Functional Traits Predict Green Roof Ecosystem Services DOI: 10.1021/es505426z *Environ. Sci. Technol.* 2015, 49, 2366–2374
- Manso M.; Castro-Gomes J. Green wall systems: A review of their characteristics *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2015) 41: 863–871 <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>
- Marchi M.; Pulselli R.; Marchettini N.; Pulselli F.; Bastianoni S. Carbon dioxide sequestration model of a vertical greenery system. *Ecological Modelling.* (2015) 306 46-56. Doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.08.013.
- Oberndorfer E.; Lundholm J.; Bass B.; Coffman R. R.; Doshi H.; Dunnett N.; Gaffin S.; Köhler M.; Liu K.K. Y. and Rowe B. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services *BioScience* 2007, 57 (10), 823-833 doi:10.1641/B571005
- Osborne et al. A global database of C₄ photosynthesis in grasses *New Phytologist* (2014) 204: 441–446 <https://doi.org/10.1111/nph.12942>
- Peel, M. C.; Finlayson, B. L. and McMahon, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>, 2007.
- Pérez G.; Coma J.; Martorell I.; Cabeza L. F. Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (2014) 139–165 <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>
- Pérez G.; Coma J.; Sol S.; Cabeza L.F. Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. *Applied Energy* 187 (2017) 424–437 <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.055>

- Pérez-Urrestarazu L.; Fernández-Cañero R.; Franco-Salas A. and Egea G. Vertical Greening Systems and Sustainable Cities. *Journal of Urban Technology*, (2015) 22 (4), 65–85, <http://dx.doi.org/10.1080/10630732.2015.1073900>
- Pugh T. A. M.; MacKenzie A. R.; Whyatt J. D. and Hewitt C. N. Effectiveness of Green Infrastructure for Improvement of Air Quality in Urban Street Canyons. *Environ. Sci. Technol.* 2012, 46, 7692–7699 dx.doi.org/10.1021/es300826w
- Shafique, M.; Xue, X.; Luo, X. An overview of carbon sequestration of green roofs in urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening* 47 (2020) 126515 <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126515>
- Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. www.esrl.noaa.gov
- UN Environment Programme. www.unenvironment.org
- UNI 11235—Istruzioni per la Progettazione, l'esecuzione, il Controllo e la Manutenzione di Coperture a Verde (Criteria for Design, Execution, Testing and Maintenance of Roof Garden); Ente Italiano di Normazione: Milano, Italy, 2015.
- Verheijen L. M.; Aerts R.; Bönisch G.; Kattge J. and Van Bodegom P. M. Variation in trait trade-offs allows differentiation among predefined plant functional types: implications for predictive ecology *New Phytologist* (2016) 209: 563–575 doi: 10.1111/nph.13623
- Zaid S.M.; Perisamy E.; Hussein H.; Myeda N. E.; Zainon N. Vertical Greenery System in urban tropical climate and its carbon sequestration potential: A review. *Ecological Indicators* 91 (2018) 57–70 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.086>
- Zhang K.; Gong Y.; Fa H. and Zhao M. CO₂ Flux Characteristics of Different Plant Communities in a Subtropical Urban Ecosystem. *Sustainability* 2019, 11, 4879; doi:10.3390/su11184879

11 BILANCIO IDROLOGICO DEL SISTEMA CONTINUO SUOLO-PIANTA-ARIA E L'EFFETTO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE DELLE PIANTE SUL RAFFRESCAMENTO DELLE CITTÀ (a cura di Arianna Latini, Patrizia De Rossi, Susanna Mariani, Lorenzo Gatti, Germina Giagnacovo)

11.1 Il “continuum” suolo-pianta-aria

Le piante sono strettamente collegate al suolo e all'atmosfera circostante e questi tre elementi vengono considerati come un *soil-plant-air “continuum”* (SPAC), vale a dire come un sistema idraulico continuo in cui l'acqua si muove dal suolo, attraverso i vasi xilemici della pianta che ne costituiscono il sistema vascolare, fino all'atmosfera circostante (Elfving et al. 1972). Lo SPAC è caratterizzato in ogni punto da un particolare potenziale idrico (Ψ_w , dove *w* sta per water, acqua), un parametro termodinamico che esprime lo status di energia libera dell'acqua, cioè l'energia disponibile per compiere un certo lavoro (Figura 1). Essendo i valori assoluti di energia libera piuttosto difficili da determinare, per convenzione, oltre che per semplificazione, vengono calcolati ed utilizzati dei valori relativi; pertanto, il potenziale idrico dell'acqua in un punto qualsiasi di un sistema viene definito come la differenza di energia libera dell'acqua in quel determinato punto e dell'acqua pura alla stessa temperatura, dove a quest'ultima viene assegnato un potenziale idrico uguale a zero. Il potenziale idrico, misurato con un'unità di pressione e comunemente espresso come MPa (Megapascal), si ottiene dalla somma di diverse componenti, dovute agli effetti di sostanze disciolte, a superfici che attraggono l'acqua, alla pressione idrostatica e alla gravità. L'acqua si muove spontaneamente da un punto ad alto potenziale idrico verso un punto a potenziale idrico inferiore. Nello SPAC vi è un gradiente nel potenziale idrico, con valori alti nel suolo (da $-0,01$ a $-1,5$ MPa) e bassi nell'atmosfera (da -10 a -200 MPa), che fornisce la forza motrice che consente il movimento dell'acqua (Lopez and Barclay 2017; Figura 1).

In genere, il serbatoio suolo è alimentato dalle piogge, dall'eventuale irrigazione e dalla risalita capillare; l'acqua che riceve in eccesso viene persa per ruscellamento o percolazione profonda. Le radici delle piante assorbono l'acqua dal suolo fino al cosiddetto punto di appassimento (wilting point), che corrisponde alla quantità d'acqua per unità di peso o di volume di suolo che viene trattenuta con elevata forza dalle particelle terrose e che non può essere assorbita dalle radici, espresso in percentuale.

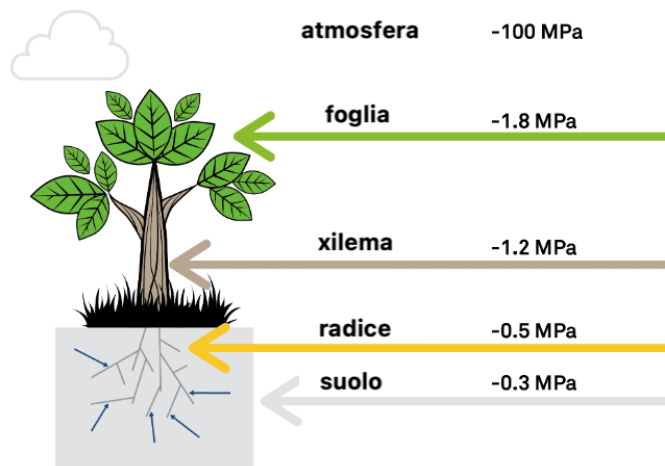


Figura 1. Gradiente di potenziale idrico nello SPAC (soil-plant-air “continuum”; immagine tratta dalla pagina web <https://www.metergroup.com/environment/articles/soil-moisture-release-curves-what-they-are-why-you-need-them-how-to-use-them/>).

11.2 L’evapotraspirazione delle piante

L’evapotraspirazione (ET) corrisponde alla quantità d’acqua persa per evaporazione (E) dalla superficie del terreno e per traspirazione (T) da parte della copertura vegetale, tale che $ET=E+T$. In particolare, T è il processo tramite cui l’acqua viene estratta dal suolo tramite le radici e trasportata attraverso la lunghezza della pianta fino agli stomi, piccoli fori localizzati principalmente sulla pagina inferiore delle foglie, dove viene rilasciata nell’atmosfera circostante dopo essersi trasformata in vapore acqueo (Figura 2).

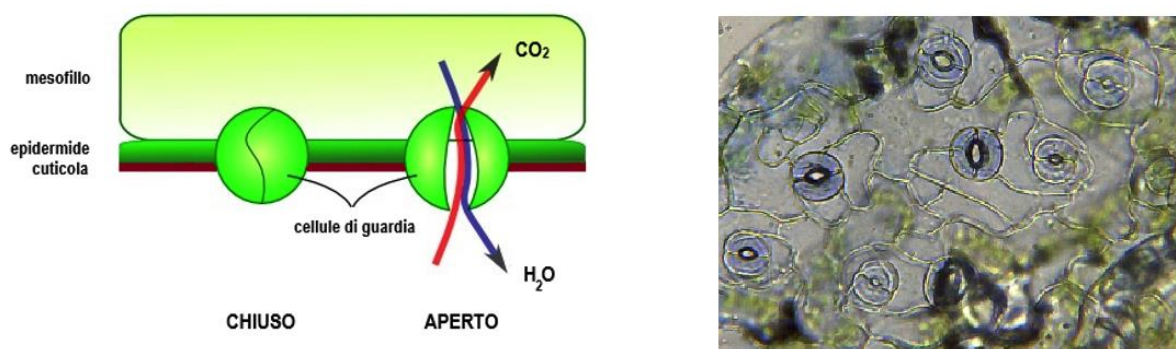


Figura 2 - Gli stomi, dal greco *stòma* che significa “bocca”, sono delle strutture annesse all’epidermide presenti sulla superficie fogliare, nella pagina inferiore. Il meccanismo di apertura/chiusura degli stomi è regolato dalle cosiddette cellule di guardia, in grado di gonfiarsi d’acqua e sgonfiarsi in base alle necessità della pianta. Se il terreno è ben idratato si aprono, mentre se non lo è, come in caso di siccità, si chiudono per evitare che la pianta perda acqua. Tratta dal link <https://www.agraria.org/botanica/traspirazione.htm>

Le foglie sono gli organi della pianta deputati alla T, molto più rispetto al fusto e ai fiori, dovuto alla loro forma appiattita che espone un'ampia superficie in contatto con l'aria. Anche la CO₂ richiesta per la fotosintesi è assorbita dalla pianta attraverso gli stomi (Figura 2) ed infatti i due processi di T e di fotosintesi sono fortemente dipendenti l'uno dall'altro: gli stomi rilasciano il vapore d'acqua della T e l'ossigeno prodotto dalla fotosintesi. A livello della foglia sussiste un'ampia variabilità di resistenza stomatica durante l'arco della giornata. Inoltre, la resistenza stomatica dipende dallo status idrico della pianta tramite una regolazione molto efficiente dell'apertura stomatica che, in caso di limitata disponibilità d'acqua, costituisce uno dei primi meccanismi ad attivarsi in risposta allo stress, regolando la T. Tuttavia, solitamente, la perdita d'acqua maggiore per T avviene durante il giorno quando la radiazione solare è più intensa. La caratteristica della chiusura degli stomi può variare nelle diverse specie vegetali ed anche tra diverse varietà (*cultivar*) di una stessa specie (Jackson et al. 2016; van Wesemael et al. 2019).

L'evaporazione (E) è il processo tramite il quale l'acqua liquida viene convertita in vapore acqueo, rimossa dagli strati superficiali del suolo e trasferita all'atmosfera.

11.3 Raffrescamento per evapotraspirazione tramite i tetti verdi

L'urbanizzazione ha portato alla realizzazione smisurata di aggregati di cemento, rendendo numerose città in tutto il mondo congestionate e sovrappopolate. In questo contesto, il processo di ET delle piante risulta avere un elevato potenziale di raffrescamento e pertanto rappresenta una vera e propria strategia che consente ad un edificio provvisto di infrastruttura vegetale, come un tetto o una parete verde, di abbattere l'energia termica (calore). È noto, infatti, che l'aumento della massa termica e del calore antropogenico, la ridotta evapotraspirazione dovuta alla riduzione della superficie vegetale (Yang et al. 2017) e la ventilazione limitata dagli agglomerati di edifici, abbiano determinato un aumento delle temperature nelle aree urbane, con effetti negativi sul consumo di energia, il comfort termico, la salute ed il benessere dei cittadini. Pertanto, le infrastrutture vegetali sugli edifici costituiscono delle vere e proprie tecnologie, in via di diffusione, per la dissipazione del calore urbano e il raffrescamento delle città, grazie soprattutto al processo di evapotraspirazione (ET) delle piante e agli effetti di ombreggiatura (Cascone et al. 2019;

Figura 3). Ovviamente le performance di raffreddamento dipendono fortemente dalle condizioni climatiche e geografiche.

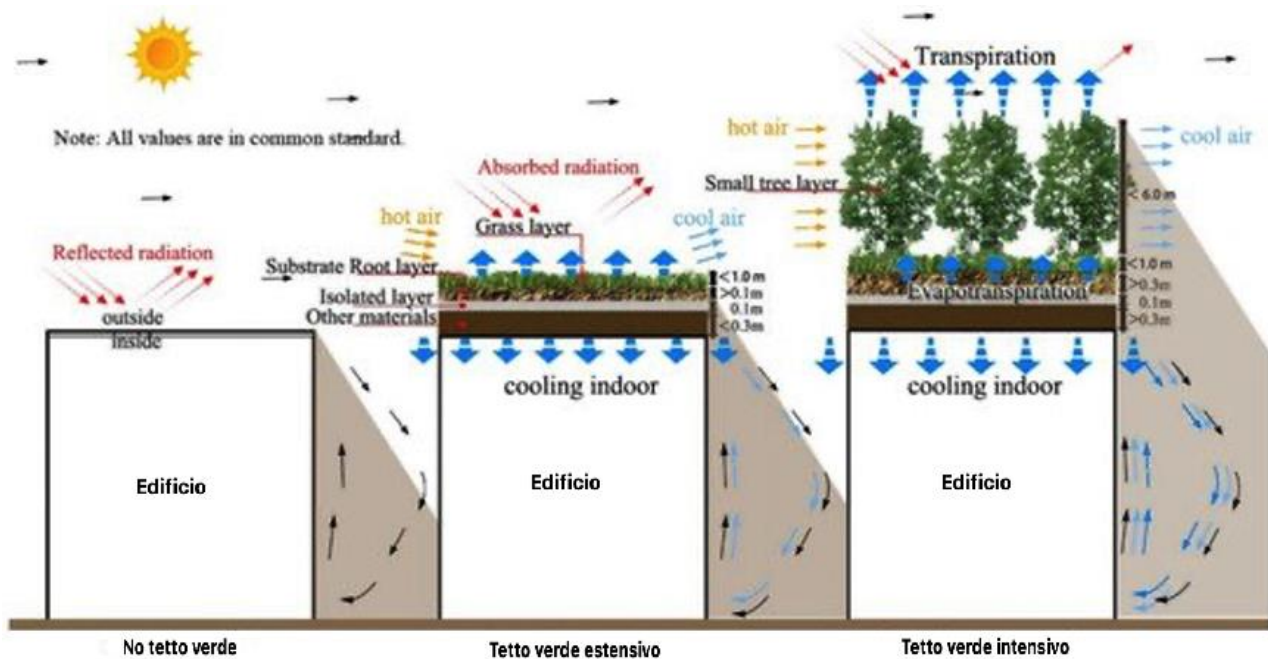


Figura 3 - Schema del meccanismo di raffreddamento tramite i tetti verdi. La radiazione solare entrante viene ridotta dalle foglie della vegetazione; infatti, tramite l'ET, il calore solare assorbito viene convertito in calore latente, con diminuzione della radiazione assorbita. Tutto ciò determina delle temperature superficiali inferiori e una riduzione delle emissioni di radiazione ad onde lunghe, che si traducono in temperature inferiori dell'aria. I tetti verdi di tipo intensivo, a sinistra nella figura, consentono un maggior raffreddamento rispetto a quelli di tipo estensivo, al centro nella figura (tratta da Zhang et al. 2019).

Nel caso specifico di un tetto verde, il flusso di calore è rappresentato schematicamente in Figura 4. La radiazione solare incidente sulla superficie vegetale fotosintetizzante viene parzialmente riflessa e parte di essa viene riemessa all'atmosfera sotto forma di radiazione ad onde lunghe che riscaldano l'atmosfera dal basso (fenomeno noto come effetto serra). Bisogna inoltre considerare il trasferimento di calore convettivo con l'aria ambiente circostante e di calore conduttivo tra la massa termica dei diversi strati del tetto e l'aria (il calore convettivo fa riferimento al calore trasferito tra sostanze liquide o gassose, mentre il calore conduttivo allo scambio termico tra corpi solidi; in entrambi i casi il calore si sposta da una massa più calda ad una più fredda). L'entalpia di evaporazione, come risultato del processo di ET, rappresenta la riduzione di calore sotto forma di molecole di vapore acqueo.

L'entità di sviluppo della vegetazione ha un effetto considerevole sulla quantità d'acqua consumata oltre che sul bilancio idrico finale di un tetto verde.

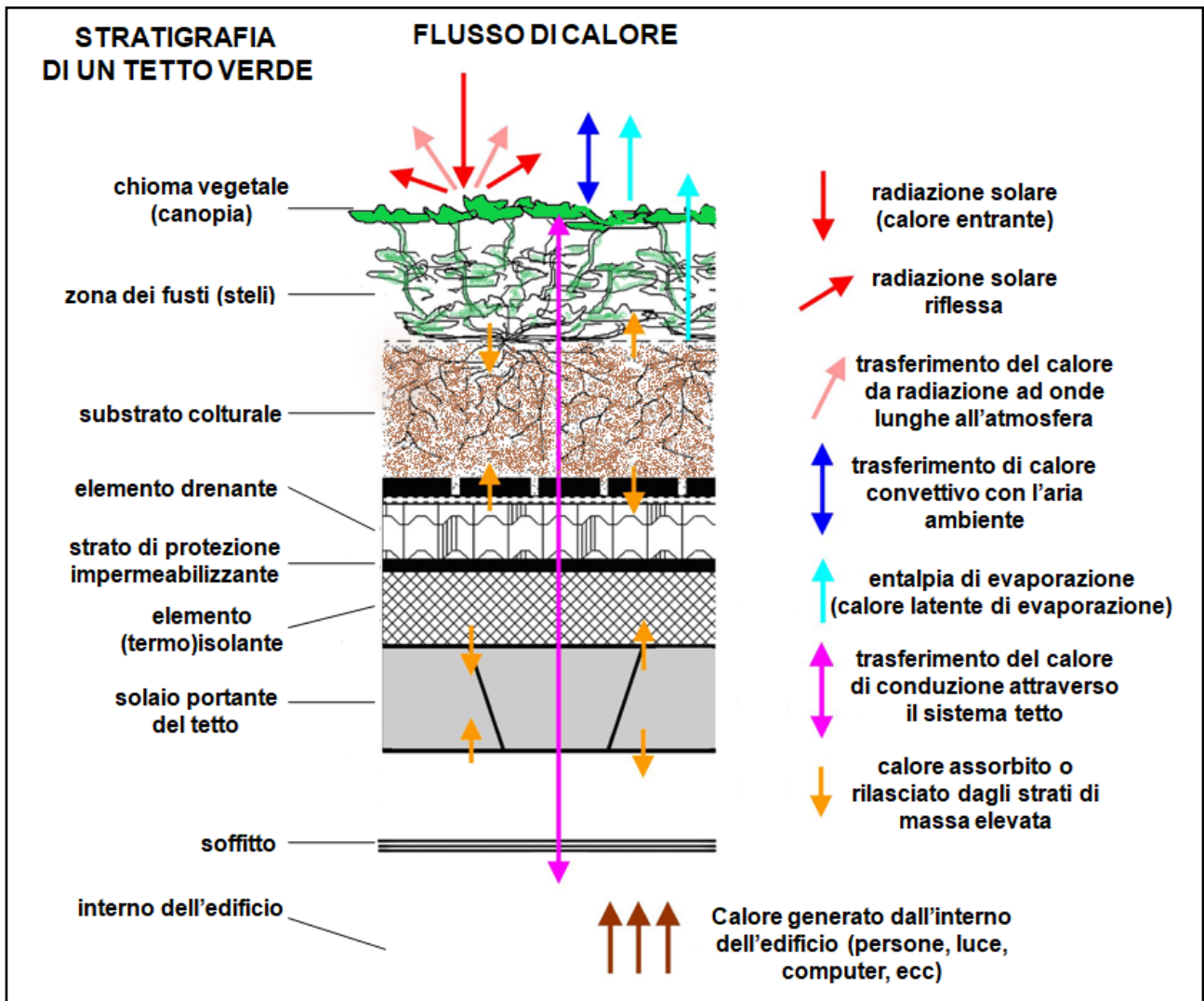


Figura 4 - Schema del flusso di calore attraverso la stratigrafia di un tipico tetto verde. Tratta e rielaborata da Wark 2011.

I principali parametri climatologici che determinano la quantità di ET sono la radiazione solare netta in entrata, la velocità del vento, la temperatura e l'umidità dell'aria, le condizioni di nuvolosità del cielo e le precipitazioni, tutti sono influenzati dalla stagione e dalla posizione geografica. In particolare, la radiazione solare, che costituisce la principale fonte di energia utilizzata dalla foglia per il processo di ET, ha un effetto diretto sull'apertura degli stomi, sulla fotosintesi e sulla temperatura fogliare, rappresentando il parametro climatico che si correla

maggiormente con l'ET. Ad ogni modo, il fenomeno di ET dipende dalle caratteristiche meteorologiche-climatiche nel loro complesso, incluso soprattutto come la velocità del vento e la turbolenza dell'aria stimolano i flussi convettivi di calore tra l'atmosfera e la superficie del suolo. Per quanto riguarda la vegetazione e il suolo, le principali caratteristiche includono il grado di ombreggiatura della canopia (*leaf area and density*, LAI) ed il livello di idratazione a livello della superficie del suolo (Cascone et al. 2019).

11.4 Metodi di misura per l'evapotraspirazione

La T operata dalle piante può essere misurata in modo semplice e diretto a livello fogliare attraverso un porometro portatile, che misura la conduttanza stomatica (g_s , equivalente all'inverso della resistenza stomatica), in mm/sec, senza distruggere la foglia.

Diversamente, la misura dell'ET è difficile e costosa sia in termini di strumentazione che di tempo da impiegare, ed è persino più complicato separare il contributo dovuto alla T della pianta e all'E dal suolo. A livello di copertura vegetale, l'ET può essere studiata principalmente tramite metodi diretti basati sul bilancio idrico o sull'utilizzo di un lisimetro, metodi indiretti che prevedono l'applicazione di modelli matematici predefiniti basati su parametri micrometeorologici, oppure metodi empirici.

In genere, l'ET si misura su base oraria o giornaliera ed è espressa in millimetri (mm) per unità di tempo, considerando la perdita d'acqua come unità di altezza; ma può anche essere espressa come volume evaporato per unità di superficie e per unità di tempo (es. m^3/ha giorno) o come energia richiesta per far evaporare l'acqua ricevuta per unità di superficie e per unità di tempo (es. MJ/m^2 giorno). In quest'ultimo caso, tale energia corrisponde al calore latente di vaporizzazione e si assume che l'evaporazione di 2,5 kg di acqua richieda 2 MJ di energia (Mugnai 2004; Barbieri et al. 2011).

11.4.1 LISIMETRO

Il lisimetro è uno strumento piuttosto costoso e poco pratico che consente di studiare la dinamica dell'acqua o di altre sostanze presenti in un suolo, fornendo una misura diretta e potenzialmente molto accurata dell'ET. Vi sono diversi tipi di lisimetro (a pesata, galleggianti, a drenaggio, microlisimetri).

Il *lisimetro (agronomico) a suzione* consente di estrarre soluzioni dai suoli per essere successivamente analizzate (analisi quali- e quantitative degli elementi nutritivi, salinità, pH, ecc). Potendo essere posizionati a diverse profondità, vengono spesso usati per confrontare i gradienti nei suoli dovuti alla profondità. Un lisimetro è generalmente costituito da un tubo cavo in PVC di lunghezza variabile, a secondo del modello e delle esigenze, disposto sopra ad una punta di ceramica porosa inerte, attraverso cui penetra la soluzione acquosa che viene estratta dal suolo applicando una leggera depressione all'interno del lisimetro, tramite una pompa a vuoto, che instaura un gradiente di potenziale tra il suolo e l'interno dello strumento. All'estremità apicale del tubo vi è un tappo in silicone e poi un tubo di campionamento (Figura 5).

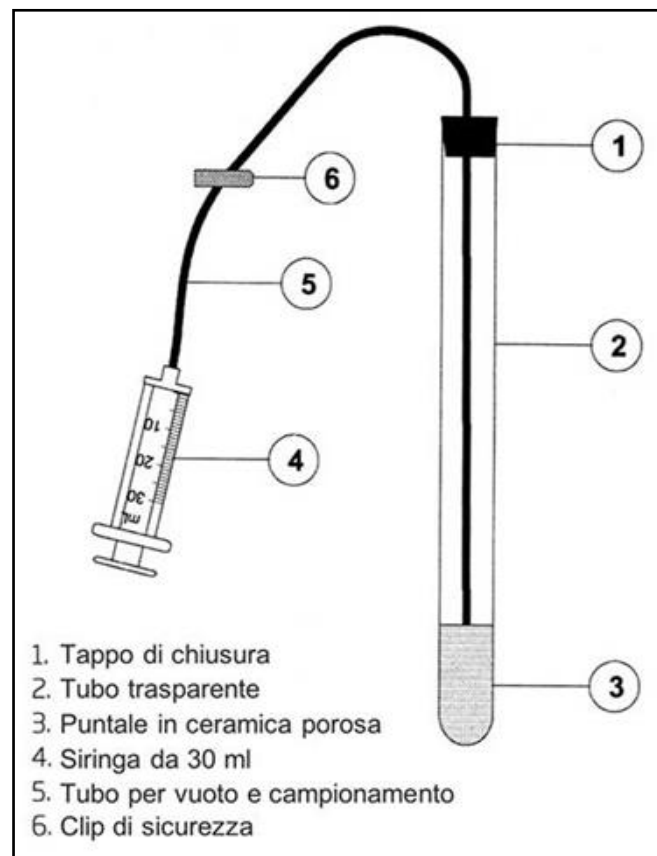


Figura 5 - Schema di lisimetro a suzione per il campionamento dei liquidi in soluzione nel terreno. Tratta al link <https://scubla.it/it/gestione-ambientale/campionamento-e-analisi-del-terreno/lisimetro-a-suzione-detail.html>

I lisimetri più comuni sono concepiti per installazioni a lungo termine su un singolo sito. Per calcolare l'ET è necessario registrare la quantità di precipitazione/irrigazione ricevuta dall'area oggetto di studio e considerare anche la quantità d'acqua che viene perduta attraverso il suolo (percolazione, ecc.).

A seconda del tipo di lisimetro impiegato, il valore di ET può essere ottenuto come differenza tra l'acqua in entrata (pioggia e irrigazione) e l'acqua in uscita nel caso di un lisimetro a drenaggio; oppure come confronto tra il peso del cassone in due istanti diversi nel caso di un lisimetro a pesata.

Il *lisimetro a pesata* consente di determinare i consumi idrici delle coltivazioni in pieno campo e pertanto di misurare direttamente e con molta precisione l'ET, che viene calcolata come differenza tra la precipitazione (P), il drenaggio (D), il deflusso superficiale (O) e le variazioni nell'acqua immagazzinata nel suolo (ΔS), tale che $ET = P - D - O \pm \Delta S$. In particolare, il ΔS viene determinato attraverso la misura della variazione di peso di una colonna di suolo in funzione del tempo.

11.4.2 METODI EMPIRICI PER LA STIMA DELL'ET

Il parametro *evapotraspirazione di riferimento* (ET_0) rappresenta la quantità d'acqua per unità di tempo che viene perduta per E dal suolo e per T da parte di una coltura di riferimento, coltivata su ampia superficie per evitare fenomeni di advezione, a taglia bassa ($h_c \sim 8-15$ cm), in fase di attivo accrescimento, ricoprente completamente il terreno e in condizioni di disponibilità idrica non limitante. La coltura standard di riferimento è un prato di festuca (*Festuca arundinacea* Desf.).

Il parametro di *evapotraspirazione massima* (ET_c), $ET_c = ET_0 \times K_c$, rappresenta la quantità d'acqua per unità di tempo che viene perduta da parte di una coltura ordinaria in buono stato fitosanitario e in condizioni di fertilizzazione e disponibilità idrica non limitanti. K_c (*crop coefficient*) è il coefficiente colturale ($K_c = ET_{a(misurata)} / ET_{0(stimata)}$), un valore adimensionale che in genere viene determinato sperimentalmente, in condizioni altamente controllate di adeguata umidità del suolo, stato di salute delle piante e pratiche colturali.

Il valore di K_c integra gli effetti delle variazioni nelle caratteristiche morfo-fisiologiche della coltura, del metodo di irrigazione, del grado di copertura vegetale, delle condizioni del suolo e del clima e delle pratiche di gestione. Ciascuna specie colturale avrà una serie di K_c che differiscono in base alle condizioni, tra cui in particolare fasi di crescita (Figura 6).

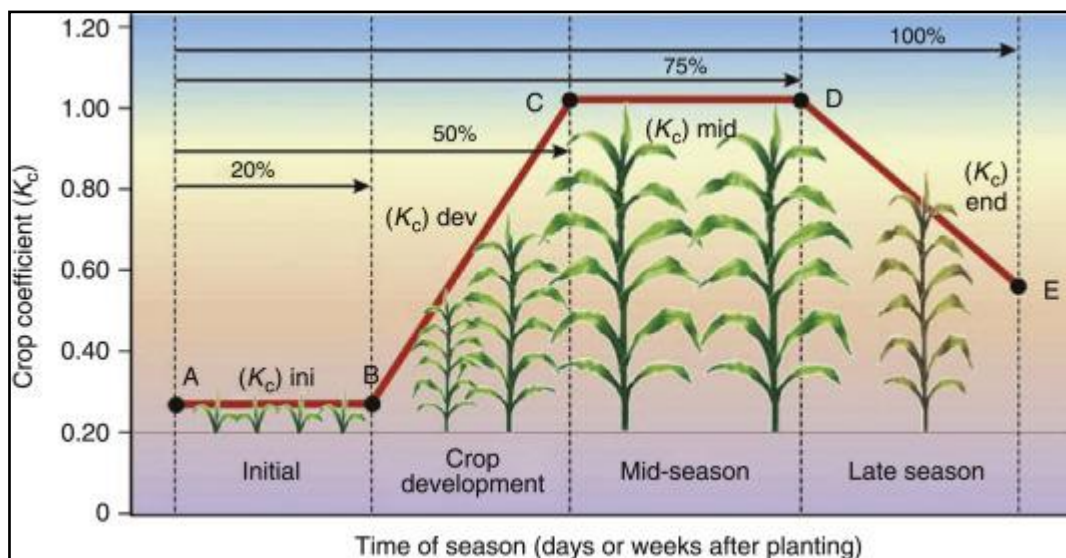


Figura 6 - Schema dell'andamento di K_c in base allo stadio di sviluppo delle piante (tratto da Pokorny 2019). La durata delle quattro fasi di crescita (*initial*, *crop development*, *mid-season* e *late-season*) dipende dal clima, dalla latitudine, dall'altitudine, dalla data di impianto e dal tipo di coltura e dalle pratiche culturali (Allen et al. 1998).

Secondo i criteri stabiliti dalla FAO, vi sono quattro fasi principali di crescita delle piante in campo: a) la fase iniziale (*initial*), durante la germinazione delle colture e la fase di insediamento, ovvero dalla semina ad una ricopertura del terreno da parte della coltura di circa il 10%; b) la fase di crescita (*crop development*) dal 10% fino ad una quasi totale copertura del terreno, c) la fase di pieno sviluppo (*mid season*) quando vi è il massimo di copertura e la coltura è in pieno sviluppo vegetativo; d) la fase di maturazione (*late season*) corrispondente alla maturità fisiologica (Allen et al. 1998). Le osservazioni in campo consentono di determinare lo stadio di crescita colturale e di regolare di conseguenza i valori empirici di K_c . Nella fase iniziale dello sviluppo, la maggior parte dell'ET avviene come evaporazione dalla superficie del suolo; le piante sono piccole, vi è un minor tasso di utilizzo dell'acqua ed anche il K_c è piccolo. Man mano che si sviluppa la copertura vegetale a ricoprire la superficie del suolo, l'evaporazione dal suolo diminuisce e aumenta la componente di traspirazione dell'ET. Per la maggior parte delle colture agrarie, i livelli di ET più elevati si riscontrano quando la pianta è completamente sviluppata (*mid season*). I valori di K_c per alcune colture d'interesse sono riportati nella Tabella 1.

Coltura	K_c (initial) durante la fase di crescita iniziale	K_c (mid-season) durante la fase di pieno sviluppo	K_c (late-season) durante la fase di maturazione
Orzo	0,30	1,15	0,25
Ceci	0,40	1,00	0,35
Cotone	0,35	1,15-1,20	0,70-0,50
Mais	0,30	1,20	0,35
Fagioli bianchi (cannellini)	0,40	1,15	0,35
Arachidi	0,40	1,15	0,60
Sorgo	0,30	1,00-1,10	0,55
Soia	0,40	1,15	0,50
Girasole	0,35	1,15	0,35
Grano	0,30	1,15	0,25
Riso	1,05	1,20	0,90-0,60

Tabella 1 - Coefficienti colturali di alcune colture agricole calcolati sperimentalmente e riconosciuti dalla FAO in base alla fase di crescita (Allen et al. 1998).

Tali valori e gli altri riportati dalla FAO e dalla letteratura scientifica dovrebbero essere utilizzati a scopo esemplificativo e come riferimento; infatti, con l'obiettivo di incorporare nel valore di K_c gli effetti dovuti alla specie e alla varietà di coltura, al clima e alle pratiche agricole, oltre che alla fase di crescita e al grado di copertura del terreno, continuano ad essere necessarie osservazioni in campo a livello locale. È stata dimostrata una certa somiglianza nei valori di K_c in base al tipo di colture agricole, che a questo scopo possono essere raggruppate e classificate come piccoli ortaggi, legumi, cereali, ecc. Tale somiglianza di K_c tra le specie appartenenti ad uno stesso gruppo è dovuta al fatto che colture dello stesso gruppo condividono caratteristiche importanti correlate all'efficienza di ET, quali l'altezza della pianta, l'area fogliare, l'indice di copertura del suolo e le richieste d'irrigazione. In particolare, l'altezza della pianta (h) è correlata in modo direttamente proporzionale con K_c e il rapporto K_c/h durante le diverse fasi di crescita rimane per lo più costante.

Il parametro di evapotraspirazione effettiva (ET), $ET = ET_c \times K_d = ET_0 \times K_c \times K_d$, rappresenta la quantità d'acqua per unità di tempo che viene perduta da parte di una coltura coltivata con le ordinarie tecniche agronomiche (condizioni colturali reali).

I metodi empirici correlano ET_0 ad uno o più fattori climatici attraverso algoritmi matematici (metodo di Blaney Criddle, equazione di Penman Monteith, et al.).

11.5 Caso studio ENEA nel CR Casaccia: capacità evapotraspirativa delle essenze vegetali

Nell'ambito della sperimentazione ENEA finanziata dalla Ricerca di Sistema Elettrico (Programmazione RdS, triennio 2019-2021), svolta presso l'Ed. F92 nel CR Casaccia (Roma), è stata espletata un'attività focalizzata sulla serra bioclimatica e sulla possibilità di conseguire in modo naturale un certo livello di raffrescamento estivo dell'ambiente serra bioclimatica e dell'ambiente interno adiacente attraverso l'introduzione di un allestimento vegetale nella serra. L'ipotesi su cui si basa questa attività, ancora in corso, è che il fenomeno evapotraspirativo operato dalle piante determini una riduzione della temperatura dell'ambiente circostante, consentendo di conseguenza una riduzione della spesa elettrica per la climatizzazione estiva.

L'opportunità di fare agricoltura su balconi e terrazzi consente di garantirsi una produzione casalinga di numerosi ortaggi ed erbe aromatiche, ed infatti in Italia l'agricoltura urbana/domestica è ormai divenuta una realtà consolidata. Anche come effetto dell'emergenza Covid-19, in questo periodo, la pratica degli orti sul balcone sta vivendo una crescita importante e, secondo Coldiretti, il mercato ha registrato una forte impennata negli acquisti di semi, piantine, fertilizzanti e strumenti domestici per la coltivazione (<https://www.coldiretti.it/economia/coronavirus-boom-orti-in-terrazzo-sogno-del-62-degli-italiani>). In questo contesto, la ricerca condotta ha preso in esame proprio delle piante orticole. La scelta delle specie da introdurre nella serra bioclimatica è ricaduta su colture note dotate di un elevato potenziale evapotraspirativo, in modo da ottenere un maggior effetto EV da parte della massa vegetale e conseguire una riduzione significativa della temperatura negli spazi interni dell'edificio oggetto di studio.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche più rilevanti delle specie utilizzate nella sperimentazione in serra bioclimatica, mostrate in Figura 7; mentre i valori dei K_c di queste specie e la durata del loro ciclo biologico sono riportati rispettivamente in Tabella 2 e Tabella 3.

- Lattuga (*Lactuca sativa*) (Fig. 7a), appartenente alla famiglia delle composite, anche dette Asteraceae. Viene coltivata come pianta annuale. In genere le foglie vengono raccolte quando sono ancora tenere, prima che le piante vadano in seme. Data la sua facilità di coltivazione, la lattuga è una coltura che si adatta bene alle condizioni di crescita in serra, incluso i sistemi di coltivazione fuori suolo. Il suo K_c a pieno sviluppo (*mid-season*) è elevato, circa 1, e presenta, in area Mediterranea, un ciclo biologico medio che varia dai 75 ai 140 giorni a seconda della stagionalità.
- Pomodoro (*Solanum lycopersicum*) (Fig. 7b), pianta annuale della famiglia delle Solanaceae. Nonostante le cultivar che producono bacche rosse siano le più diffuse in commercio, le bacche del pomodoro possono assumere colorazioni differenti. Il pomodoro presenta un K_c a pieno sviluppo elevato di 1,15 e, in area Mediterranea, un ciclo biologico medio di 145 giorni.
- Sedano (*Apium graveolens*) (Fig. 7c), pianta erbacea della famiglia delle Umbrelliferae. Si presta bene anche alla coltivazione in vaso e può raggiungere gli 80/100 cm di altezza. I fiori sono infiorescenze ombrellifere di colore bianco. Il suo K_c a pieno sviluppo è elevato, circa 1,05, e presenta, in area Mediterranea, un ciclo biologico medio di 125 giorni.
- Vite (*Vitis vinifera*) (Fig. 7d), specie arbustiva della famiglia delle Vitaceae. E' una pianta arborea rampicante che per crescere si attacca a dei sostegni (tutori) mediante i viticci. I frutti sono degli acini di forma e colore variabile: gialli, viola o bluastri, raggruppati in grappoli. La vite è caratteristica degli ambienti mediterranei e viene a volte coltivata anche per creare una zona d'ombra. La vite presenta K_c a pieno sviluppo intorno a 0,8 e un ciclo biologico piuttosto lungo, mediamente superiore ai 200 giorni.



Figura 7. Specie utilizzate nella sperimentazione in serra bioclimatica: (a) lattuga, (b) pomodoro, (c) sedano, (d) vite.

	K_c (<i>initial</i>) durante la fase di crescita iniziale	K_c (<i>mid-season</i>) durante la fase di pieno sviluppo	K_c (<i>late-season</i>) durante la fase di maturazione
Lattuga	-	1,00	0,95
Pomodoro	-	1,15	0,70-0,90
Sedano	-	1,05	1,00
Vite	0,30	0,30	0,30

Tabella 2. Coefficienti colturali delle specie agricole utilizzate nella sperimentazione in serra bioclimatica. Tali K_c , estratti dalla tabella 12 del capitolo 6 di Allen et al. (1998), sono stati calcolati sperimentalmente e riconosciuti dalla FAO in relazione a piante non stressate e ben gestite cresciute in climi sub-umidi.

	Area geografica	Periodo (mese) di impianto	gg ^{initial} Durata della fase iniziale	gg ^{crop development} Durata della fase di crescita	gg ^{mid-season} Durata della fase di pieno sviluppo	gg ^{late-season} Durata della fase di maturazione	gg ^{late-season} Durata della fase di maturazione
Lattuga	Aree mediterranee	Aprile	20	30	15	10	75
	Aree mediterranee	Novembre/gennaio	30	40	25	10	105
	Regioni aride	Ottobre/novembre	25	35	30	10	100
	Aree mediterranee	Febbraio	35	50	45	10	140
Pomodoro	Regioni aride	Gennaio	30	40	40	25	135
	California, USA	Aprile/maggio	35	40	50	30	155
	Deserto della California (USA)	Gennaio	25	40	60	30	155
	Regioni aride	Ottobre/novembre	35	45	70	30	180
Sedano	Aree mediterranee	Aprile/maggio	30	40	45	30	145
	Regioni semi-aride	Ottobre	25	40	95	20	180
	Aree mediterranee	Aprile	25	40	45	15	125
	Regioni semi-aride	Gennaio	30	55	105	20	210
Vite	Basse latitudini	Aprile	20	40	120	60	240
	California, USA	Marzo	20	50	75	60	205
	Alte latitudini	Maggio	20	50	90	20	180
	Medie latitudini (vino)	Aprile	30	60	40	80	210

Tabella 3 - Lunghezza media in giorni del ciclo biologico delle specie agricole utilizzate nella sperimentazione in serra bioclimatica. Tali lunghezze, estratte dalla tabella 11 del capitolo 6 di Allen et al. (1998), sono state calcolate sperimentalmente e riconosciute dalla FAO in relazione all'area geografica e al periodo (mese) d'impianto.

Le piante, con diverse repliche biologiche per ciascuna delle quattro specie considerate, sono state fatte crescere in opportuni vasi all'interno della serra bioclimatica. In seguito, la misura della quantità di acqua evapotraspirata è rilevata durante la stagione estiva impiegando bilance a celle di carico provviste di un software per la rilevazione in continuo del peso della coltura disposta sui vasi (Figura 8).



Figura 8 - Elementi della bilancia a celle di carico durante la sperimentazione

La rilevazione della variazione dei pesi in relazione alla capacità evapotraspirativa della specie vegetale è iniziata dopo che il suolo contenuto nei vasi aveva raggiunto la capacità di campo ed è proseguita per cinque ore. La capacità di campo equivale alla capacità di un suolo di trattenere l'acqua (Water Holding Capacity, WHC) e rappresenta il limite massimo entro il quale si possono costituire riserve idriche, nel terreno, utilizzabili dalle piante. In queste condizioni l'effetto della tensione matriciale è tale che l'acqua presente nel terreno alla capacità di campo può essere allontanata solo dall'assorbimento radicale oppure per evaporazione. I risultati hanno mostrato che nei mesi estivi e nelle condizioni della serra bioclimatica presente in Enea le piante possono arrivare a perdere per ET una quantità d'acqua che varia da 0.1 Kg a circa 0.6 Kg durante le 5 ore di osservazione a seconda della specie considerata. Questi valori indicano la quantità di acqua che ha subito il passaggio di stato da liquido a vapore in ciascun giorno monitorato durante il *time slot* definito. Dai nostri risultati, 120 Watt/mq è l'irraggiamento solare utilizzato mediamente dal nostro sistema verde nelle 5h di osservazione per il processo di ET in presenza di una potenza solare media incidente e trasmessa alle piante nella serra di circa 440 W/mq (media nelle 5 ore di

monitoraggio). La presenza del sistema verde ha pertanto assorbito il 27% della potenza solare incidente, significa che circa il 27% di energia solare non viene assorbita dalle strutture (carico sensibile) ma passa come carico latente (evaporazione).

Bibliografia

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper. N° 56.
- Barbieri G, Cavani L, Ciavatta C, De Pascale S, Garibaldi A, Gianquinto G, Mencarelli F, Pardossi A, Orsini F, Pisante M, Sambo P, Stanghellini C, Tei F (2011) Manuale di orticoltura: la serra sostenibile. A cura di Salvato M. Ed. P.A.N. Piante Acqua Natura srl. ISBN: 978-88-902948-2-2.
- Cascone S, Coma J, Gagliamo A, Pérez G (2019) The evapotranspiration process in green roofs: a review. *Build. Environ.* 147: 337-55. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>
- Elfving DC, Kaufmann MR, Hall AE (1972) Interpreting leaf water potential measurements with a model of the soil-plant-atmosphere continuum. *Physiol. Plant.* 27: 161-8.
- Jackson P, Basnayake J, Inman-Bamber G, Lakshmanan P, Natarajan S, Stokes C (2016) Genetic variation in transpiration efficiency and relationships between whole plant and leaf gas exchange measurements in *Saccharum* spp. and related germplasm. *J. Exp. Bot.* 67: 861-71. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv505>
- Lopez FB, Barclay GF (2017) The soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) and water potential. Chapter 4 "Plant anatomy and physiology", pag: 45-60. In "Pharmacognosy. Fundamentals, applications and strategies". A cura di Badal S, Delgoda R. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01794-7>
- Mugnai S (2004) Elementi di ecofisiologia vegetale. In "Uso razionale delle risorse nel florovivaismo: l'acqua". Quaderno ARSIA 5/2004. ISBN: 88-8295-056-5.
- Pokorny J (2019) Evapotranspiration. In *Encyclopedia of Ecology*, 2nd Ed. Vol. 2, 292-303. ISBN: 978-0-444-64130-4.
- van Wesemael J, Kissel E, Eyland D, Lawson T, Swennen R, Carpentier S (2019) Using growth and transpiration phenotyping under controlled conditions to select water efficient banana genotypes. *Front. Plant Sci.* 10: 352. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00352>
- Wark C (2011) Cooler than coll roofs: how heat doesn't move through a green roof. A 7-part series on the fundamentals of energy and green roofs. Disponibile su <https://www.greenroofs.com/pdfs/EnergyEditor-GreenRoofEnergySeries2011.pdf>
- Yang J, Sun J, Ge Q, Li X (2017) Assessing the impacts of urbanization-associated green space on urban land surface *temperature*: a case study of Dalian, China. *Urb. For. Urb. Green.* 22: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.01.002>
- Zhang G, He B-J, Zhu Z, Dewancker BJ (2019) Impact of morphological characteristics of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16: 179. <https://doi.org/10.3390/ijerph16020179>

12 ALBEDO DELLE SUPERFICI VEGETALI E BENEFICI DELL'INVERDIMENTO URBANO NELLA RIDUZIONE DELL'ISOLA DI CALORE NELLE CITTÀ (a cura di *Arianna Latini, Lorenzo Gatti, Germina Giagnacovo, Rosario Muleo, Patrizia De Rossi*)

12.1 La proprietà dell'albedo delle superfici

Nel 1974, Otterman propose che la causa della desertificazione nelle aree a bassa piovosità fosse riconducibile ad un aumento dell'albedo superficiale causato dalla riduzione della vegetazione per via dell'eccessivo sfruttamento dei terreni da pascolo. L'ipotesi alla base di ciò era che terreni ricoperti da vegetazione quando vengono "denudati" mostrano un'albedo più elevata, che determina una riduzione delle temperature superficiali e che a loro volta riducono l'input di calore nella bassa atmosfera, limitando in qualche modo i flussi convettivi che portano alla pioggia.

Oggi, l'albedo delle superfici ricoperte da coltri vegetali rappresenta una proprietà radiativa di notevole influenza ai fini della performance termica di un edificio, in quanto la superficie di un tetto ricoperto da vegetazione presenta un'albedo più alta rispetto ad un tetto tradizionale. L'albedo (termine che deriva dal latino e significa bianchezza) è equivalente alla riflettanza ed è anche nota come coefficiente di riflessione solare. L'albedo di una superficie ne rappresenta il suo potere riflettente e corrisponde alla percentuale di radiazione che viene riflessa in tutte le direzioni da quella superficie rispetto al totale della radiazione solare incidente, tale che:

$$\text{Albedo di una superficie (A)} = \frac{\text{Radiazione riflessa dalla superficie}}{\text{Radiazione globale incidente}}$$

L'albedo minima è pari a 0 quando nessuna frazione di luce viene riflessa come nel caso di una superficie nera, mentre l'albedo massima è pari ad 1 quando tutta la radiazione incidente viene riflessa come nel caso di una superficie bianca (Figura 1).

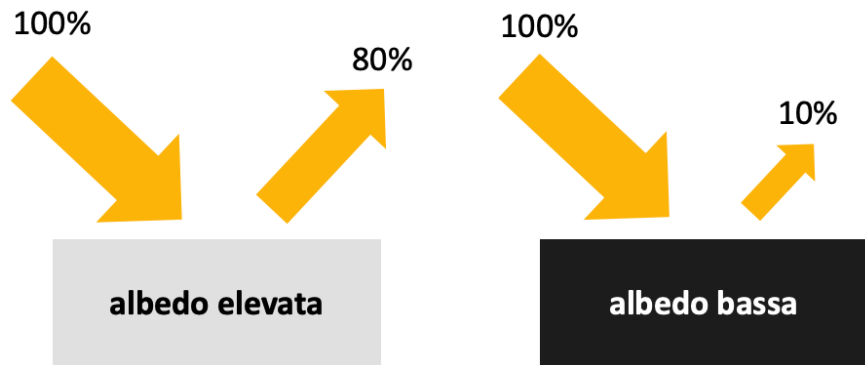


Figura 1 - Una superficie chiara con albedo elevata riflette nell'atmosfera la maggior parte della radiazione incidente, mentre una superficie scura con albedo bassa assorbe la maggior parte della radiazione incidente, riflettendone nell'atmosfera una percentuale molto inferiore.

I quattro fattori principali che influenzano l'albedo superficiale sono le condizioni della superficie, l'angolo zenitale del sole, le condizioni del cielo (ovvero la nuvolosità) e l'angolo della superficie rispetto all'orizzontale (Ahmad 1979). Superfici asciutte, di colore chiaro e lisce sono spesso associate ad albedo alto mentre superfici umide, di colore scuro e ruvide sono associate ad albedo basso. L'angolo zenitale del sole porta a marcate variazioni diurne. I valori di albedo sono stati misurati su diverse tipologie di superfici ed alcuni di questi, reperibili da varie fonti su internet, sono riportati in Tabella 1, anche se in realtà l'albedo delle superfici non dovrebbe essere definito da un singolo numero bensì da un intervallo di valori.

Tipo di superficie	Albedo
Prato	0,25-0,30
Prato secco	0,20
Alberi	0,15-0,18
Boschi e foreste	0,05-0,20
Asfalto	0,05-0,20
Strada sterrata	0,04
Tetto con vernice colorata	0,15-0,35
Tetto con vernice bianca	0,50-0,90
Tetto con mattonelle rosse/marroni	0,10-0,35
Tetto con elevata riflettenza (tetto freddo, <i>cool roof</i>)	0,60-0,70
Neve	0,75
Superficie acquosa	0,03-0,10
Deserto	0,21-0,28
Sabbia asciutta	0,18-0,30
Sabbia umida	0,09-0,18

Tabella 1 - Valori di albedo di differenti tipi di superficie.

Un maggior valore di albedo corrisponde ad una riduzione dell'accumulo di calore; pertanto, considerando che, mediamente, la terra presenta un'albedo di 0,29-0,31 e le città di 0,10, si evince che le aree urbane assorbono più luce e riscaldano di più.

Il cosiddetto effetto dell'isola di calore nelle aree metropolitane, determinato dall'intensa urbanizzazione e dall'impiego di materiali edilizi a basso albedo, fa riferimento all'aumento significativo delle temperature in città soprattutto nei periodi più caldi (Figura 2), comportando in parallelo un notevole aumento nel consumo di energia, oltre ad influire negativamente sulle condizioni di comfort microclimatico e ad intensificare il problema dell'inquinamento ambientale dell'aria. Se si stima che un aumento globale dell'albedo di 0,1 in una città comporta una riduzione della temperatura media di circa 0,3°C e una riduzione del picco di temperatura ambiente di circa 0,9°C, tale piccolo incremento di albedo si tradurrebbe in estate in un risparmio dell'ordine del 10-40% sul carico energetico per il raffreddamento delle superfici (Santamouris 2014).

Dal momento che l'area di terreno libera disponibile in ambiente urbano è in genere limitata, oltre che di valore economico molto elevato, l'impiego di tecnologie per la mitigazione dell'isola di calore direttamente sulla superficie del suolo in città risulta relativamente arduo. A tal proposito, i tetti in città rappresentano uno spazio ideale da sfruttare per

l'implementazione di tecnologie visto che, sempre per l'urbanizzazione, gli spazi dedicati al verde vengono a ridursi mentre aumentano le coperture degli edifici (Santamouris 2014).

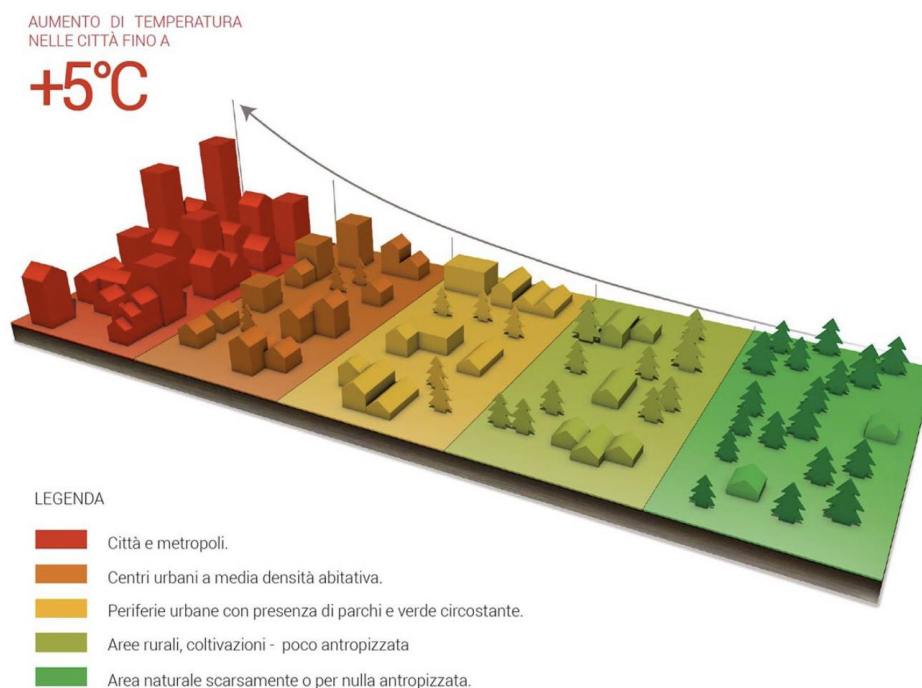


Figura 2 - Nei grandi centri urbani l'effetto "cementificazione" produce un aumento della temperatura ambientale rispetto alla estrema periferia non urbanizzata (tratto da: <https://www.saperecasa.it/2018/05/04/tetto-verde-una-soluzione-bella-e-funzionale-utile-al-risparmio-energetico-e-allambiente/>)

Le tecnologie di mitigazione dell'isola di calore urbana più importanti associate ai tetti, che consentono di abbassare le temperature superficiali dei lastrici solari, determinando così un miglior comfort termico all'interno dell'edificio, e di diminuire il flusso di calore latente verso l'atmosfera, possono essere classificate in due tipi principali: quelle che mirano ad aumentare l'albedo dei tetti, trattasi dei cosiddetti tetti freddi (*cool roof*) o riflettenti (Zinzi 2010), e quelle che prevedono la ricopertura parziale o totale con vegetazione dei tetti, trattasi dei tetti verdi (Theodosiou 2009). I tetti freddi sono tipicamente bianchi (*white roof*), hanno un'albedo elevata e rappresentano un'ottima soluzione per la climatizzazione. Tali tetti bianchi sono già tipici in ambienti mediterranei ed hanno il vantaggio di essere facili da realizzare. Diversamente, i tetti verdi come soluzione strategica apportano un numero

maggiore di benefici rispetto ai tetti dipinti di bianco. In particolare, il loro vantaggio aggiuntivo principale, di tipo ecologico, è che tramite le piante si verifica una riduzione della CO₂. Inoltre, le piante possono esercitare ulteriori effetti benefici quando coltivate sulle superfici dei tetti nelle aree urbanizzate, tra cui migliorare la qualità dell'aria, anche catturando elementi nocivi, inclusi i composti organici volatili (COV) ed il particolato. Simmons et al. (2008) hanno rilevato che, in condizioni di temperatura dell'aria ambiente di 33°C, a metà pomeriggio di una giornata calda, la temperatura superficiale raggiunta da un tetto nero è di 68°C, in un tetto bianco riflettente è mantenuta a 42°C, mentre in un tetto verde risulta compresa tra 31 e 38°C. La maggiore riduzione di temperatura ottenuta con l'impiego dei tetti verdi, nonostante l'albedo più alto che contraddistingue i tetti bianchi, non è dovuta interamente alle proprietà radiative della copertura vegetale, bensì in gran parte alla evapotraspirazione delle piante (Simmons et al. 2008).

L'albedo delle superfici vegetali è per lo più compreso tra 0,20 e 0,35 ed il suo valore è dipendente dalle condizioni climatiche (come l'umidità e l'angolo di incidenza dei raggi solari), dall'indice di copertura fogliare (LAI) e dall'intensità del colore (verde) delle piante presenti. Al crescere del LAI diminuisce la forzante radiativa solare sulla superficie ed un aumento del LAI da 2 a 5 determina una riduzione molto significativa della trasmissione solare della vegetazione (Berto et al. 2015). Altri parametri colturali influenti sull'albedo delle superfici vegetali includono la copertura del suolo, la temperatura fogliare, umidità fogliare e altezza delle piante.

La modifica dell'albedo superficiale è stata proposta come potenziale strategia di contrasto al riscaldamento causato dalle emissioni di gas serra in diversi modelli di geoingegneria relativi ad aree desertiche, urbane o agricole, nonostante il lavoro di Irvine et al. (2011) abbia evidenziato come i risultati ottenuti da questi modelli non siano sempre uniformi, né a livello spaziale né temporale. Tuttavia, i risultati ottenuti precedentemente da Ridgwell et al. (2009), che avevano simulato l'impatto dell'aumento dell'albedo della vegetazione del 20%, giungendo alla conclusione che, in particolari regioni nei periodi più caldi si potrebbe conseguire una diminuzione delle temperature regionali di 1°C e compensare un aumento di CO₂ atmosferica di 70 ppm, invogliano ad uno studio più approfondito di queste soluzioni basate sull'albedo

12.2 Caso studio ENEA nel CR Casaccia: sperimentazione sull'albedo

Ai fini di una accurata definizione energetica dei sistemi verdi in relazione alla loro caratteristica di riflettanza, la ricerca ENEA finanziata dalla Ricerca di Sistema Elettrico nazionale ha previsto di misurare l'albedo a livello di diverse specie vegetali e di associazioni di specie vegetali, soprattutto in sistemi di verde pensile come i tetti verdi, con il fine di incrementare le conoscenze disponibili a supporto della scelta delle specie di piante che risultino maggiormente adatte ad essere impiegate in queste infrastrutture, migliorando l'efficienza energetica degli edifici e, contemporaneamente, contrastando il fenomeno dell'isola di calore urbano.

La sperimentazione si è avvalsa di un albedometro portatile (Figura 3) che ha consentito di effettuare campagne di misurazione in differenti siti. L'albedometro utilizzato è costituito dai seguenti strumenti: una centralina per l'acquisizione dei dati (HD 32MT di Delta OHM) e un albedometro composto da due piranometri accoppiati (LP PYRA 05 di Delta OHM) montati su un treppiede trasportabile per agevolare il posizionamento della sensoristica nei diversi siti di misurazione. Dei due piranometri a termopila accoppiati, uno è rivolto verso l'alto e misura la radiazione solare globale (somma della radiazione diretta, di quella diffusa e di quella riflessa) incidente sulla superficie orizzontale verde di cui si vuole misurare l'albedo, e uno è rivolto verso il basso e misura la radiazione solare riflessa da questa superficie verde. L'albedo si calcola come la frazione di radiazione riflessa dal suolo rispetto alla radiazione incidente.

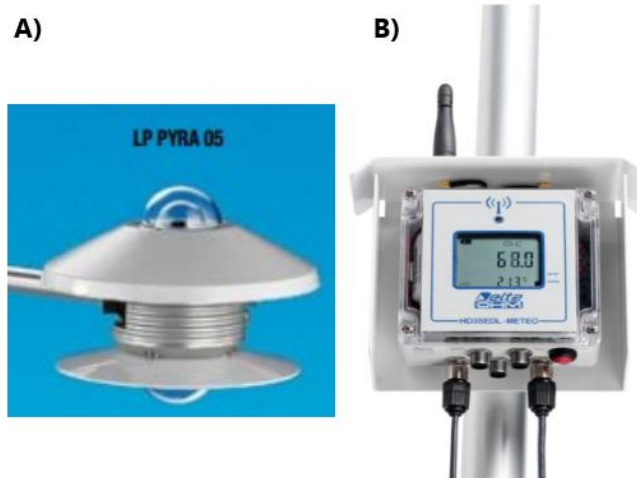


Figura 3 - A) Albedometro, modello LP PYRA 05 di Delta OHM (campo spettrale da 0,3 a 3 μm); B) datalogger modello HD 32 MT di Delta OHM.

Secondo la norma ISO 9060:2018 e la *World Meteorological Organization* (WMO 1983), i piranometri utilizzati sono classificabili come *Spectrally Flat Class A (Secondary standard)*.

In linea con le indicazioni generali fornite dalla *World Meteorological Organization* (WMO), durante le campagne di misura l'albedometro è stato posto su un treppiedi ad un'altezza di 1,5 m da terra.

La sperimentazione è stata condotta sul tetto verde ENEA (Campiotti et al. 2017, 2019, 2020), a livello dei due principali settori che contraddistinguono la vegetazione presente: settore con una collezione di numerose specie di *Sedum* e settore a prato di Graminaceae costituito da un mix di *Festuca* e *Poa* (Figura 4).



Figura 4 - Albedometro sul tetto verde ENEA (C.R. Casaccia). (A-B) Albedometro disposto nel settore di prato a Graminacee; (C) nel settore dei *Sedum* in estate con tipica colorazione verde; (D) nel settore dei *Sedum* in inverno con tipica colorazione rossa.

Il grafico dei valori di albedo nell'arco di 24 ore di una giornata di fine inverno, nel caso specifico il 2 marzo 2021 (Figura 5), utilizzando la media oraria dei valori registrati ogni 5 minuti sul settore di prato a Graminacee, evidenzia oscillazioni molto piccole dalle 9:00 alle 17:00, con un picco superiore di albedo (23,14%) alle ore 13:00 ed un picco inferiore (22,21%) alle ore 14:00. Il calo dell'albedo inizia dopo le 16:00 fino a crollare del tutto, risultando naturalmente pari a zero nelle ore di assenza di luce. La temperatura fogliare, invece, raggiunge il suo picco più alto (23,3 °C) dalle 14 alle 15:00, in egual modo alla temperatura dell'aria (Figura 5).

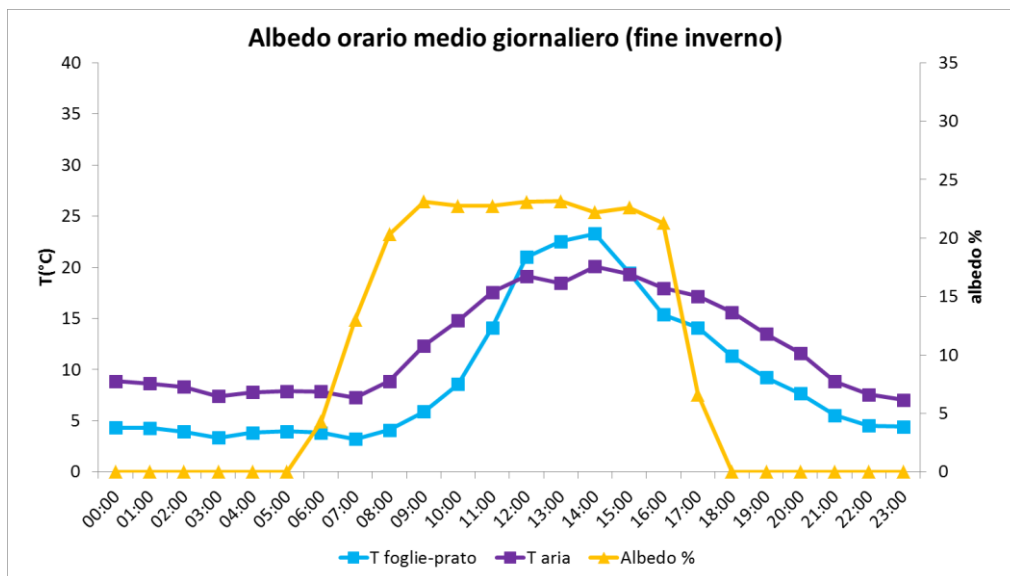


Figura 5 - Grafico a doppio asse dell'andamento dell'albedo (linea gialla), della temperatura sul tetto a livello della superficie fogliare (linea azzurra) e della temperatura dell'aria (linea viola) nelle 24 ore di una tipica giornata di fine inverno (2 marzo 2021). I dati riportati rappresentano le medie orarie dei valori misurati dai sensori disposti sul settore di prato a Graminacee nel tetto verde ENEA (C.R. Casaccia). In ordinata a sinistra sono riportati i valori di temperatura (°C) e a destra i valori di albedo espressi in %; in ascissa sono riportate le 24 ore della giornata, dalle 00:00 alle 24:00.

Diversamente, il grafico dei valori di albedo nell'arco di 24 ore di una giornata estiva, nel caso specifico il 12 agosto 2021 (Figura 6), nello stesso settore di prato a Graminacee, mostra un andamento a "M", con un picco inferiore corrispondente ad un valore più basso dell'albedo (20,3%) nelle ore centrali più soleggiate della giornata, tra le 13.00 e le 14.00. Due ulteriori picchi superiori si rilevano, rispettivamente, nelle prime ore della mattina intorno alle 8:00 (30,0%) e nel pomeriggio intorno alle 17:00 (21,8%). Osservando contemporaneamente anche gli andamenti della temperatura a livello della superficie del prato di Graminacee e della temperatura dell'aria, si nota come le due curve tendano a sovrapporsi proprio nelle ore centrali e a discostarsi allontanandosi dalle ore centrali in ambedue le direzioni (Figura 6). Gli scostamenti tra temperatura delle foglie e dell'aria potrebbero essere collegati agli effetti dell'albedo e alla risposta fisiologica delle piante, che determinano un certo livello di raffrescamento della temperatura a livello della superficie verde del tetto. In particolare, la risposta fisiologica della pianta risiede nella termoregolazione della foglia; a temperature superiore ai 30°C si ha una forte riduzione dell'efficienza di termoregolazione della foglia contemporaneamente alla riduzione dell'attività fotosintetica.

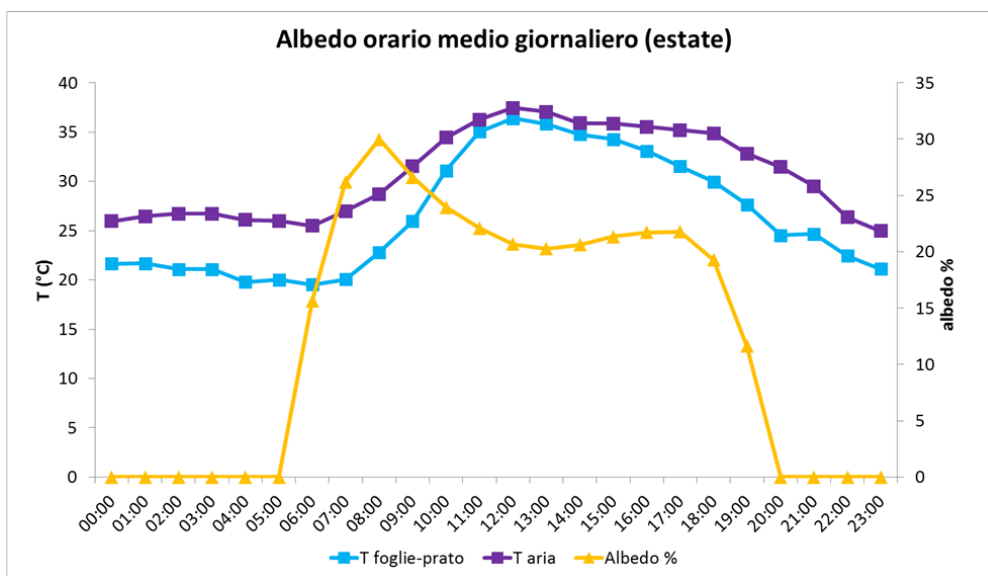


Figura 6 - Grafico a doppio asse dell'andamento dell'albedo (linea gialla), della temperatura sul tetto a livello della superficie fogliare (linea azzurra) e della temperatura dell'aria (linea viola) nelle 24 ore di una tipica giornata estiva (12 agosto 2021). I dati riportati rappresentano le medie orarie dei valori misurati dai sensori disposti sul settore di prato a Graminacee nel tetto verde ENEA (C.R. Casaccia). In ordinata a sinistra sono riportati i valori di temperatura (°C) e a destra i valori di albedo espressi in %; in ascissa sono riportate le 24 ore della giornata, dalle 00:00 alle 24:00.

Oltre al dinamismo giornaliero (Figure 5 e 6), l'albedo di una superficie vegetale su un tetto presenta un andamento dinamico legato alla stagione, alla morfologia della biomassa vegetale e al livello di copertura. Nel grafico seguente è mostrata la variazione dei valori di albedo tra la copertura di prato a Graminacee (22.38%) e la copertura a *Sedum*, includendo la fase invernale tipicamente di colore rosso (18.19%) del *Sedum spurium* e la sua fase primaverile tipicamente di colore verde (19.20%; Figura 7). Nell'ambito della stessa specie, il monitoraggio ha messo in evidenza una differenza significativa di 1 punto percentuale (pp) dell'1% nel valore dell'albedo dovuta alla stagionalità e di conseguenza alla colorazione delle piante. Inoltre, tra i valori di albedo sul prato a Graminacee e quelli sul prato a *Sedum* rosso, misurati in periodi contigui ad inizio marzo 2021 (1-4 marzo per il prato a Graminacee e 6-9 marzo per il prato a *Sedum* rosso), è stata rilevata una differenza significativa di 4 pp. Tale differenza è ascrivibile all'ampia diversità esistente tra le due specie vegetali, incluse la loro colorazione e altre caratteristiche morfo-fisiologiche, tra le quali la tipologia dello strato ceroso che ricopre i tessuti vegetali delle piante delle due specie.

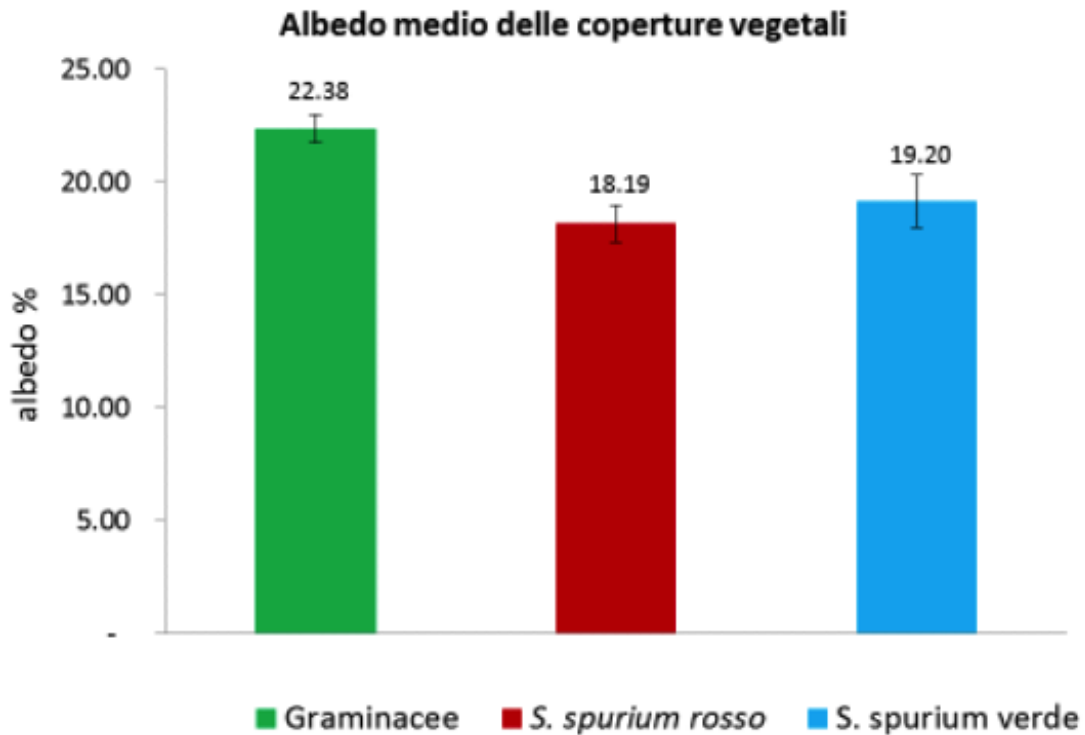


Figura 7 - Istogramma dei valori medi dell'albedo (%) registrati durante 4 giorni sul tetto verde ENEA (C.R. Casaccia, in inverno, a livello delle superfici coperte da prato di Graminacee (barra verde, 1-4 marzo 2021), prato di *Sedum spurium* rosso (barra rossa, 6-9 marzo 2021), e prato di *Sedum spurium* verde in primavera (barra azzurra, 29 maggio-1 giugno 2021). I valori rappresentati sono le medie dei dati registrati ogni 5 minuti, escludendo tutti i valori misurati in condizione di radiazione incidente $<150 \text{ W/m}^2$; le barre di errore indicano la deviazione standard.

Nel settore del tetto coperto dal tappeto di graminacee è stata monitorata l'albedo in relazione allo spessore e alla crescita del prato. Lo spessore dello strato di biomassa verde, equivalente all'altezza delle foglie di *Festuca*, compreso tra il suolo e il confine tra biomassa vegetale ed aria, è stato misurato con cadenza settimanale. In particolare, è stata misurata l'altezza di 10 culmi in 6 differenti punti di campionamento randomizzati rappresentativi dell'area di rilevazione dell'albedometro (Figura 8).

L'andamento giornaliero medio dell'albedo in relazione allo spessore del prato, monitorato durante due mesi dal 24 giugno al 24 agosto 2021, è un andamento di tipo crescente: l'albedo aumenta all'aumentare dell'altezza del prato, passando da un valore pari a 20.5% nella situazione di prato appena tagliato (altezza di circa 5 cm, 24 giugno 2021) ad un valore di 21.6% registrato a fine prova (altezza circa 12 cm, 21 agosto 2021). Dal 30 luglio al 23 agosto 2021 l'altezza massima del prato si è mantenuta costante, ma nel tempo è

aumentata la densità delle foglie, fattore che può giustificare il continuo aumento dell'albedo anche dopo il 30 di luglio (Figura 9).



Figura 8 - Sito sperimentale dell'analisi dell'albedo in relazione allo spessore del prato, nel settore di prato a graminacee sul tetto verde ENEA (C.R. Casaccia). Le palette gialle sul prato indicano i punti di misurazione dell'altezza delle foglie. Foto del 17 luglio 2021.

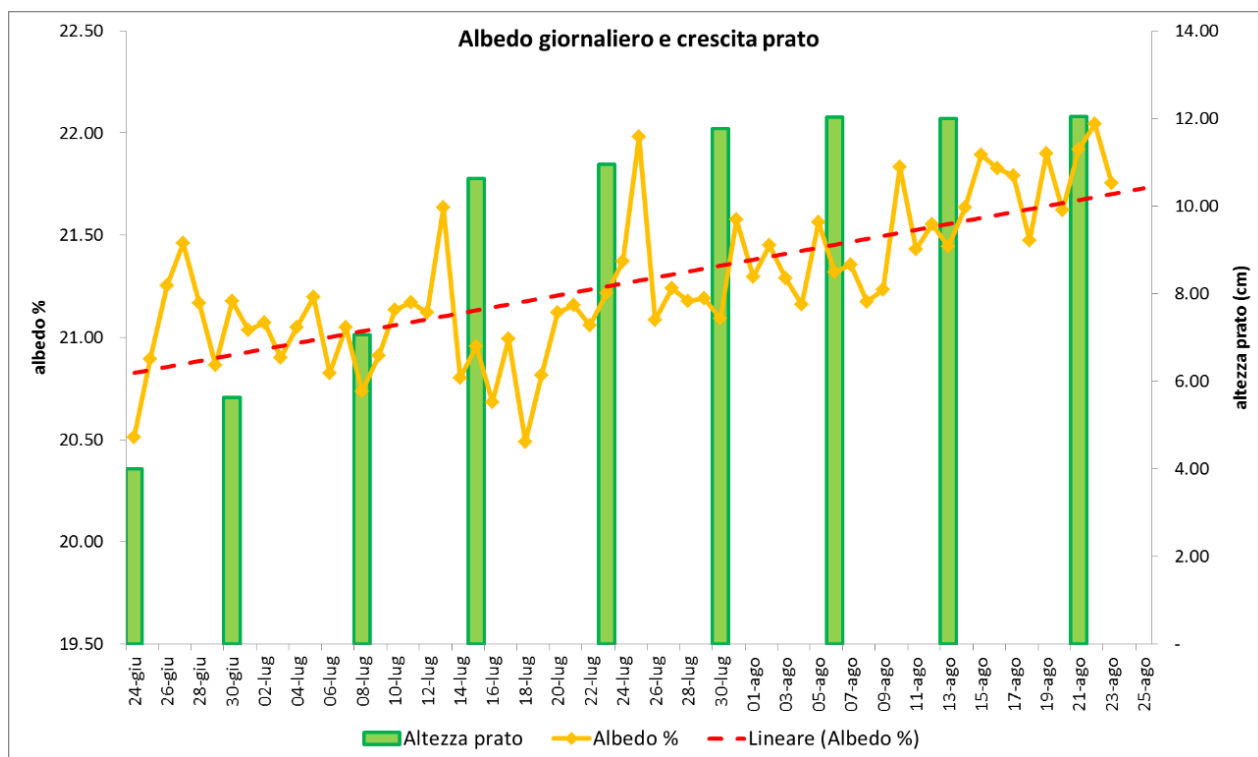


Figura 9 - Grafico a doppio asse dell'andamento dell'albedo (linea gialla) e dello spessore del prato (istogramma verde) registrati dal 24 giugno al 24 agosto 2021 nel settore di prato a graminacee sul tetto verde ENEA (C.R. Casaccia). In ordinata a sinistra sono riportati i valori di albedo espressi in % e a destra i valori di altezza del prato in cm; in ascissa sono riportati i giorni. La linea di tendenza (tratteggiata rossa) risultante dalla regressione lineare ($R^2=0.5057$) è relativa ai valori di albedo di cui dimostra un evidente andamento positivo.

Questi risultati consentiranno di stabilire indicazioni opportune e precise a supporto di una migliore pianificazione e gestione di un tipico tetto verde di tipo estensivo con copertura a graminacee (e non solo), con l'obiettivo di massimizzare l'effetto mitigante di un tetto verde sull'isola di calore urbana e sulle emissioni inquinanti. Bisogna inoltre considerare che un prato con uno spessore di biomassa maggiore si suppone favorisca un incremento dell'attività evapotraspirante. Un'aumentata evapotraspirazione, se da un lato può aumentare la capacità del tetto verde di stoccare le acque piovane, da un altro richiederà un'irrigazione costante e coerente con le attività fisiologiche delle piante. In questo contesto, la gestione dell'irrigazione è un aspetto fondamentale, soprattutto per i tetti verdi calpestabili ove si voglia conseguire e mantenere una funzione sociale-ricreativa e di conseguenza anche estetica.

La sperimentazione ENEA è ancora in corso e, attualmente, si sta anche indirizzando verso la misura dell'albedo a livello di diverse coperture vegetali, con l'obiettivo di fornire indicazioni di supporto per la selezione di essenze vegetali con albedo elevata. Tra le specie vegetali da testare, si prevede di includere anche piante spontanee. È degno di nota, infatti, che nel bacino del Mediterraneo siano presenti numerosi specie di piante xerofite adattate a vivere in ambienti caratterizzati da lunghi periodi di siccità o da clima arido o desertico, che sfruttano anche la morfologia fogliare e annessi secondari dell'epidermide, come ad esempio i tricomi, per ridurre la radiazione luminosa assorbita riflettendone una quota maggiore. Inoltre, l'adozione di specie autoctone potrà nel tempo garantire sui tetti verdi serbatoi di biodiversità e sostentamento per l'entomofauna tra cui i pronubi (Cameron e Blanuša 2016, Ayers e Rehan 2021). Allo stato dell'arte, se nel Nord d'Europa i tetti verdi costituiscono già una tecnologia ampiamente diffusa, nelle aree più a Sud a clima tipicamente mediterraneo, come l'Italia, queste infrastrutture su edifici in città sono ancora poco presenti. Nella fase attuale cosiddetta di transizione ecologica si prevede che l'impiego dei tetti verdi, insieme alle numerose altre installazioni di verde urbano in città e alle soluzioni basate sulla natura (*natural-based solutions*, NBS), verranno impiegate in maniera copiosa, dato il loro presunto ruolo chiave nella mitigazione del fenomeno delle isole urbane di calore, ma anche nel limitare possibili effetti catastrofici dovuti a fenomeni meteorici di forte intensità. Anche in questo senso, la vegetazione gioca un ruolo fondamentale in quanto può avere un'influenza più o meno positiva sui livelli di ritenuta idrica di un sistema tetto verde (Shafique et al. 2018, Kolasa-Więcek e Suszanowicz 2021).

12.3 Miglioramento genetico delle piante per fronteggiare la siccità

A livello globale, al di là del fenomeno isola di calore urbana, la ricerca biologica si è impegnata fortemente nello sviluppo di "piante riflettenti", ovvero piante dotate di maggiori capacità di riflettere la luce anche allo scopo di sviluppare piante con elevata efficienza nell'utilizzo dell'acqua (*water use efficiency*) che si possano adattare ai cambiamenti climatici. Infatti, ad oggi, nonostante siano stati compiuti importanti progressi tramite strategie di irrigazione più efficienti e colture più resistenti alla siccità, il problema della siccità è ancora urgente. Tuttavia, dato che le piante per traspirare e dissipare calore, hanno bisogno d'acqua [come anche richiesto nelle infrastrutture verdi su edifici ai fini di mitigare

l'isola di calore urbano], l'ingegnerizzazione di colture sia agricole che energetiche che veramente richiedono un apporto idrico inferiore e al tempo stesso esibiscono un'elevata riflettanza (albedo) potrebbe rivelarsi molto promettente. Dal punto di vista del miglioramento genetico, anziché incrementare il trasferimento di calore nelle piante, si è tentato di diminuire la temperatura delle piante per prevenirne il riscaldamento aumentandone la riflettanza.

Tipicamente, uno spettro *full-range* (350-2500 nm) riflesso da una foglia (Figura 10), che include buona parte della radiazione elettromagnetica dello spettro solare, è composto da tre regioni principali: *i*) il visibile (*visible*: VIS, 400-700 nm), vale a dire la cosiddetta radiazione fotosintetica (PAR) dello spettro solare, caratterizzato da bassi livelli di riflettanza a causa del forte assorbimento da parte dei pigmenti fogliari, specialmente nel blu e nel rosso e meno nel verde; *ii*) l'infrarosso vicino (*near infrared*: NIR, 700-1300 nm), contraddistinto da elevata riflettanza (dove l'energia non è elevata a sufficienza per le reazioni fotochimiche e non viene assorbita dai cloroplasti) e, principalmente, dipendente dalla composizione biochimica strutturale delle cellule che compongono i tessuti fogliari; *iii*) l'infrarosso a onde corte (*shortwave-infrared*: SWIR, 1300-2500 nm), caratterizzato da una nuova riduzione della luce riflessa, sia per la minore energia della radiazione incidente, sia per il forte assorbimento dovuto alla presenza di acqua nei tessuti fogliari e da minori assorbimenti specifici di vari metaboliti quali lignina, amido, cellulosa, proteine, azoto, fenoli e potenzialmente tutti gli altri (<http://www.georgofili.info/contenuti/nuove-tecnologie-per-monitorare-limpatto-ambientale-sulla-vegetazione-la-spettroscopia/10171>).

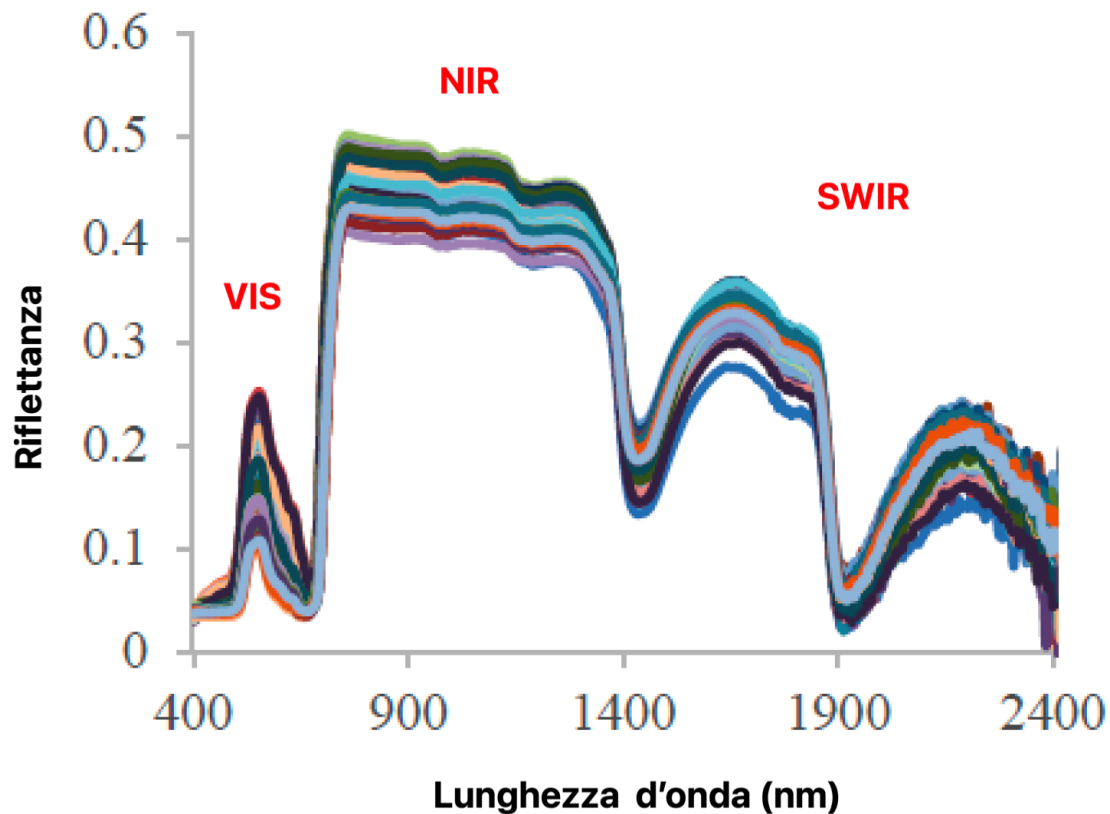


Figura 10. Spettri di riflettanza fogliare *full-range* nelle principali regioni dello spettro elettromagnetico da 400 a 2400 nm (figura rielaborata da Liu et al. 2017).

Le piante in natura hanno sviluppato una serie di meccanismi per riflettere la luce, che includono le caratteristiche di rugosità della cuticola della superficie fogliare, tricomi e strati con diversi indici di rifrazione, strutture fotoniche e *scattering* inter- ed intra-cellulare (Grant L 1987; Zamft et al. 2015). La maggiore riflessione degli UV avviene a livello della superficie fogliare della pagina superiore per la presenza di sottili strutture epicuticolari di cera, mentre nella pagina inferiore si ha una riflessione minima a causa della natura altamente assorbente della cuticola fogliare, delle pareti cellulari e dei stomati (Grant RH et al. 2003).

Secondo lo studio precedentemente menzionato di Ridgwell et al. (2009), la manipolazione del livello di cera delle piante coltivate, attraverso tecniche di incrocio tradizionale o attraverso modificazione genetica, dovrebbe aumentare la loro albedo di circa il 20%, passando da 0,20 a 0,24. Sulla base di modelli climatici, è stato calcolato che questa modesta variazione di albedo nelle piante determinerebbe un raffreddamento medio del

pianeta di soli 0,11°C: effetto di poca rilevanza a livello globale ma molto più importante in alcune regioni in estate; infatti, le latitudini centrali del Nord America e del continente Euroasiatico potrebbero raffreddarsi fino ad 1°C nei mesi di giugno, luglio ed agosto.

Se le piante che riflettono più luce dalla superficie fogliare effettuino di conseguenza meno fotosintesi è un aspetto molto controverso e la letteratura riporta anche numerose prove a confutare questo effetto. In particolare, i complessi delle piante che catturano la luce (*Light Harvesting Complex*, LHC) sono in grado di convertire solamente l'energia solare con lunghezze d'onda comprese tra circa 400 e 700 nm e solo alcune lunghezze d'onda del vicino IR e del lontano UV sono rilevanti per alcune vie metaboliche di segnalazione cellulare e per lo sviluppo delle piante (Kami et al. 2010). Generalizzando, la maggior parte delle lunghezze d'onda della luce al di fuori del PAR non ha alcuna funzione biochimica ma viene assorbita come calore. La riflessione parziale o totale di questa luce potrebbe ridurre drasticamente il carico di raffreddamento delle piante e quindi il loro consumo di acqua. Questo, ad esempio, potrebbe consentire lo sviluppo dell'agricoltura in luoghi in cui l'irrigazione non è disponibile o è scarsa, incluso nei tetti verdi di città localizzate in regioni prone alla desertificazione. Non ultimo, la riflessione di gran parte della luce improduttiva nello spazio può ridurre la quantità di radiazione solare incidente assorbita dalla Terra, contribuendo a mitigare la forza radiativa dalle emissioni antropogeniche di gas serra (GHG) sul clima.

A livello teorico, la coltivazione di colture anche ad uso alimentare che riflettono più luce, a partire da nuove colture geneticamente modificate e/o varietà ad alto albedo di colture esistenti, potrebbe raffreddare l'atmosfera riflettendo più radiazioni solari nello spazio. Tuttavia, bisogna considerare che abbiamo a disposizione ancora troppe poche conoscenze circa i potenziali effetti che un'aumentata riflettività delle piante potrebbe esercitare sulle piante stesse (ad esempio rispetto al loro contenuto nutrizionale, alla capacità fotosintetica e ad altre vie metaboliche), sul suolo e sull'ambiente circostante in generale.

Bibliografia

- Ahmad SB, Lockwood J (1979) Albedo. *Prog. Phys. Geogr.* 3: 510-543.
- Ayers AC, Rehan SM (2021) Supporting Bees in Cities: How Bees Are Influenced by Local and Landscape Features. *Insects* 12: <https://doi.org/10.3390/insects12020128>
- Berto R, Cechet G, Staival CA (2015) Capitolo 3. Le prestazioni connotanti delle coperture verdi. In "Le coperture verdi. Implicazioni tecnologiche, strutturali, energetiche ed economico-sociali". EUT Edizioni Università Trieste. ISBN: 978-88-8303-700-9.

- Cameron RW, Blanuša T (2016) Green infrastructure and ecosystem services - is the devil in the detail? *Ann. Bot.* 118: 377-391. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw129>
- Campiotti CA, De Rossi P, Giagnacovo G, Latini A, Nencini L, Pace M, Sperandei M. (2020) Infrastrutture “verdi” per migliorare l’efficienza energetica degli edifici e la qualità del microclima nelle aree urbane. Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PAR2019/042. Disponibile online in https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2019-2021/tecnologie-efficienza-risparmio-edifici/report-rds_ptr_2019_042.pdf
- Campiotti CA, Scibetta C, Caltabellotta N, Consorti L, Joustas, A. (2019) Green roofs for the energy and environmental sustainability of buildings. *Review of Studies on Sustainability.* 2/2019, 27-11. ISSN: 2239-1959.
- Campiotti CA, Giagnacovo G, Latini A, Margiotta F, Nencini L, Pazzola L, Puglisi G. (2017) Le coperture vegetali per la sostenibilità energetica ed ambientale degli edifici. Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PAR2016/075. Disponibile online https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/adp-mise-enea-2015-2017/edifici-intelligenti/rds_par2016_075.pdf
- Grant L (1987) Diffuse and specular characteristics of leaf reflectance. *Remote Sens. Environ.* 22: 309-22. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(87\)90064-2](https://doi.org/10.1016/0034-4257(87)90064-2)
- Grant RH, Heisler GM, Gao W, Jenks M (2003) Ultraviolet leaf reflectance of common urban trees and the prediction of reflectance from leaf surface characteristics. *Agric. For. Meteorol.* 120:127-39. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.025>
- Irvine PJ, Ridgwell A, Lunt DJ (2011) Climatic effects of surface albedo geoengineering. *J. Geophys. Res. Atmos.* 116: D24112. <https://doi.org/10.1029/2011JD016281>
- Kami C, Lorrain S, Hornitschek P, Fankhauser C (2010) Light-regulated plant growth and development. *Curr. Top. Dev. Biol.* 91: 29-66. [https://doi.org/10.1016/s0070-2153\(10\)91002-8](https://doi.org/10.1016/s0070-2153(10)91002-8)
- Kolasa-Więcek A, Suszanowicz D, Pilarska AA, Pilarski K (2021) Modelling the interaction between air pollutant emissions and their key sources in Poland. *Energies* 14: 6891. <https://doi.org/10.3390/en14216891>
- Liu L, Song B, Zhang S, Liu X (2017) A novel principal component analysis method for the reconstruction of leaf reflectance spectra and retrieval of leaf biochemical contents. *Remote Sens.* 9: 1113. <https://doi.org/10.3390/rs9111113>
- Otterman J (1974) Baring high-albedo soils by overgrazing: a hypothesized desertification mechanism. *Science* 186: 531-3.
- Ridgwell A, Singarayer JS, Hetherington AM, Valdes PJ (2009) Tackling regional climate change by leaf albedo bio-geoengineering. *Curr. Biol.* 19: 146-50. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.12.025>
- Santamouris M (2014) Cooling the cities – a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy* 103: 682-703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Shafique M, Kin R, Kyung-Ho K (2018) Green roof for stormwater management in a highly urbanized area: the case of Seoul, Korea. *Sustainability* 10: 584. <https://doi.org/10.3390/su10030584>
- Simmons M, Gardiner B, Windhager, Tinsley J (2008) Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosyst.* 11: 339-48. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0069-4>
- Theodosiou T (2009) Green roofs in buildings: thermal and environmental behaviour. *Adv. Build. Energy Res.* 3: 271-88. <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0311>
- World Meteorological Organization, WMO (1983) Guide to Meteorological Instruments and Methods of observation. *Weather, Climate, Water.* Report N° 8.
- Zamft BM, Conrado RJ (2015) Engineering plants to reflect light: strategies for engineering water-efficient plants to adapt to a changing climate. *Plant Biotechnol. J.* 13: 867-74. <https://doi.org/10.1111/pbi.12382>
- Zinzi M (2010) Cool materials and cool roofs: potentialities in Mediterranean buildings. *Adv Build Energy Res* 4: 201-66. <https://doi.org/10.3763/aber.2009.0407>

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
gennaio 2022