



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

Infrastrutture “verdi” per migliorare l’efficienza energetica degli edifici e la qualità del microclima nelle aree urbane

Campiotti C.A., De Rossi P., Giagnacovo G., Latini A., Mariani S., Nencini L., Pace S.,
Sperandei M.

INFRASTRUTTURE “VERDI” PER MIGLIORARE L’EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI E LA QUALITÀ DEL MICROCLIMA NELLE AREE URBANE

Campiotti C.A., De Rossi P., Giagnacovo G., Latini A., Mariani S., Nencini L., Pace S., Sperandei M. (ENEA)

Con il contributo di: L. Colasuonno, E. Ferretti, F. Hugony, A. Marone, P. Pistochini, F. Zanghirella (ENEA), L. Consorti (CIRPS-Centro Interuniversitario di Ricerca per lo Sviluppo Sostenibile), L. Gatti (Università degli Studi di Viterbo “La Tuscia”)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

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

Linea di attività: *LA2.2 - Infrastrutture “verdi” per migliorare l'efficienza energetica degli edifici e la qualità del microclima delle aree urbane – Anno 2*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package: Giovanni Puglisi

Si ringrazia il prof. R. Muleo (Università degli Studi di Viterbo “La Tuscia”) per il suo contributo e le idee condivise.

Indice

1	INTRODUZIONE	6
2	PARETE VERDE	8
2.1	VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEI SISTEMI VERDI NEL MODIFICARE LA CONCENTRAZIONE DI CO ₂ NELL'ARIA CIRCOSTANTE	10
2.1.1	<i>Valori medi mensili della concentrazione di CO₂</i>	11
2.1.2	<i>Andamento medio settimanale della concentrazione di CO₂ di notte e di giorno nelle settimane dal 10 al 16 di ciascun mese</i>	15
2.1.3	<i>Andamento della concentrazione di CO₂ per ciascuna ora del giorno nelle settimane dal 10 al 16</i>	17
2.1.4	<i>Analisi dei dati meteorologici che possono avere effetto sulla concentrazione della CO₂</i>	20
2.2	VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEI SISTEMI VERDI NEL MODIFICARE LA COMPOSIZIONE DELL'ARIA, CON RIFERIMENTO AI PIÙ COMUNI INQUINANTI ATMOSFERICI (COV) PER IL MIGLIORAMENTO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA	25
2.2.1	<i>Definizione dei Composti Organici Volatili (COV)</i>	25
2.2.2	<i>Composti organici volatili (COV) e il gruppo del benzene e dei suoi derivati (BTEX)</i>	25
2.2.3	<i>Attività di monitoraggio dei BTEX presenti nell'aria</i>	27
2.3	STUDIO DI SPECIE CON ELEVATE CARATTERISTICHE DI MITIGAZIONE DEGLI INQUINANTI ATMOSFERICI	29
2.4	EFFETTI DEL VERDE PARIETALE SUL MICROCLIMA DEL "GAP" DELL'EDIFICIO	34
2.5	FLUSSI ENERGETICI DEL SISTEMA PARETE VERDE DELL'EDIFICIO	37
3	TETTO VERDE	44
3.1	PREDISPOSIZIONE OPERATIVA DEL SISTEMA SPERIMENTALE CON LA DEFINIZIONE DEI SENSORI E DEI PUNTI DI MISURA FUNZIONALI AL MONITORAGGIO DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE (ET) E DELLA FOTOSINTESI	45
3.2	ANDAMENTO DEI PARAMETRI CLIMATICI SUL TETTO – ANNO 2020	46
3.3	CONFRONTO TRA DUE DIFFERENTI TIPOLOGIE VEGETALI SULL'ISOLAMENTO TERMICO DEL MANTO ERBOSO	49
3.4	VALUTAZIONE DELLA SCHERMATURA NEI CONFRONTI DELLA RADIAZIONE SOLARE INCIDENTE DA PARTE DELLO STRATO VERDE ATTRAVERSO LA RACCOLTA DEI VALORI DI ALBEDO CON L'OSSERVAZIONE DEI FATTORI BIOMETRICI RELATIVI ALL'ALTEZZA E ALLO SPESSORE DELLO STRATO VERDE CON MISURE SU PARCELLE TEST	63
3.4.2	<i>Andamento dei valori di albedo in relazione ai fattori biometrici di altezza dello strato verde</i>	66
3.4.3	<i>Andamento dei valori di albedo in relazione alla radiazione globale</i>	66
3.4.3	<i>Andamento dei valori di albedo in relazione alla temperatura dell'aria e alla temperatura fogliare</i>	68
3.2	FLUSSI ENERGETICI DEL SISTEMA TETTO VERDE DELL'EDIFICIO	69
4	SERRA BIOCLIMATICA	75
4.1	ALLESTIMENTO DEL SISTEMA "VERDE" ALL'INTERNO DELLA SERRA BIOCLIMATICA	75
4.2	MISURA DELLA EVAPOTRASPIRAZIONE (ET) DELLE PIANTE	78
4.3	INFLUENZA DEL PROCESSO NATURALE DI ET DEL SISTEMA VERDE NEI CONFRONTI DEL RAFFRESCAMENTO DELLA SERRA	80
4.4	VALUTAZIONE DELLA RIDUZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE IN FUNZIONE DELLA RIDUZIONE DELL'EFFETTO SERRA ATTRAVERSO LA REGOLAZIONE DEL SISTEMA DI OMBREGGIAMENTO E DELLE APERTURE PER FAVORIRE LA VENTILAZIONE, NEL PERIODO ESTIVO	81
4.5	STUDIO DELLO SCAMBIO CONVETTIVO TRA L'AMBIENTE SERRA E L'AMBIENTE INTERNO DELLA STANZA ADIACENTE, NEL PERIODO INVERNALE	85
5	VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA AMBIENTALE DI INFRASTRUTTURE VERDI ATTRAVERSO TECNICHE DI REMOTE SENSING & GIS	87
5.1	PREMESSA	87
5.2	PRINCIPI DI TELERILEVAMENTO TERMICO	88
5.3	LO SPETTRO ELETTROMAGNETICO NEL TELERILEVAMENTO TERMICO	88
5.4	FINESTRE ATMOSFERICHE	90
5.5	IL CONCETTO DI TEMPERATURA RADIOMETRICA, EMISSIVITÀ, LST (LAND SURFACE TEMPERATURE)	90
5.6	DATI SATELLITARI DISPONIBILI	91
5.7	CALCOLO DELLA LAND SURFACE TEMPERATURE	98
5.8	SOFTWARE PER L'ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI	102
5.9	MATERIALE SELEZIONATO	104

5.10	PRE-ELABORAZIONE DEI DATI DI SENTINEL 1 E 2 ACQUISITI	106
6	CONCLUSIONI	110
7	BIBLIOGRAFIA	112

Sommario

Il verde è da sempre un elemento di progetto nell'architettura degli edifici e di decoro urbano delle città, ma fino a poco tempo fa il suo utilizzo era soltanto a scopo decorativo. Oggi, il verde sugli edifici viene considerato, nel mondo delle costruzioni, un vero e proprio componente edilizio che oltre a diminuire gli impatti ambientali e i costi energetici per la climatizzazione, favorisce anche lo sfruttamento di spazi e superfici altrimenti non utilizzati nelle città. Le infrastrutture verdi, in particolare i tetti e le pareti verdi, considerate tra le soluzioni naturali (*nature-based solution*, NBS), contribuiscono fortemente al miglioramento della sostenibilità ambientale ed energetica delle città.

Il gruppo di ricerca ENEA del Laboratorio DUEE-SIST-NORD è impegnato su questo tema nell'ambito dell'accordo di Programma MiSE-ENEA "Ricerca di Sistema Elettrico" (RdS); per il triennio 2019-2021 della programmazione sviluppa le linee d'attività inserite nel WP2 (LA2.1, LA2.2, LA2.3) "INFRASTRUTTURE "VERDI" PER MIGLIORARE L'EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI E LA QUALITÀ DEL MICROCLIMA NELLE AREE URBANE". Le attività di ricerca vengono svolte principalmente nel sito sperimentale presso il CR ENEA Casaccia, costituito dall'edificio F92 denominato "Scuola delle Energie". Su questo edificio-prototipo, con i fondi ottenuti dal lavoro svolto durante il precedente Triennio 2016-2018 del programma RdS, sono stati realizzati tre tipologie di infrastrutture verdi sperimentali - parete verde, tetto verde e serra bioclimatica - corrispondenti ai tre sistemi "verdi" oggetto di ricerca e di implementazione nel triennio 2019-2021 in corso. L'edificio prototipo è stato dotato di un sistema di monitoraggio costituito da un'ampia gamma di sensori che posizionati in modo opportuno effettuano il controllo microclimatico continuo rendendo l'edificio prototipo un caso di studio particolarmente rilevante. Data l'unicità della piattaforma sperimentale si evidenzia che i dati rilevati e oggetto di studio anche il prossimo anno potranno essere utilizzati oltre il termine del Progetto e resi disponibili per le pubbliche amministrazioni che vorranno realizzare tipologie di coperture verdi di tipo parietale (pareti verdi) o di tipo orizzontale (tetti verdi) .

In questo report si riportano le attività di ricerca affrontate nel 2020 inerenti alla linea di attività LA2.2. La sperimentazione sulla **parete verde** è stata principalmente finalizzata al monitoraggio della CO₂ e all'analisi dei dati in relazione ai differenti parametri microclimatici con il fine di valutare la capacità di sequestro della CO₂ da parte della copertura vegetale. L'attività sperimentale riguardante l'effetto della vegetazione della parete verde sulla riduzione dei composti organici volatili (COV), per una valutazione più esaustiva, verrà protratta anche nel 2021. Nel 2020, tuttavia, è stata effettuata una valutazione preliminare dei composti BTEX nella zona del CR ENEA Casaccia, a livello della parete verde e di una corrispondente parete priva di vegetazione.

Il monitoraggio microclimatico sul **tetto verde** ha consentito una valutazione dell'effetto delle diverse specie vegetali sulla riduzione delle temperature superficiali rilevate sotto il manto erboso. Sono stati confrontati gli effetti di una comune copertura a Graminaceae con una copertura a *Sedum*, tutte specie note per essere utilizzate nei tetti verdi di tipo estensivo. In aggiunta, è stata avviata la sperimentazione con l'albedometro, sia per valutare la relazione tra l'albedo e lo spessore del prato, sia per incrementare le conoscenze disponibili sulle interazioni con altri parametri climatici e radiativi.

L'avanzamento più rilevante riguardo la **serra bioclimatica verde** è rappresentato dall'introduzione di una vegetazione opportunamente scelta e dalle misurazioni di evapotraspirazione da parte delle piante che hanno consentito di determinare la quantità di energia solare che invece di essere assorbita dalle strutture (carico sensibile) passa a carico latente (evaporazione).

1 Introduzione

Le infrastrutture verdi possono essere definite come “reti di aree naturali e seminaturali pianificate a livello strategico con altri elementi ambientali, progettate e gestite in maniera da fornire un ampio spettro di servizi ecosistemici” e vanno considerate come uno strumento che sta ricevendo un’attenzione crescente a livello mondiale [1]. Le infrastrutture verdi per edifici, principalmente i tetti e le pareti verdi, ma non esclusivamente, comportano l’ulteriore beneficio di sfruttare degli spazi altrimenti non utilizzati a vantaggio dell’ambiente e del benessere degli individui e inoltre possono contribuire all’isolamento termico degli edifici determinando una riduzione dei consumi energetici per il riscaldamento invernale e la climatizzazione estiva [2]. L’innovazione continua applicata a queste strutture al fine di renderle più efficienti dal punto di vista energetico, e al tempo stesso più sostenibili, porta a considerare queste soluzioni come vere e proprie tecnologie sia di pianificazione che di rigenerazione urbana all’avanguardia per mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici, tra cui in particolare il fenomeno dell’isola di calore in città, e per stimolare la resilienza di città e comunità [3]. Le infrastrutture verdi urbane possono essere progettate per svolgere specifici servizi ecosistemici come l’assorbimento della CO₂ e degli inquinanti atmosferici, inclusi diversi composti organici volatili (COV) e il particolato; la termoregolazione per ridurre le isole di calore; la laminazione delle acque meteoriche, anche finalizzata al riuso, ed infatti i tetti e le pareti verdi sono classificati come sistemi sostenibili per il drenaggio urbano (*Sustainable Urban Drainage System*, SUDS); la produzione di alimenti e materie prime stimolando l’orticoltura urbana e la produzione a Km zero. Non ultimo, l’uso esteso delle infrastrutture verdi sugli edifici, oltre a migliorare sostanzialmente la qualità ecologica e sociale delle aree urbane, può generare incrementi netti nei valori del capitale costruito ed attrarre ulteriori investimenti.

Il focus della ricerca durante il Triennio 2019-2021 è la valutazione di alcuni benefici microclimatici, ambientali ed energetici apportati dalle infrastrutture verdi nell’ottica di implementare l’efficienza energetica degli edifici e di conseguenza apportare miglioramenti ai parametri ambientali delle aree urbane. In particolare, i tre prototipi di sistemi verdi installati presso l’edificio caso studio nel Centro Ricerche Casaccia dell’ENEA, costituenti i *target* delle azioni progettuali, sono: *i)* parete verde, *ii)* tetto verde e *iii)* serra bioclimatica.

Le attività del 2019 (LA2.1) riportate nel precedente report RdS hanno riguardato principalmente la pianificazione della ricerca triennale, inclusa l’integrazione di alcuni sensori per il monitoraggio dei parametri microclimatici ed ambientali sui diversi sistemi verdi. Per analizzare gli effetti più rilevanti della componente vegetale sulla mitigazione del clima in ambiente urbano, rispetto alla parete verde, è stato implementato un sistema di campionamento e di misura per valutare la capacità di assorbimento della CO₂ da parte delle piante. I sensori dedicati sono stati posizionati a differenti altezze dell’edificio, al fine di valutare il livello di stratificazione di questo gas e gli effetti sulla CO₂ nell’aria in prossimità di una parete rivestita da essenze vegetali rispetto ad una parete nuda. Inoltre, al fine di approfondire l’efficacia delle infrastrutture verdi presenti sugli edifici sul miglioramento della qualità dell’aria in ambiente urbano, è stata pianificata la sperimentazione per valutare l’effetto del verde parietale sui COV. Per quanto riguarda il tetto verde, è stato predisposto il protocollo per il rilevamento dell’albedo e dell’evapotraspirazione (ET) di diverse specie vegetali che verranno testate in fase sperimentale. Tali parametri sono legati all’effetto delle coperture verdi sul microclima dell’ambiente esterno superficiale e di quello interno sottostante lo strato verde. Ed ancora, è stato effettuato uno studio approfondito sulla capacità di accumulo d’acqua da parte dei tetti verdi. Infine, sulla serra bioclimatica, dopo un’attenta ricerca bibliografica sul processo di ET delle piante, sono state selezionate le specie vegetali dotate di elevato potenziale di ET da introdurre nella serra allo scopo di ottimizzare il raffrescamento estivo dell’ambiente interno della serra e di quello confinante interno all’edificio, e di ottenere quindi un risparmio energetico.

Le attività della linea LA2.2, oggetto di questo report, sono il prosieguo delle attività precedenti. Il report presenta l'attività sperimentale svolta durante il 2020, includendo la raccolta e l'analisi dei dati microclimatici rispetto ai tre prototipi "verdi" in seguito all'implementazione dei sensori. In particolare, sulla parete è stata condotta la sperimentazione sulla concentrazione della CO₂ al fine di valutare la capacità di sequestro della CO₂ da parte della copertura vegetale ed è stata avviata la sperimentazione dei COV sui composti BTEX che procederà ulteriormente nel 2021. Sul tetto verde è stato valutato l'effetto della copertura verde sulla riduzione della temperatura superficiale del solaio, con comparazione tra diversi tipi di vegetazione, e sono state avviate delle campagne di misura dell'albedo che hanno consentito di valutare l'effetto dello spessore del verde su questa proprietà. Le attività principali in serra bioclimatica, in relazione all'introduzione della componente vegetale al suo interno, hanno riguardato la predisposizione logistica di vasi, terreni, piante e sistema d'irrigazione automatico; inoltre è stata valutata la quantità di acqua evapotraspirata da diverse specie orticole cresciute in opportune condizioni sperimentali e l'irraggiamento solare assorbito. Non ultimo, è stato messo a punto un protocollo strategico per valutare l'impatto delle infrastrutture verdi sul clima urbano, analizzando gli effetti della vegetazione collocata sugli edifici sulla temperatura superficiale del suolo (*Land Surface Temperature, LST*) sfruttando la tecnologia del telerilevamento.

2 Parete verde

L'evoluzione della copertura vegetale nel corso del 2020 sulla parete verde presente nel CR ENEA Casaccia viene mostrata attraverso alcune immagini in vari mesi dell'anno in (Figura 1).

In particolare, focalizzando l'attenzione sulla vegetazione in corrispondenza dei sensori della anidride carbonica (CO₂) (Tabella 1), si osserva che le pareti a Sud-Ovest ed a Sud-Est al primo piano, dove è presente la specie caducifolia *Parthenocissus quinquefolia*, sono spoglie in inverno fino a primavera inoltrata ed inverdite da maggio a settembre, in corrispondenza della fine dell'estate. Queste zone della parete proseguono il loro naturale decorso coprendosi di rosso in autunno e tornando ad essere spoglie con l'inizio dell'inverno (dicembre). Diversamente, al secondo piano, sia a Sud-Ovest che a Sud-Est, la parete è caratterizzata dalla presenza della specie sempreverde *Hedera helix*. In generale, tutte le piante hanno subito un forte stress idrico per la tardiva accensione del sistema di irrigazione dovuta a ritardi conseguenti al *lockdown* a partire dal mese di marzo che non ha consentito l'ingresso nel Centro. Di conseguenza, la crescita della vegetazione e la rigogliosità della parete durante l'estate 2020 è risultata di gran lunga inferiore rispetto all'estate del 2019 (Figura 2).





Figura 1. Evoluzione della copertura vegetale della parete verde presente nel CR ENEA Casaccia nel corso del 2020



Figura 2. Confronto della crescita della vegetazione sulla parete verde nel mese di luglio, nel 2019 (a sx) e nel 2020 (a dx)

2.1 Valutazione dell'efficacia dei sistemi verdi nel modificare la concentrazione di CO₂ nell'aria circostante

Le piante influenzano la concentrazione dell'anidride carbonica circostante attraverso due processi: la fotosintesi e la respirazione. La fotosintesi avviene solo durante il giorno, porta al sequestro di CO₂ e utilizza la radiazione luminosa, in particolare la frazione fotosinteticamente attiva (*Photosynthetic Active Radiation, PAR*), nell'intervallo spettrale 400-700 nm, che rappresenta circa il 42% della radiazione totale, come fonte di energia. Diversamente, la respirazione porta all'immissione di CO₂ nell'atmosfera, è un processo che non ha bisogno di luce e che avviene pertanto sia di giorno che di notte, in condizioni adeguate di umidità e temperatura.

In questo paragrafo riportiamo lo studio dell'influenza delle due pareti verdi a Sud-Est e a Sud-Ovest dell'edificio F92 sulla concentrazione di CO₂ circostante. I dati provengono dalla campagna di rilevamento durante l'intero anno 2020, misurando i campioni d'aria prelevati da dieci punti di rilievo opportunamente localizzati.

In questo lavoro, la [CO₂] è stata misurata da un analizzatore prelevando dai dieci punti scelti un campione d'aria su cui effettuare la misura. Il campionamento è avvenuto con un intervallo ≥ 1800 s e con una permanenza su ogni punto di prelievo ≥ 10 s. I dati sono stati registrati nella memoria del *datalogger* (Licor LI-830), che alimenta un *database* in un server remoto e che gestisce altre funzioni del sistema analitico, quali:

- guida le temporizzazioni impostate
- controlla le pompe e le elettrovalvole
- verifica la presenza di anomalie

I valori di concentrazione di CO₂ sono espressi in *ppm*.

In Tabella 1 sono riportati i dieci punti di misura e la loro collocazione. I dati sono stati analizzati valutando le concentrazioni medie mensili, quelle medie settimanali con gli andamenti nelle ore notturne e diurne e gli andamenti medi delle 24h.

Tabella 1. Sensori per il rilevamento della [CO₂] installati sull'edificio

PUNTI DI RILIEVO	COLLOCAZIONE
CO2-1	parete Sud-Est primo piano, tra le foglie
CO2-2	parete Sud-Est primo piano, intercapedine
CO2-3	stanza primo piano al centro del soffitto
CO2-4	stanza secondo piano al centro del soffitto
CO2-5	parete Sud-Ovest primo piano, tra le foglie
CO2-6	parete Sud-Ovest primo piano, intercapedine
CO2-7	parete Sud-Ovest secondo piano, tra le foglie
CO2-8	parete Sud-Ovest secondo piano, intercapedine
CO2-9	parete Sud senza vegetazione
CO2-10	parete Nord senza vegetazione

2.1.1 Valori medi mensili della concentrazione di CO₂

L'analisi mensile dei valori medi di [CO₂] a livello della parete verde è stata fatta in due modi distinti: (a) considerando e mediando tutti i dati registrati durante le 24 ore della giornata e (b) considerando e mediando soltanto i dati registrati nell'arco orario giornaliero dalle 8:00 alle 20:00 per mettere in evidenza il contributo del processo fotosintetico che avviene di giorno in presenza di luce.

In Figura 3 sono riportati i valori medi mensili di [CO₂] calcolati sull'intera giornata (a), considerando pertanto sia il contributo "positivo" (che sottrae CO₂ dall'aria) della fotosintesi che il contributo "negativo" (che immette CO₂ nell'aria) della respirazione [4].

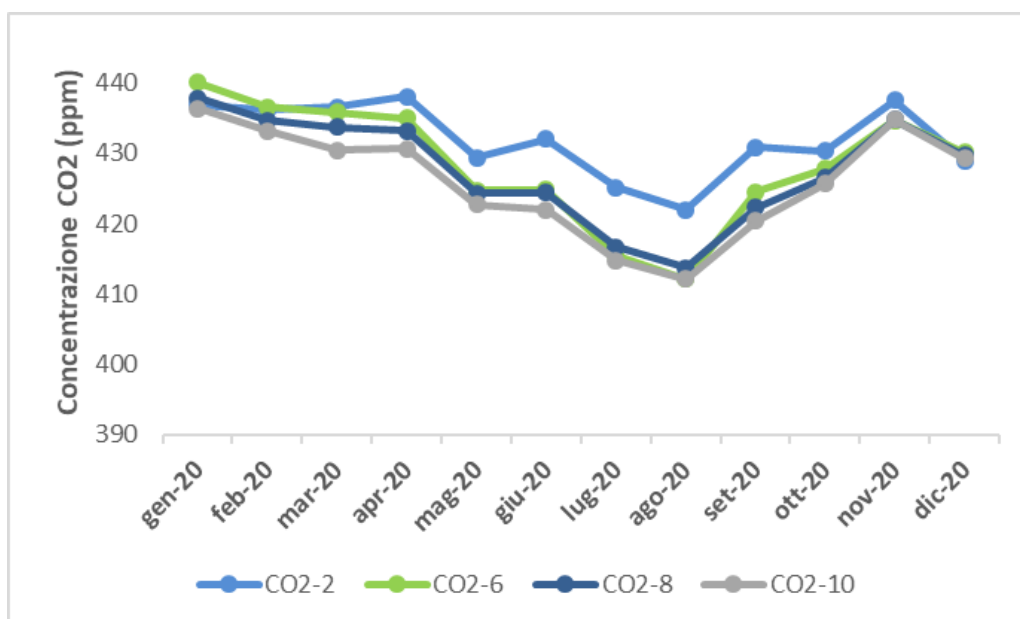


Figura 3. Valori medi mensili della concentrazione di CO₂ calcolati sull'intera giornata (24h)

I punti di misura CO2-2 rispetto alla parete Sud-Ovest al 1° piano, CO2-6 rispetto alla parete Sud-Est al 1° piano e CO2-8 rispetto alla parete Sud-Est al 2° piano sono tutti localizzati a livello dell'intercapedine tra la parete verde e la parete perimetrale dell'edificio. Il punto di misura CO2-10, invece, rappresenta un controllo negativo, in quanto posizionato su una parete a Nord dell'edificio dove non è presente il verde parietale, e monitora la concentrazione di CO₂ nell'area dove è localizzato l'edificio. Tale CO2-10 rileva un valore medio di [CO₂] quasi sempre inferiore ai valori riportati dagli altri sensori e monitora una diminuzione della concentrazione per lo più costante che inizia ad aprile e ha il suo minimo nel mese di agosto. Va detto che l'edificio F92 è collocato in un territorio ricco di vegetazione, pertanto questa variazione è probabilmente legata all'aumento dell'attività fotosintetica dovuta sia alla crescita della vegetazione nell'ambiente circostante che alla durata e all'intensità dell'irraggiamento con il variare delle stagioni. I punti di misura CO2-2, CO2-6, CO2-8 nell'intercapedine tra la parete verde e quella perimetrale dell'edificio monitorano pertanto l'effetto diretto delle pareti verdi. In particolare, quelli posizionati a Sud-Ovest, CO2-6 e CO2-8, mostrano un andamento simile al controllo CO2-10, con dei valori leggermente superiori; mentre il CO2-2, posizionato a Sud-Est, presenta un andamento simile ai precedenti ma valori decisamente più elevati specialmente tra maggio e settembre. In Tabella 2 sono riportati i dati in dettaglio.

Tabella 2. Valori medi mensili della concentrazione di CO2 calcolati sull'intera giornata (24 h)

MESI		CO2-2 (ppm)	CO2-3 (ppm)	CO2-4 (ppm)	CO2-6 (ppm)	CO2-8 (ppm)	CO2-10 (ppm)
Gennaio	media	436,89	424,8	417,25	440,03	437,87	436,39
	min	413,7	406	393,4	413,5	414,4	413
	max	519,9	460,6	474,9	525	517,5	511,3
Febbraio	media	436,11	426,1	421,17	436,57	434,64	433,14
	min	410,8	406,4	399,1	409,1	410,4	409,4
	max	543,7	502	486	527,2	517	512,1
Marzo	media	436,6	428,39	422,07	435,79	433,72	430,44
	min	400,7	405,4	398,8	399,9	406,1	403,5
	max	605,1	737,5	511,3	613,1	606,1	533,3
Aprile	media	438,1	433,83	427,55	435	433,18	430,66
	min	403,6	404,7	397,4	399,7	404,3	402,4
	max	652,1	539,6	495,4	650,5	659,4	550,2
Maggio	media	429,41	423,63	420,52	424,75	424,31	422,76
	min	384,2	393,1	395,8	392,9	392,8	394,5
	max	585,9	521	487,7	559,3	547,8	525,4
Giugno	media	432,07	424,47	422,7	424,81	424,36	421,99
	min	401,1	395,2	396,4	390,5	394,3	400,9
	max	596,1	529,6	507,4	585,9	575,1	533,8
Luglio	media	425,16	416,55	416,11	415,49	416,7	414,81
	min	402,6	390,8	387,9	380,2	384,3	396,3
	max	616,2	506,2	485,9	598,9	565,8	521,8
Agosto	media	422,02	409,19	410,87	412,12	413,68	412,13
	min	400,9	386	385,8	383,5	384,3	394,1
	max	532,8	471,6	487,6	516,9	516,8	480,5
Settembre	media	430,87	422,59	413,37	424,47	422,26	420,38
	min	401,3	390,4	385,9	388,4	385,8	394,9
	max	620,1	517,8	484,3	634,8	600,7	569,6
Ottobre	media	430,32	426,67	426,51	427,82	426,51	425,68
	min	399,2	378,7	389,4	395,4	381,5	384
	max	522,4	501,1	516,6	538,3	520,1	503,9
Novembre	media	437,5	436,18	433,85	434,66	434,74	434,82
	min	404,5	401,6	400,3	401,7	402	401
	max	529,8	529,1	529	530,2	526,5	526,9
Dicembre	media	428,93	426,58	420,64	430,09	429,67	429,3
	min	405,3	406,3	389,1	404,7	404,7	403,9
	max	525,5	492,2	490,8	531,1	540,9	507,4

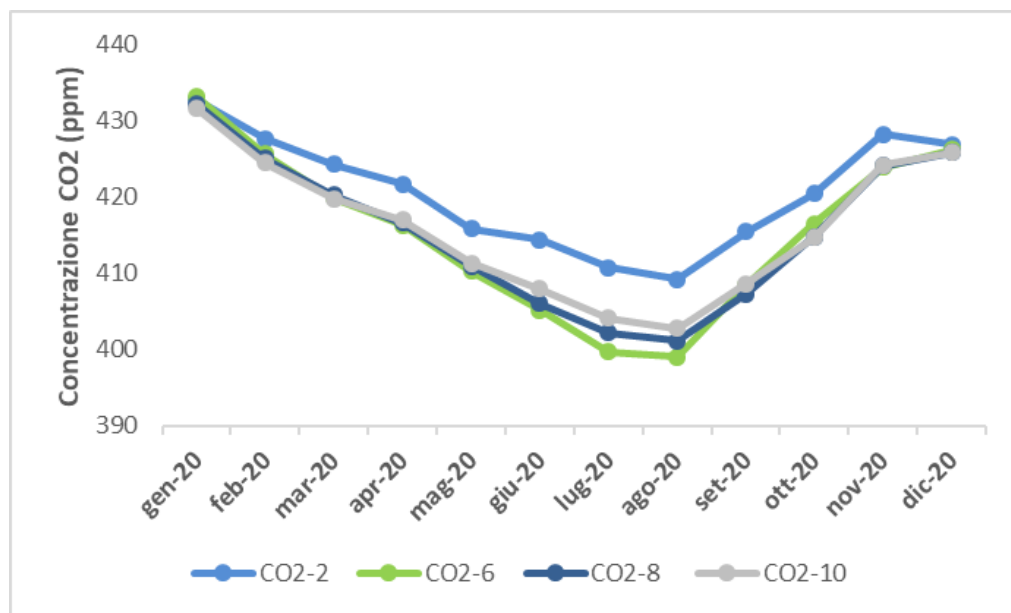


Figura 4. Valori medi mensili della concentrazione di CO₂ calcolati tra le 8:00 e le 20:00 di ogni giorno

Nella Figura 4 i valori riportati in ogni punto di misura sono più bassi rispetto agli stessi della Figura 3 e le curve iniziano a diminuire in modo costante a partire da gennaio per raggiungere anche in questo caso il minimo ad agosto. Nei mesi giugno, luglio e agosto, CO₂-6 e CO₂-8 sulla parete a Sud-Ovest mostrano valori leggermente più bassi del controllo CO₂-10. Diversamente, CO₂-2 sulla parete a Sud-Est monitora sempre valori di concentrazione più alti anche se in misura decisamente minore rispetto a quanto osservato in Figura 3. Questo andamento conferma che durante il giorno prevale il processo fotosintetico rispetto alla respirazione, in modo particolare nel periodo estivo.

La parete verde a Sud-Est ha una superficie maggiore ($\sim 67 \text{ m}^2$) di quella a Sud-Ovest ($\sim 32 \text{ m}^2$) determinando nei periodi di maggior sviluppo della vegetazione un maggior aumento sia dell'attività fotosintetica che di quella respiratoria. La maggior concentrazione di CO₂ che si evidenzia all'interno delle due intercapedini probabilmente è legata ad una minore aerazione e/o a moti convettivi dell'aria che portano ad un accumulo dell'anidride carbonica in particolar modo a Sud-Est.

In Figura 5 e Figura 6, per rendere più evidenti le differenze tra il periodo invernale e quello estivo, sono riportati i valori relativi ai mesi di gennaio (durata media del giorno per Roma 9 h e 33 min) e febbraio (durata media del giorno per Roma 10 h e 37 min), quali mesi centrali invernali, e quelli relativi a mesi di luglio (durata media del giorno per Roma 14 h e 55 min) e agosto (durata media del giorno per Roma 13 h e 52 min), quali mesi centrali estivi. In entrambi i grafici risulta evidente la differenza tra i mesi invernali caratterizzati da una scarsità di vegetazione sulle pareti (Figura 1), giornate brevi e bassa intensità di irraggiamento, ed i mesi estivi caratterizzati dalla massima presenza della vegetazione, giornate più lunghe e forte intensità luminosa. Tale differenza risulta più marcata in Figura 6 dove viene considerato principalmente il processo fotosintetico. In Figura 6 risulta anche più evidente la diminuzione di CO₂ tra gennaio ed agosto, già evidenziata nella Figura 3.

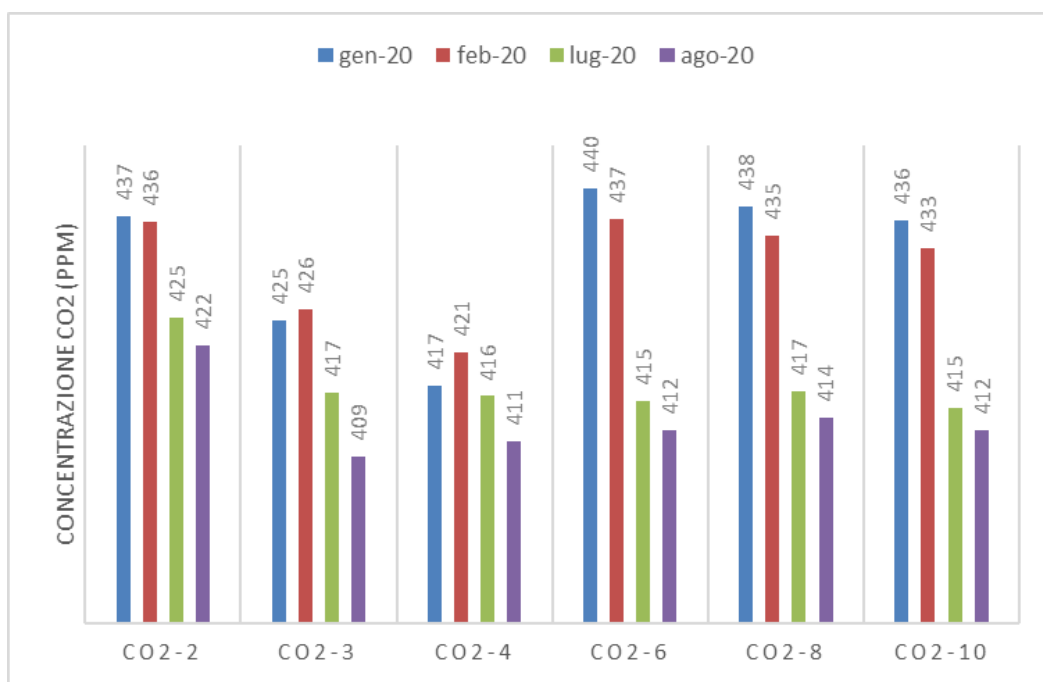


Figura 5. Valori medi mensili della concentrazione di CO₂ in inverno e in estate calcolati per l'intera giornata (24h)

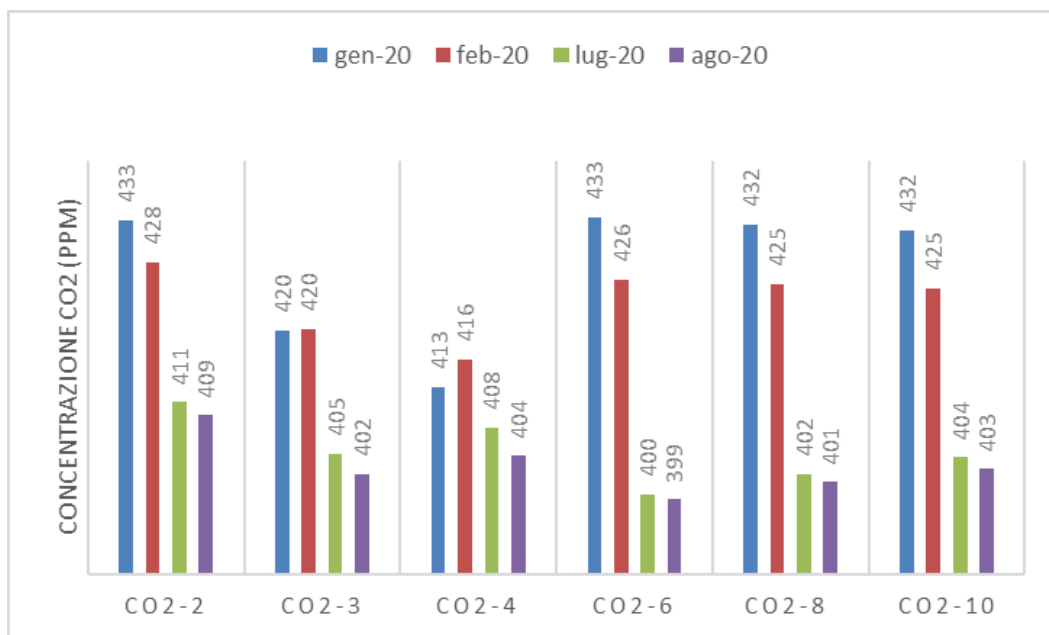


Figura 6. Valori medi mensili della concentrazione di CO₂ in inverno e in estate calcolati tra le 8:00 e le 20:00 di ogni giorno

I valori di [CO₂] misurati all'interno delle stanze adiacenti alla parete verde, rispettivamente nei punti di misura CO2-3 per la stanza al 1° piano e CO2-4 per la stanza al 2° piano, sono più bassi in inverno e più simili in estate rispetto ai valori esterni, questo è attribuibile alle finestre lasciate aperte durante il periodo estivo. Da considerare, inoltre, che gli ambienti interni non sono stati abitati durante il 2020 pertanto all'interno non c'è stato il contributo della respirazione umana all'aumento della [CO₂].

2.1.2 Andamento medio settimanale della concentrazione di CO₂ di notte e di giorno nelle settimane dal 10 al 16 di ciascun mese

In questo paragrafo è riportato l'andamento medio settimanale della concentrazione di CO₂ nella settimana dal 10 al 16 di ciascun mese separando i valori registrati durante le ore notturne da quelli registrati durante le ore diurne, discriminandole in base al calendario solare. In questo modo è stato possibile verificare come la parete verde influenzi i livelli di CO₂ di notte, quando le emissioni di CO₂ delle piante sono massime, e di giorno, quando la quota di anidride carbonica emessa viene compensata dalla fotosintesi, permettendo la riduzione della concentrazione di CO₂.

Di seguito vengono riportati, sia per le ore di notte che di giorno, i grafici dei sensori posti al primo piano della parete esposta a Sud-Est (Figura 7 e Figura 8) e di quella esposta a Sud-Ovest (Figura 9 e Figura 10), che ospitano entrambe la specie caducifoglie *Partenoscissus quinquefolia*.

Parete Sud-Est

A livello della parete Sud-Est, durante le ore notturne, si osservano alti livelli di CO₂ all'interno dell'intercapedine che superano il controllo CO2-10 (Figura 7). Tra le possibili spiegazioni si evidenzia che la CO₂ è il gas più pesante che compone l'aria e quindi tende ad accumularsi nei piani più bassi, inoltre la coltre vegetale potrebbe schermare l'intercapedine dall'effetto del vento che altrimenti renderebbe più omogenei i livelli di anidride carbonica (§2.1.4).

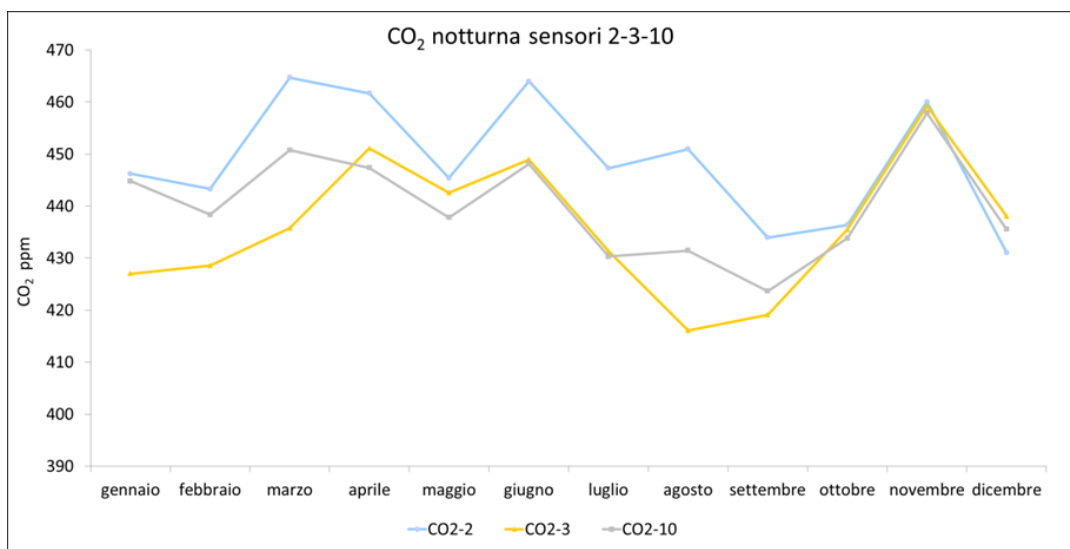


Figura 7. Andamento medio settimanale dei valori di CO₂ registrati nelle ore notturne. Punti di misura collocati al primo piano, parete Sud-Est: CO2-2 nell'intercapedine, CO2-3 nella stanza e CO2-10 sulla parete Nord non vegetata (controllo)

I valori di CO₂ registrati nelle ore diurne (Figura 8) mostrano l'effetto della vegetazione, con valori sempre inferiori rispetto a quelli registrati di notte. Le piante, grazie alla fotosintesi e all'aumento delle ore di luce, già a partire da febbraio iniziano ad influire sulla progressiva riduzione della CO₂ fino ad arrivare a toccare i valori più bassi in luglio e agosto durante la stagione estiva, momento in cui la parete con *Partenocissus* (specie caducifolia) ha la copertura vegetale maggiore confermando la relazione tra flussi di anidride carbonica e la

superficie della massa vegetale [5]. Le differenze di concentrazione rilevate tra l'intercapedine e la parete controllo priva di vegetazione (CO2-10) dovranno essere approfondite.

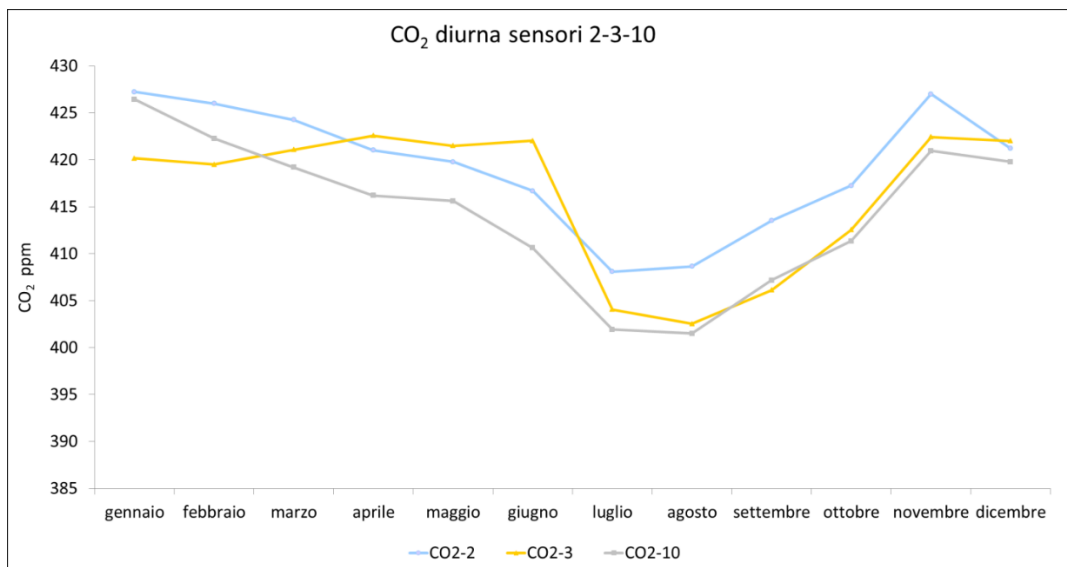


Figura 8. Andamento medio settimanale dei valori di CO₂ registrati nelle ore diurne. Punti di misura collocati al primo piano, parete Sud-Est: CO2-2 nell'intercapedine, CO2-3 nella stanza e CO2-10 sulla parete Nord non vegetata (controllo)

Parete Sud-Ovest

Il sensore nell'intercapedine al primo piano della parete Sud-Ovest ha rilevato concentrazioni sempre maggiori rispetto a quelle rilevate dal sensore controllo fino al mese di ottobre in cui i valori tornano a coincidere (Figura 9).

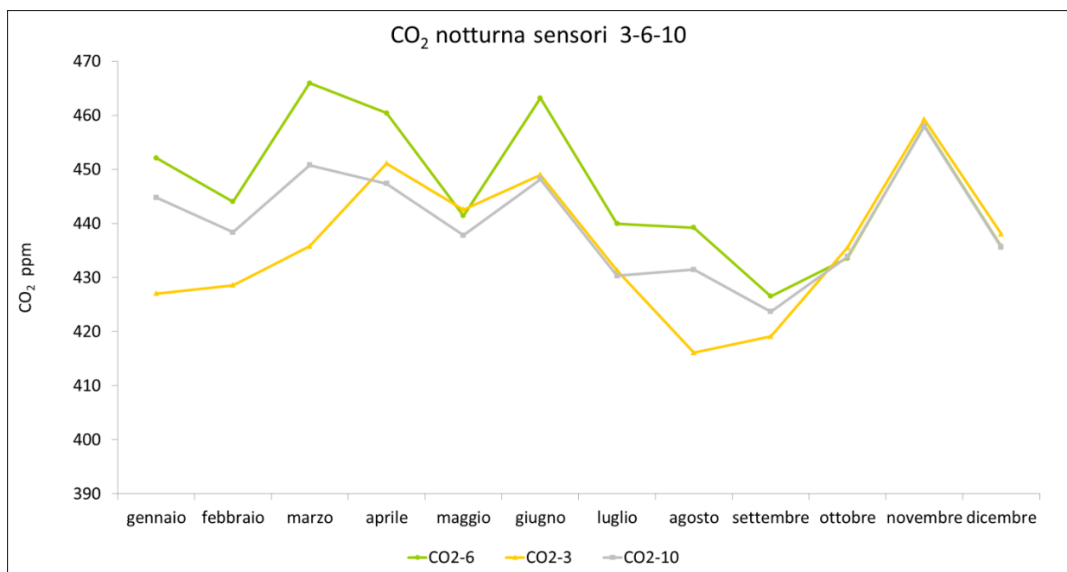


Figura 9. Andamento medio settimanale dei valori di CO₂ registrati nelle ore notturne. Punti di misura collocati al primo piano, parete Sud-Ovest: CO2-6 nell'intercapedine, CO2-3 nella stanza e CO2-10 sulla parete Nord non vegetata (controllo)

Nelle ore di luce, Figura 10, l'andamento della concentrazione di CO₂ tra l'intercapedine e il controllo è simile. I valori di CO₂ si riducono nel periodo estivo come evidenziato anche nella parete Sud-Est e in particolare in quei mesi nell'intercapedine risulta più bassa.

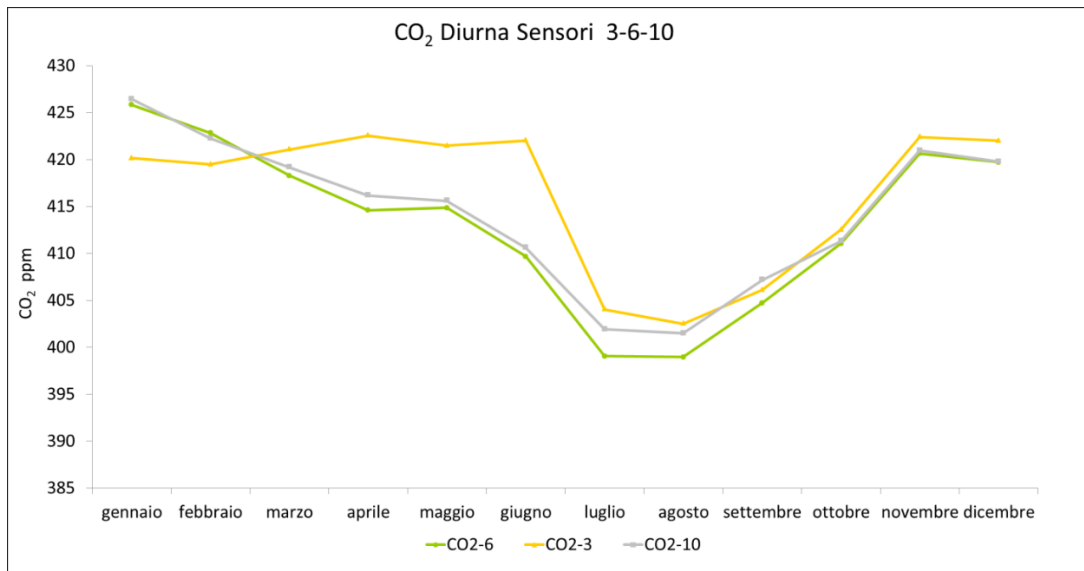


Figura 10. Andamento medio settimanale dei valori di CO₂ registrati nelle ore diurne. Punti di misura collocati al primo piano, parete Sud-Ovest: CO2-6 nell'intercapedine, CO2-3 nella stanza e CO2-10 sulla parete Nord non vegetata (controllo)

2.1.3 Andamento della concentrazione di CO₂ per ciascuna ora del giorno nelle settimane dal 10 al 16

Al fine di studiare l'andamento della concentrazione di CO₂ nel corso delle 24h, sono state prese in considerazione le medie a parità di ora rilevate nelle settimane dal 10 al 16 di ciascun mese. In Figura 11 vengono riportate, per i mesi più significativi, le medie a parità di ora della concentrazione di CO₂ rilevate dai sensori posti nell'intercapedine a Sud-Est e Sud-Ovest del primo e del secondo piano e dal controllo.

In generale, nel periodo in cui le piante si trovano in uno stato di riposo vegetativo (febbraio) non si osservano differenze significative nella concentrazione di CO₂ tra il controllo e gli altri sensori esterni durante le 24h; in concomitanza al risveglio vegetativo (marzo) la concentrazione misurata dal sensore controllo nelle ore notturne si mantiene più bassa rispetto a quella misurata nelle intercapedine delle pareti verdi; nei mesi di luglio e agosto queste differenze sono evidenti anche nelle ore diurne.

In particolare a febbraio l'escursione notte/giorno dell'anidride carbonica è di circa 20-40 ppm, la concentrazione di CO₂ di notte mostra un andamento irregolare con valori che oscillano tra i 440 ed i 460 ppm, alle 11:00 è pari a 420 ppm e rimane più o meno costante fino alle 18:00 quando ricomincia a salire.

A marzo l'escursione notte/giorno dell'anidride carbonica è di circa 50-60 ppm, la concentrazione di CO₂ di notte raggiunge 470 ppm poi inizia a diminuire raggiungendo alle 10:00 valori intorno ai 410-420 ppm che rimangono più o meno costanti fino alle 18:00 quando ricomincia a salire.

Ad aprile l'andamento è simile a quello di marzo ma aumentano le ore in cui la concentrazione della CO₂ rimane a valori più bassi (dalle 8:00 alle 19:00).

I mesi estivi, luglio ed agosto, presentano tra di loro andamenti simili, l'escursione notte/giorno dell'anidride carbonica è di circa 50-60 ppm, la concentrazione minima di CO₂ è circa 390-400 ppm nelle ore diurne. Alle 07:00

la concentrazione è 410-415 ppm, circa 40 ppm più bassa rispetto ai valori misurati di notte, e subisce un'ulteriore riduzione, particolarmente evidente nei sensori CO2-6 e CO2-8 della parete di Ovest, nelle ore pomeridiane. La concentrazione inizia ad aumentare alle 22:00 in luglio e alle 21:00 in agosto. Ad ottobre la situazione torna più simile a quella di febbraio con un'escursione notte/giorno dell'anidride carbonica di circa 35 ppm e con valori di notte intorno ai 440 ppm. Come evidenziato in precedenza il valore della CO₂ misurato dal sensore CO2-6 di Sud-Est è sempre più elevato in tutti i mesi.

In Figura 12, per rendere ancora più 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 l'energia solare effettivamente disponibile per la fotosintesi. Confrontando gli andamenti di un mese invernale e di uno 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. La figura mostra anche l'andamento speculare della PAR tra la parete Sud-Est, con il picco della PAR al mattino, e la parete Sud-Ovest con il picco della PAR nel pomeriggio.

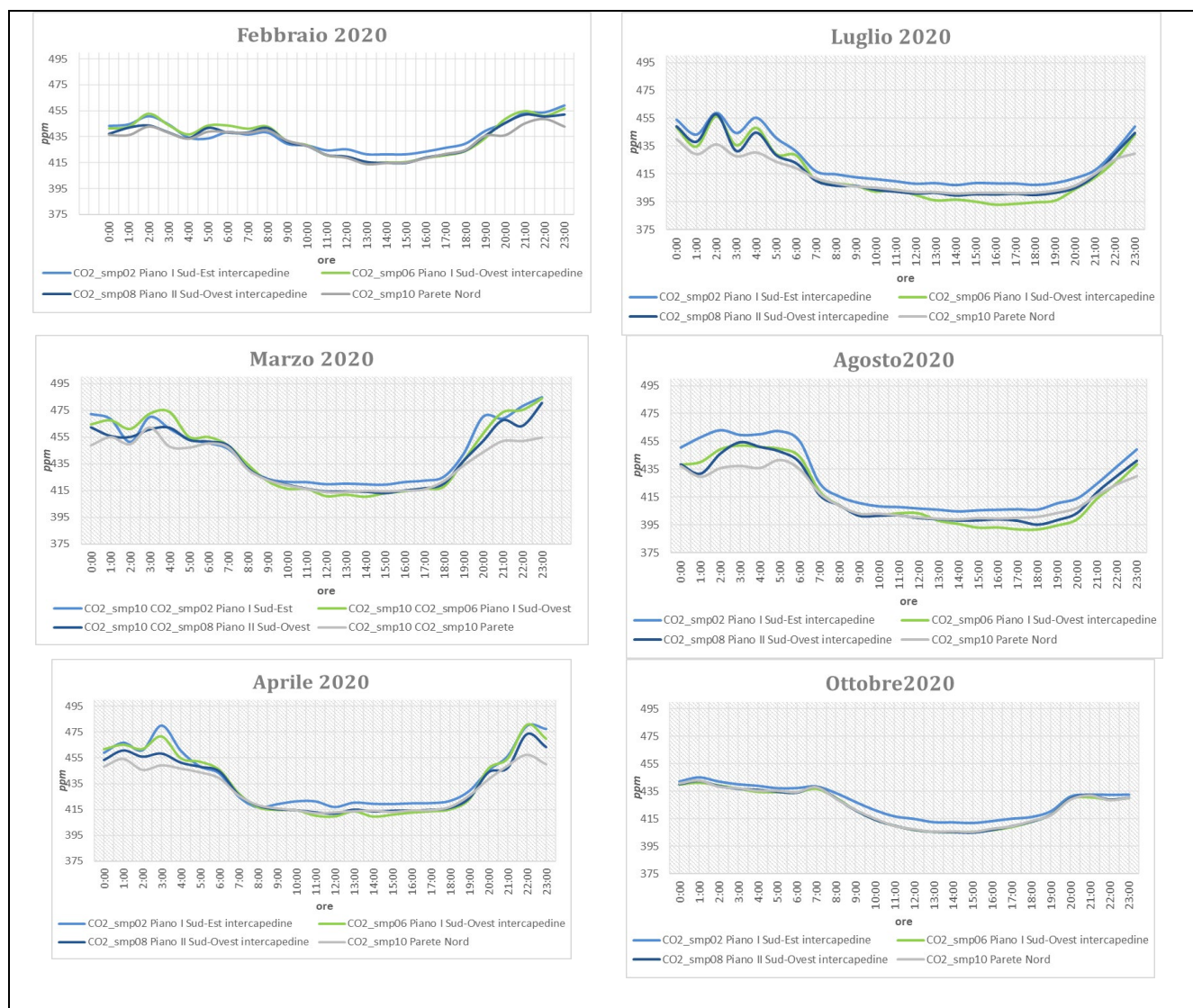


Figura 11. Medie a parità di ora della concentrazione di CO₂ monitorate durante la settimana dal 10 al 16 di ciascun mese

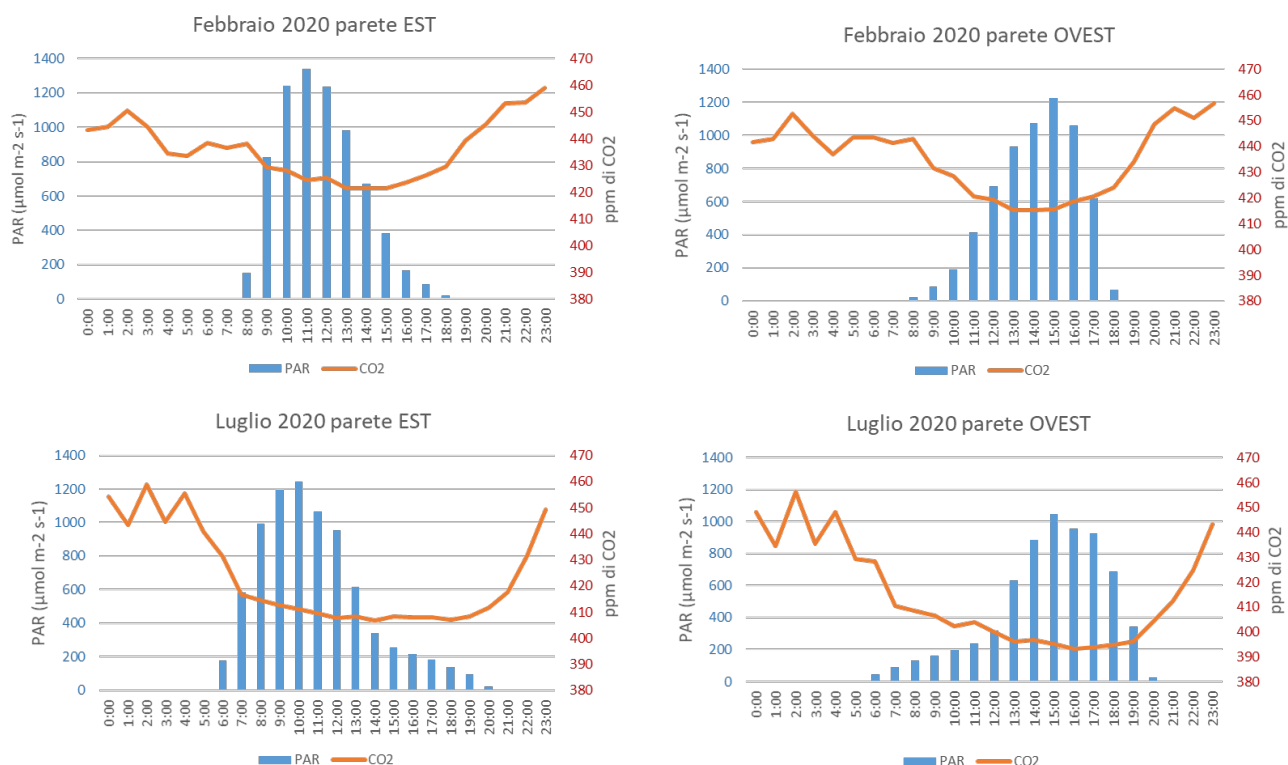


Figura 12. Andamento durante le 24h della concentrazione di CO₂ e PAR

Per evidenziare eventuali differenze nell'andamento della CO₂ tra pareti con differenti specie vegetali, in Figura 13, si riportano gli andamenti delle medie a parità di ora delle concentrazioni di CO₂ registrati dai sensori posizionati nell'intercapedine della parete Sud-Ovest al primo piano (CO2-6) schermata dalla caducifoglia *Partenocissus quinquefolia* L e al secondo piano (CO2-8) dalla sempreverde *Hedera helix*. L'analisi mostra valori delle medie simili indipendentemente dal periodo e dall'ora del giorno ad esclusione della fascia oraria tra le 15:00 e le 18:00 nei mesi di luglio ed agosto in cui si evidenziano differenze di circa 7 ppm tra l'intercapedine in cui è presente la specie *P. quinquefolia* (~392 ppm) e quella in cui è presente la specie *H. helix* (~399 ppm).

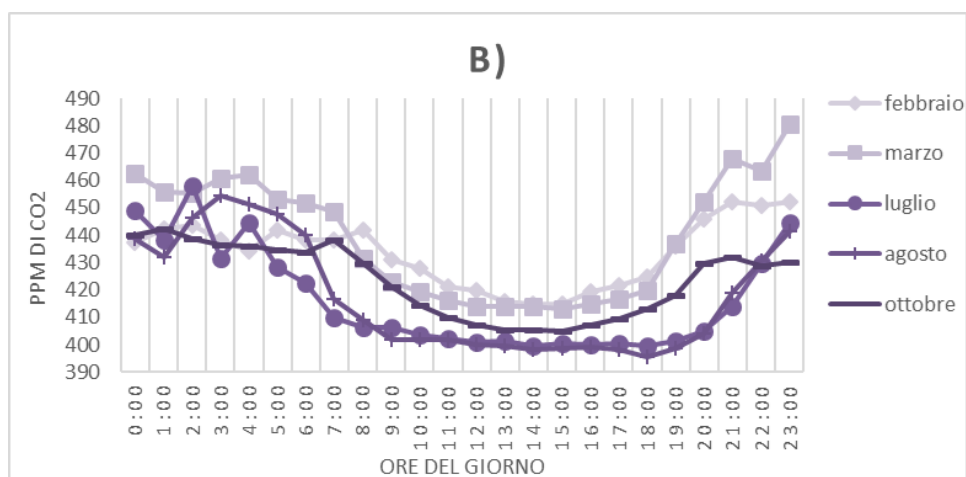


Figura 13. Andamento delle concentrazioni di CO₂ monitorate dai sensori (a) CO2-6 e (b) CO2-8 posizionati nelle intercapedini schermate rispettivamente da *Partenocissus quinquefolia* e da *Hedera helix*

2.1.4 Analisi dei dati meteorologici che possono avere effetto sulla concentrazione della CO₂

L'obiettivo è fissare l'istantanea di un determinato giorno delle due stagioni (invernale ed estiva) analizzando i parametri meteorologici del sito che possono avere effetto sulla concentrazione della CO₂. In Tabella 3 si riportano gli orari per Roma di alba e tramonto relativi al giorno 10 dei mesi considerati.

Tabella 3. Orari di alba e tramonto a Roma relativi al giorno 10 del mese

Data	Alba	Tramonto	Durata del giorno
10/01/2020	7:36	16:53	9h 17m S
10/02/2020	7:13	17:31	10h 18m S
10/07/2020	5:40	20:45	15h 05m L
10/08/2020	6:09	20:17	14h 08m L

La Figura 14 fornisce una panoramica delle condizioni climatiche del sito sperimentale negli stessi giorni, misurate dai sensori posti sul tetto dell'edificio.

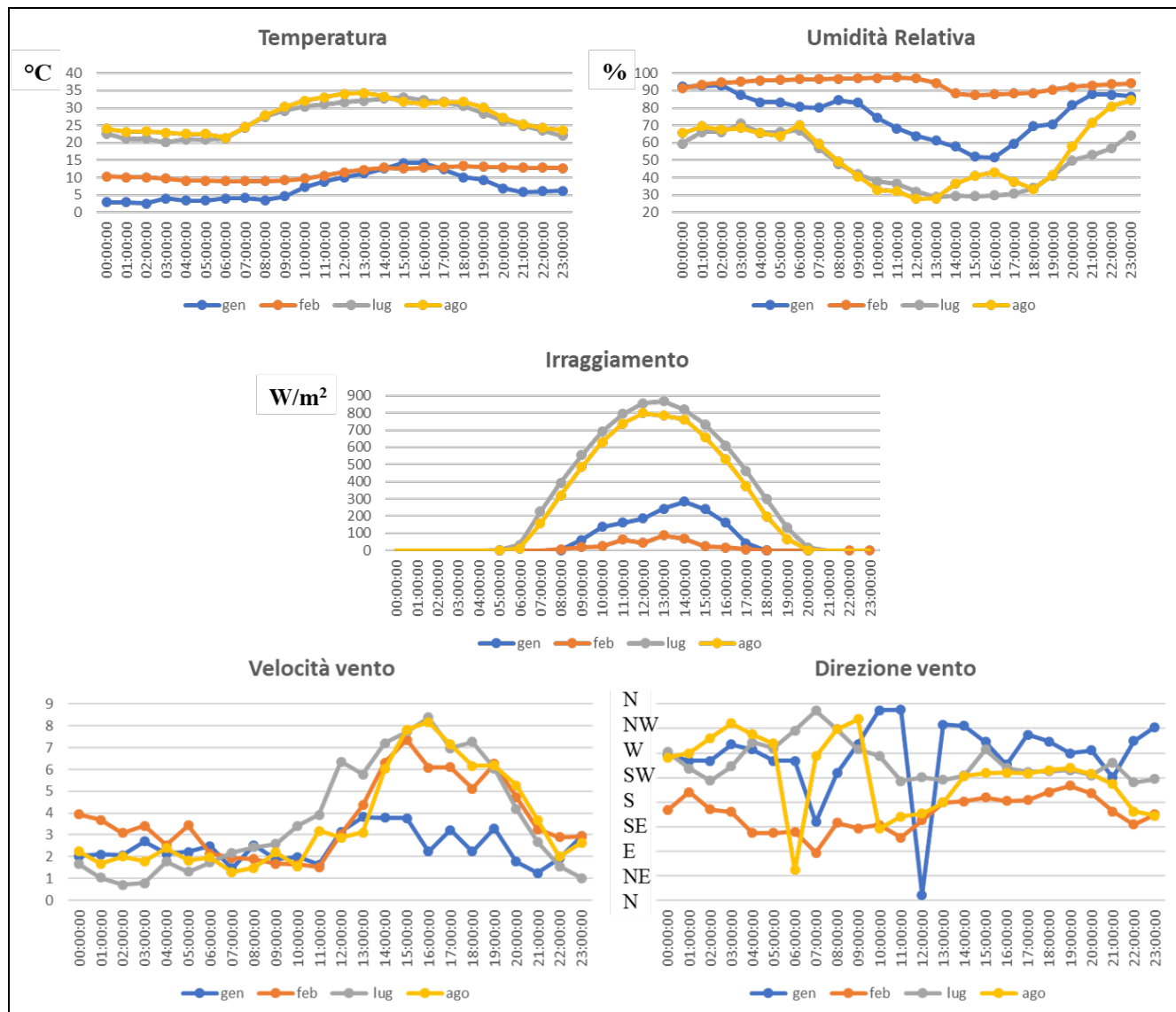


Figura 14. Parametri ambientali del giorno 10 di gennaio, febbraio, luglio e agosto misurati dai sensori posizionati sul tetto dell'edificio

Osservando i grafici di Figura 14 si notano delle condizioni meteorologiche tipiche delle due diverse stagioni per quanto riguarda la temperatura e l'irraggiamento. I valori di irraggiamento e umidità relativa di febbraio fanno pensare ad una giornata nuvolosa se non di pioggia. Il dato interessante è rappresentato dal grafico della velocità del vento. Indipendentemente dalla stagione il vento aumenta di intensità dopo le nove del mattino raggiungendo il suo massimo nel primo pomeriggio.

Osservando l'andamento di velocità e direzione del vento nell'intercapedine della parete Sud-Ovest e Sud-Est (Figura 15 e Figura 16), per quanto riguarda le curve relative alla velocità del vento, si nota lo stesso andamento riscontrato nel grafico di Figura 14, tuttavia i valori dell'intensità risultano essere nettamente più bassi all'interno dell'intercapedine in particolar modo per quanto riguarda l'intercapedine a Sud-Est. Per quanto riguarda la direzione, i dati mostrano notevoli differenze: nella parete Sud-Ovest il vento arriva dalla stessa direzione, sia in inverno che in estate, ipotizzando una buona aerazione all'interno dell'intercapedine; nella parete di Sud-Est il sensore al secondo piano misura una variazione della direzione anche molto repentina durante l'intera giornata sia in inverno che in estate mentre il sensore al primo piano rileva una direzione del vento costante da N-NW nei mesi di luglio e agosto. Questo andamento del vento potrebbe spiegare il valore della concentrazione di CO₂ sempre più alto nell'intercapedine a Sud-Est.

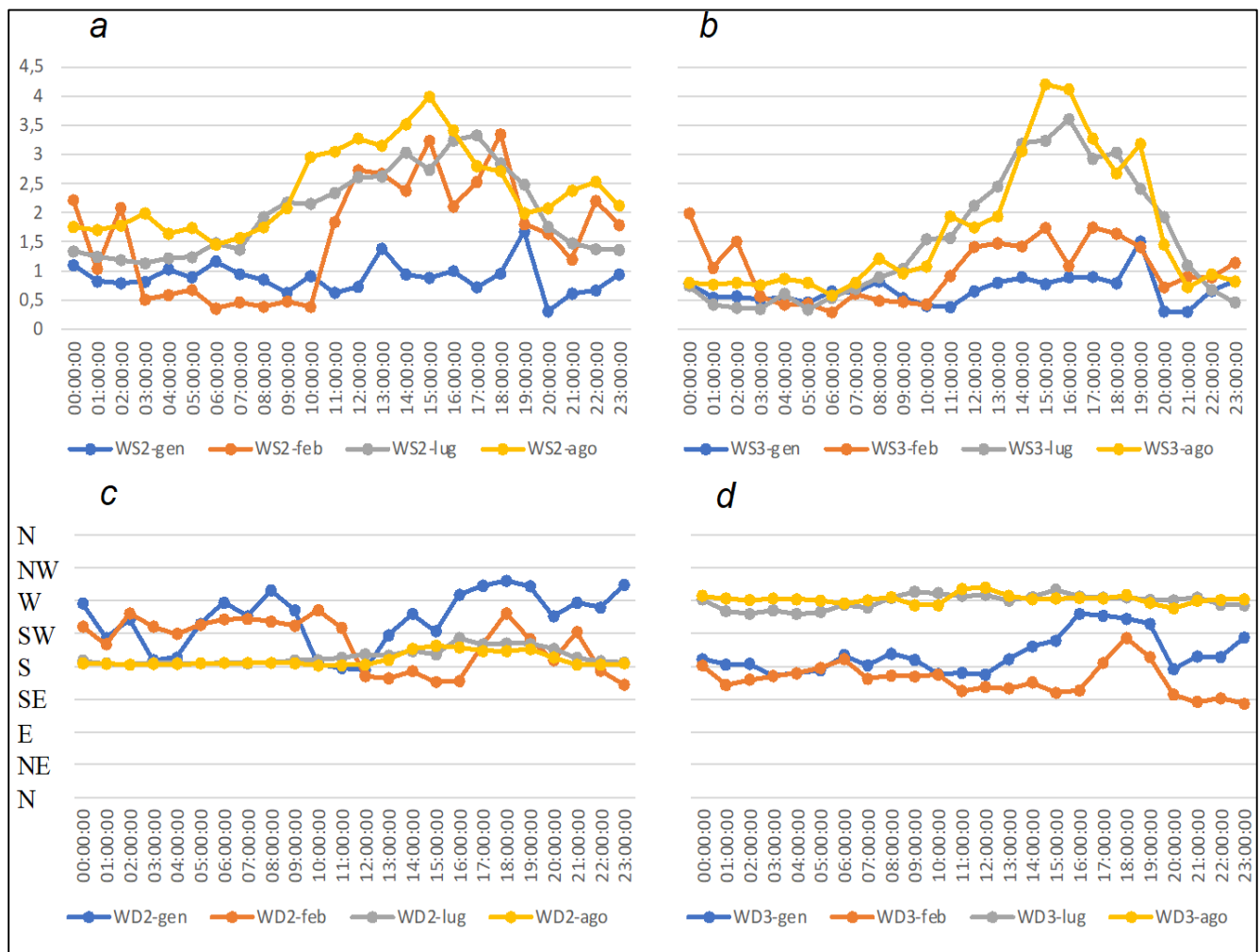


Figura 15. Andamento di velocità e direzione del vento nell'intercapedine della parete Sud-Ovest
Velocità vento: a) WS2 sensore 1° piano, b) WS3 sensore 2° piano
Direzione vento: c) WD2 sensore 1° piano, d) WD3 sensore 2° piano

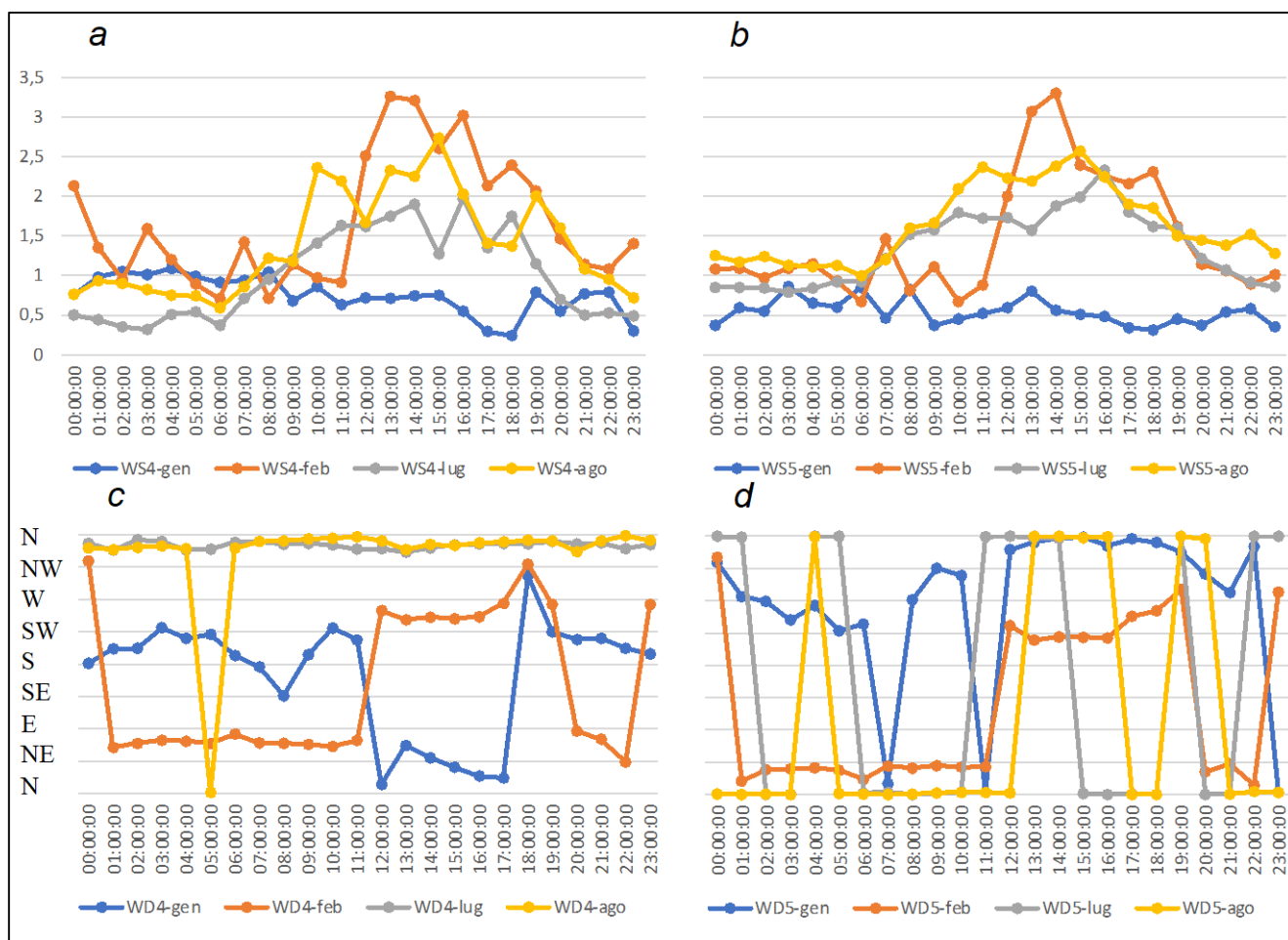


Figura 16. Andamento di velocità e direzione del vento nell'intercapedine della parete Sud-Est
Velocità vento: a) WS4 sensore 1° piano, b) WS5 sensore 2° piano
Direzione vento: c) WD4 sensore 1° piano, d) WD5 sensore 2° piano

Nei grafici di Figura 17 e Figura 18 vengono riportati i valori della concentrazione di CO₂ relativi al giorno 10 dei mesi di gennaio, febbraio, luglio e agosto.

Il 10 gennaio mostra un andamento più irregolare per tutta la giornata con un'alternanza di aumenti e diminuzioni della concentrazione di CO₂, monitorati da tutti i sensori. Il 10 febbraio la concentrazione di CO₂ aumenta in modo continuo fino all'incirca le 11:00 quindi diminuisce di circa 40 ppm e risale di circa 20 ppm intorno alle 21:00. Il 10 luglio e il 10 agosto presentano degli andamenti molto simili, mostrando una fase più articolata tra la mezzanotte e le sette del mattino. Il valore della CO₂ misurato dal sensore a Sud-Est è sempre più elevato.

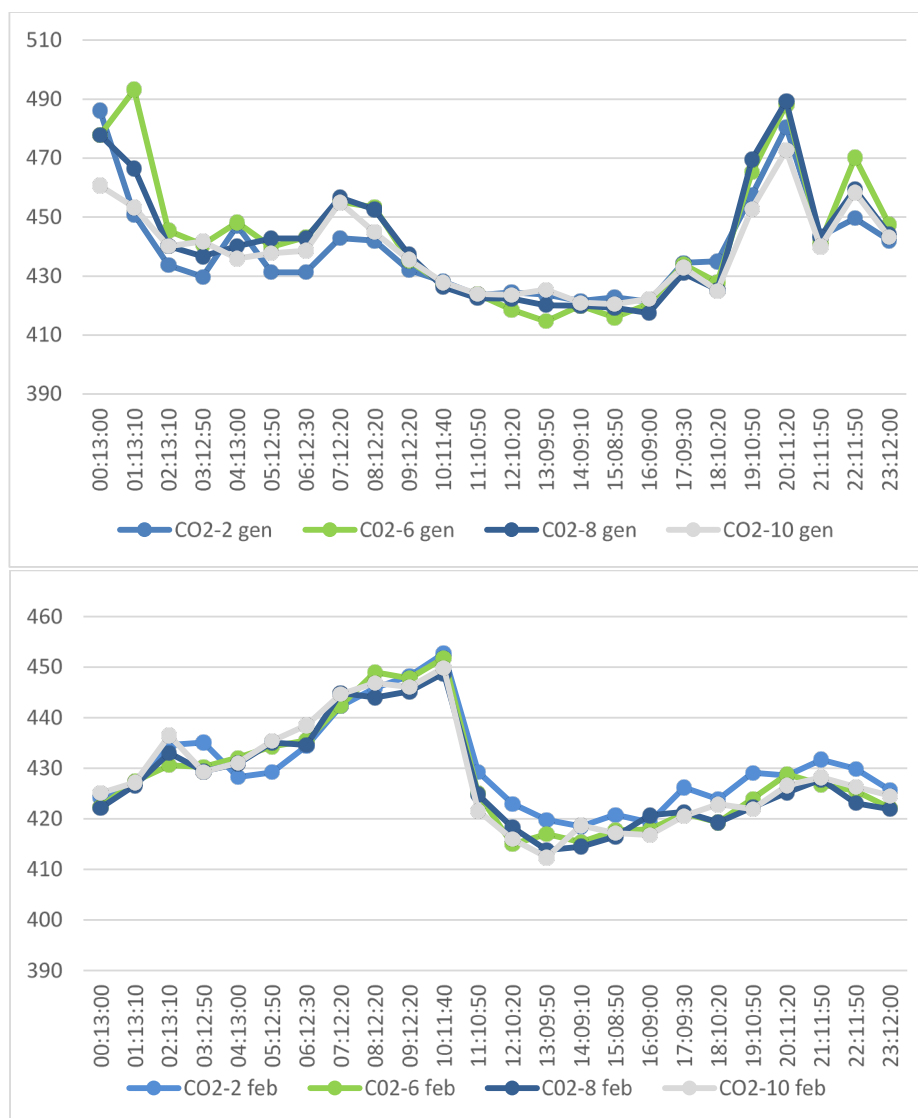


Figura 17. Valori della concentrazione di CO₂ nei giorni 10 di gennaio (in alto) e 10 di febbraio (in basso)

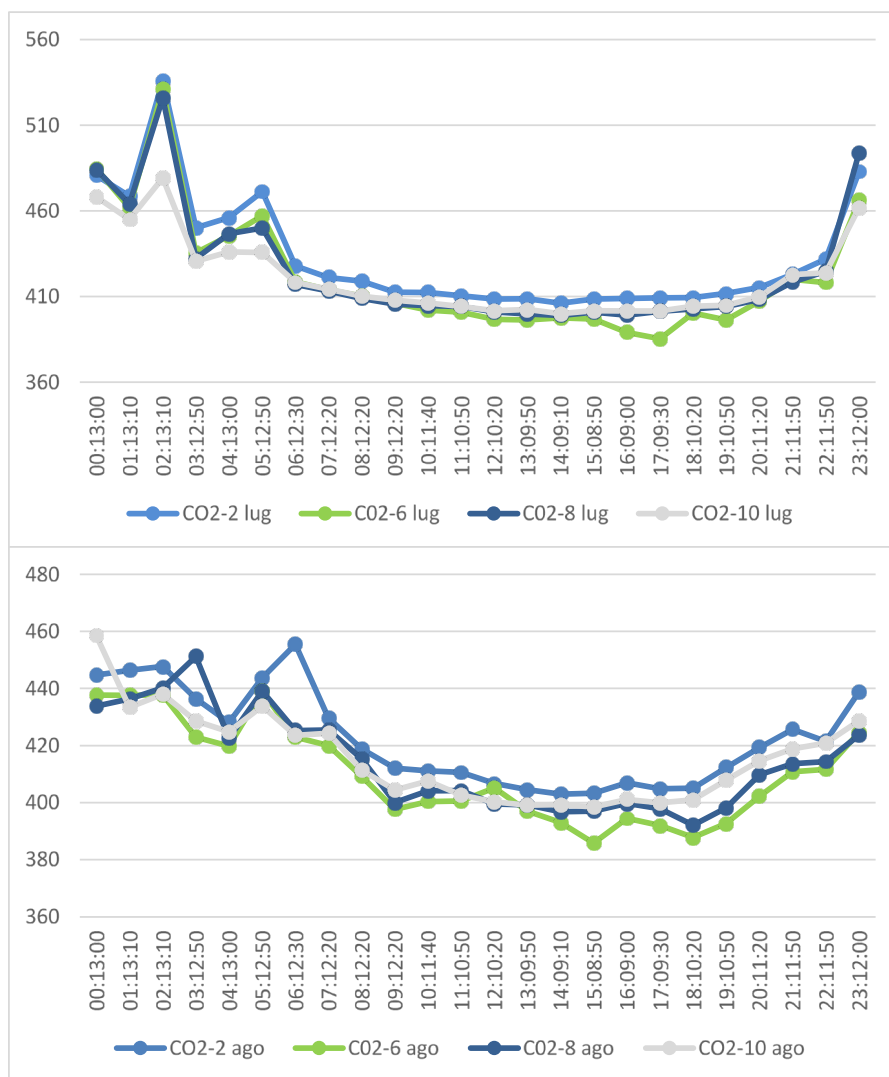


Figura 18. Valori della concentrazione di CO₂ nei giorni 10 di luglio (in alto) e 10 di agosto (in basso)

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.

Le pareti verdi hanno esercitato la funzione fisiologica di assimilazione diurna della CO₂ come ci aspettavamo, questo effetto sarebbe stato più evidente in un ambiente urbano. Nei mesi primaverili ed estivi l'aumento di CO₂ notturna era compensato da un forte riduzione diurna. Infatti, la capacità fotosintetica raggiunge il picco subito dopo il solstizio di estate e diminuisce con il variare del fotoperiodo. Infatti, da settembre si riduce l'assorbimento e l'organizzazione di CO₂ di giorno. Diminuendo le ore di luce diminuisce la capacità fotosintetica delle piante anche se permangono temperature ancora elevate e con le foglie sono ancora verdi [6] [7].

Tuttavia, il dato più interessante è l'accumulo di CO₂ nello spazio tra le pareti verdi e le mura perimetrali, maggiore nell'intercapedine a Sud-Est, dovuto con tutta probabilità all'azione del vento in particolare della direzione del vento. Questa è una ulteriore dimostrazione della complessità delle valutazioni necessarie al fine

di ottenere le migliori prestazioni possibili da una parete verde. Il monitoraggio della CO₂ per definire i benefici dovuti alle pareti verdi sul miglioramento della qualità dell'aria continuerà durante il corso del 2021.

2.2 Valutazione dell'efficacia dei sistemi verdi nel modificare la composizione dell'aria, con riferimento ai più comuni inquinanti atmosferici (COV) per il miglioramento della qualità dell'aria

2.2.1 Definizione dei Composti Organici Volatili (COV)

I composti organici volatili sono una classe che comprende composti chimici differenti, caratterizzati da una facile vaporizzazione a temperatura ambiente e in grado di reagire nella troposfera dando vita a composti inquinanti. Ne fanno parte gli idrocarburi alifatici (ad es. butano, n-esano) e aromatici (ad es. benzene, toluene), gli alogenoderivati (ad es. diclorometano), le aldeidi (ad es. formaldeide), i chetoni (ad es. acetone), gli alcoli (ad es. etanolo, butanolo), gli esteri (ad es. acetato di etile) e altri composti (ad es. acido acetico, acrilammide, nicotina, acetonnitrile).

A seconda delle diverse finalità delle normative attualmente vigenti, vengono fornite più definizioni.

L'art. 268 del D.Lgs. 152/06 definisce:

- composto organico: "qualsiasi composto contenente almeno l'elemento carbonio e uno o più degli elementi seguenti: idrogeno, alogeni, ossigeno, zolfo, fosforo, silicio o azoto, ad eccezione degli ossidi di carbonio e dei carbonati e bicarbonati inorganici";
- composto organico volatile (COV): "qualsiasi composto organico che abbia a 293,15 K (20 °C) una pressione di vapore di 0,01 kPa o superiore, oppure che abbia una volatilità corrispondente in condizioni particolari di uso".

La direttiva europea 2004/42 definisce invece un VOC:

- come "qualsiasi composto organico avente un punto di ebollizione iniziale pari o inferiore a 250 °C, misurato ad una pressione standard di 101,3 kPa".

L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha individuato quattro classi:

- composti organici molto volatili (VVOC) che hanno un punto di ebollizione da < 0 a 50-100 °C;
- composti organici volatili (VOC) che hanno un punto di ebollizione da 50-100 a 240-260 °C;
- composti organici semivolatili (SVOC) che hanno un punto di ebollizione da 240-260 a 380-400 °C;
- composti organici associati a materiale particolato (POM) che hanno un punto di ebollizione superiore a 380 °C.

La direttiva europea n. 2284 del 2016 ha introdotto la definizione di "composti organici volatili non metanici" (COVNM):

- "tutti i composti organici, diversi dal metano, che possono produrre ossidanti fotochimici per reazione con gli ossidi di azoto in presenza di radiazioni solari".

2.2.2 Composti organici volatili (COV) e il gruppo del benzene e dei suoi derivati (BTEX)

Gli inquinanti atmosferici più pericolosi introdotti nell'atmosfera dalle attività antropiche o biogeniche includono il monossido di carbonio (CO), il piombo (Pb), il particolato (PM), l'anidride solforosa (SO₂), i precursori dell'ozono (O₃) che sono principalmente gli ossidi dell'azoto (NO_x) e i COV.

L'inquinamento ambientale generato dai COV costituisce un problema considerevole a livello mondiale in quanto determina cambiamenti negativamente impattanti sugli ecosistemi naturali, inclusa la perdita di biodiversità, ed è inoltre ritenuto essere all'origine di diverse malattie e disturbi fisiologici nell'uomo. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) stima annualmente che 4,2 milioni di morti possano essere attribuiti all'inquinamento dell'aria esterna. Le proprietà chimico-fisiche di questi composti e la loro persistenza media nell'atmosfera, che può variare da pochi minuti fino a diversi mesi, gli consentono di percorrere grandi distanze dalla fonte di emissione e di penetrare all'interno del corpo umano attraversando le membrane biologiche, principalmente per via aerea o attraverso la pelle, causando sintomi che possono portare a patologie come asma, dermatite atopica e problemi neurologici. Alcuni COV, come il benzene, l'1,3-butadiene e il cloruro di vinile sono classificati dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) nel Gruppo 1 come cancerogeni per l'uomo.

I COV includono un gruppo piuttosto numeroso di sostanze, tra cui idrocarburi aromatici, alifatici, aldeidi, chetoni, eteri, acidi e alcoli, con diversi gruppi funzionali (alogeni, ossigeno, zolfo, azoto o fosforo, esclusi gli ossidi di carbonio e i carbonati). Quelli più abbondanti nell'ambiente, soprattutto nelle aree industriali, sono sostanze aromatiche quali il benzene e alcuni dei suoi derivati organici, come il toluene, l'etilbenzene e lo xilene (o-, m- e p-), che vengono complessivamente denominati come gruppo BTEX. In aggiunta alle zone industriali, elevati livelli di BTEX sono rilevati anche nelle aree urbane, in particolare nelle grandi città, dovuto soprattutto ai problemi di traffico veicolare, dove costituiscono oltre il 60% di tutti i COV presenti. Per queste ragioni tale gruppo di sostanze viene utilizzato come riferimento per valutare i livelli ambientali e l'esposizione ai COV [8]. In genere, i BTEX sono molto utilizzati nell'industria come additivi e precursori di altre sostanze: in particolare, il benzene è utilizzato nella fabbricazione di materiali sintetici e prodotti di consumo, tra cui plastica, nylon, insetticidi e vernici; il toluene è usato come solvente per vernici, rivestimenti, gomme, oli e resine; l'etilbenzene può essere trovato in vernici, plastica e pesticidi, ed è anche usato come additivo per carburante per aviazione; gli xileni sono usati come solventi nell'industria della stampa, della gomma e del cuoio. Inoltre, i BTEX si trovano in forma naturale nel petrolio greggio, nel diesel e nella benzina e vengono rilasciati nell'ambiente durante il processo di combustione. I BTEX possono coesistere a formare diversi tipi di miscela che, per le loro proprietà chimico-fisiche che gli conferiscono anche una grande capacità di dispersione, una volta rilasciati nell'ambiente possono trovarsi in qualsiasi tipo di ecosistema. Non meno significativo, l'esposizione ai COV si verifica anche a seguito dell'utilizzo di diversi prodotti per la casa, come disinfettanti, aerosol, vernici, inchiostri di stampa, fumo di sigaretta. Diverse pubblicazioni riportano elevate concentrazioni di COV negli spazi chiusi (*indoor*); tuttavia, il divieto di fumare ed altre misure generali di sicurezza hanno dimostrato che la maggior parte dell'esposizione ai COV è dovuta agli inquinanti esterni, soprattutto alle latitudini temperate e calde dove porte e finestre vengono aperte più frequentemente per consentire i ricambi d'aria [9].

Per diversi composti inquinanti, sono state stabilite delle concentrazioni di riferimento, per cui valori superiori possono determinare effetti critici nell'uomo. Per il benzene si ritiene che la massima esposizione per un individuo nell'aria ambientale sia 0.03 mg/m^3 , stabilita sulla base degli effetti ematologici del benzene nell'uomo. Per il toluene è circa 5.0 mg/m^3 sulla base degli effetti neurologici nell'uomo e dell'aumento delle dimensioni del fegato; per l'etilbenzene è 1.0 mg/m^3 sulla base degli effetti sul sistema respiratorio, l'epatotossicità e la nefrotossicità; infine, per il gruppo degli xileni la massima concentrazione è di 0.1 mg/m^3 sulla base degli effetti sui sistemi respiratorio e neurologico e per il pericolo di un basso peso alla nascita. Questi effetti non rientrano tra quelli cancerogeni [10].

Nella Tabella 4 sono riportati alcuni valori di esposizione ambientale di popolazioni che vivono in aree prossime alle fonti di BTEX (come in zone industriali) in diversi paesi caso studio, ma anche in zone urbane e non urbane del nostro paese, come riportati in alcuni lavori. In diversi casi le concentrazioni risultano inferiori rispetto ai

valori di riferimento sopramenzionati; tuttavia, molti valori riportati per il benzene - composto cancerogeno – sono vicini o al di sopra del cosiddetto valore di rischio per unità di inalazione (*Inhalation Unit Risk*, IUR) che nell'aria è pari ad $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, portando pertanto ad un aumento del rischio di cancro per individuo. Dai valori riportati nella Tabella 4 si evince che in alcuni casi la concentrazione di tali elementi in ambiente interno supera i limiti consentiti [11]. La norma europea EN14662:2015 specifica un metodo di misurazione semi-continuo per la determinazione della concentrazione del benzene presente in aria ambiente basato su campionamento automatico e analisi mediante gascromatografia (<https://www.pollution.it/it/soluzioni/btex-aria-ambiente/>).

Tabella 4. Concentrazioni dei BTEX riportate in differenti studi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Benzene	Toluene	EtilBenzene	Xileni	Paese	Tipo di misura	Referenza bibliografica
1,21*	14,33	2,55	2,16 (o-xil) 5,97 (m-xil)	Popolazione USA	Esposizione dell'individuo	[12]
0,63	1,09	0,32	0,26 (o-xil)	Canada	Ambiente esterno	[13]
2,15*	6,83	1,28	1,46 (o-xil) 3,56 (m-xil)	Popolazione USA	Ambiente esterno	[14]
1,5-6,95*	7,17-26,9	0,59-2,06	0,94-4,16 (o-xil) 3,07-13,3 (m-xil)	Revisione di studi condotti su scala globale	Ambiente esterno	[9]
15,07*	139,35	24,68	13,39 (o-xil) 27,88 (m-xil)	Area industriale nei pressi di Hong Kong	Ambiente esterno	[8]
5,9*	37,9	5	5,9 (o-xil) 14,9 (m-xil)	Città del Messico	Ambiente esterno	[15]
1-2	6-17	1-2	1-9 (o-xil) 4-8 (m-xil)	Analisi in tre scuole di Roma	Ambiente interno	[11]
1-2	6-9	1-2	1-3 (o-xil) 4-8 (m-xil)	Analisi in tre scuole di Roma	Ambiente esterno	
1-3	6-11	1-3	1-3 (o-xil) 4-13 (m-xil)	Analisi in quattro abitazioni di Roma	Ambiente interno	
1-2,5	3-11	1-2	1-3 (o-xil) 3,5-10 (m-xil)	Analisi in quattro abitazioni di Roma	Ambiente esterno	
0,4-0,7 1,9 0,5 0,7 1 0,4	0,25 0,5 0,4 0,6 0,5 0,45	1,4 4,7 1,9 3,6 3,6 1,5	0,9 (omp-xil) 1,8 (omp-xil) 1,1 (omp-xil) 2,9 (omp-xil) 2,6 (omp-xil) 1 (omp-xil)	Legnago San Bonifacio Cason Corso Milano Bgo Milano Bgo Milano Fiale	Ambiente esterno (diverse postazioni in provincia di Verona)	[16]

(*) Valore che fa riferimento all'aumento del rischio di leucemia

2.2.3 Attività di monitoraggio dei BTEX presenti nell'aria

Quello dei BTEX è il gruppo di COV che è stato preso in esame in questa la sperimentazione RdS. I primi campionamenti per la messa a punto del sistema sono stati effettuati durante giornate con temperatura mite, rappresentando questa una condizione ottimale per il processo analitico. Infatti, il parametro temperatura, incidendo sulla volatilità e l'adsorbimento delle sostanze, deve essere tenuto in forte considerazione al fine di consentire una riproducibilità dei campionamenti e di conseguenza dei dati.

Le analisi quantitative sui campioni vengono condotte per desorbimento termico, avvalendosi della collaborazione con l'Istituto Clinico Scientifico (ICS) Maugeri, laboratorio analitico con il quale è stato stipulato un contratto di servizio per le analisi dei campioni, peraltro responsabile del brevetto del sistema Radiello®.

Per la sperimentazione e il campionamento dei BTEX è stato utilizzato il seguente materiale consumabile Radiello®, fornitaci dalla ditta AMS ANALITICA:

- Piastra di supporto cartuccia. Conf. 20 pezzi. Con Clip e tasca adesiva per inserimento etichetta (Cod. FSM/121)
- Corpo diffusivo giallo, Radiello. PL 20 (Cod. FSM/1202)
- Cartucce Radiello carbone per desorbimento termico (FSM/145)
- BOX Protezione da intemperie, Radiello. PK 10 contiene fino a 4 Radiello (FSM/196).

La durata dei campionamenti è di una settimana. I primi campionamenti per la messa a punto del sistema sono stati effettuati presso il CR ENEA Casaccia e sull'edificio prototipo, precisamente sulla parete vegetata (K109B), sulla parete priva di vegetazione (K110B) e in una localizzazione nella stessa area dove ci si attendeva la massima esposizione ai BTEX, precisamente lungo la via Anguillarese (K111B) dove il traffico automobilistico è continuo anche se non intenso. Quest'ultima localizzazione è servita come riferimento del livello massimo di COV nell'area del CR Casaccia. I risultati di questi primi campionamenti sono riportati in Tabella 5.

Tabella 5. Risultati analisi BTEX

Codice campione	Localizzazione del campione	benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	toluene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	etilbenzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	mp-xilene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	o-xilene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
K109B	2° piano della parete verde Sud-Ovest tra le foglie	0,85	0,55	0,12	0,27	0,12
K110B	2° piano della parete nuda a Sud (posizione equivalente al sensore CO2-9)	0,92	0,61	0,16	0,31	0,12
K111B	campione controllo negativo in via Anguillare all'entrata Capanna	1,2	0,89	0,2	0,5	0,21

Questi primi risultati, molto incoraggianti, rinforzano l'ipotesi di un effetto benefico della vegetazione nel diminuire la concentrazione di queste sostanze inquinanti nell'aria circostante. Come atteso, inoltre, a livello della strada in presenza di traffico, seppur molto limitato, le concentrazioni risultano più elevate.

Ulteriori campionamenti, ancora in corso durante la primavera 2021, vengono effettuati a livello di altre pareti verdi e di pareti nude, sia in zone caratterizzate da un'aria più salubre localizzate in spazi aperti e lontani dal caos cittadino e da impianti industriali, che in aree urbane in cui si prevede una maggiore concentrazione dei composti ricercati. L'edificio prototipo ENEA rappresenta un caso di "background", trovandosi in un'area sufficientemente aperta e ventilata e non in diretta prossimità di sorgenti locali d'emissione. Un altro caso studio interessante è la parete vegetale presso il Liceo Scientifico Keplero a Roma (<https://www.facebook.com/Keplerogarden/?rf=494641874234943>) localizzato in città.

In seguito, in base alla vegetazione presente nelle pareti oggetto dell'analisi, verrà valutato il contributo delle specie vegetali presenti nelle diverse infrastrutture alla mitigazione di tali COV.

Ulteriori dettagli sulla pianificazione sperimentale e sulla tecnologia dei diffusori passivi selezionata per questa attività sono stati già riportati nel corrispondente Report RdS del 2019, riferito alla prima annualità di questa ricerca (LA2.1).

2.3 Studio di specie con elevate caratteristiche di mitigazione degli inquinanti atmosferici

Nella scelta delle specie vegetali per le infrastrutture verdi sugli edifici non vanno valutate soltanto le condizioni climatiche/microclimatiche del luogo di realizzazione della struttura al fine di consentire l'acclimatazione e la crescita delle specie vegetali, ma va effettuata una scelta considerando le multifunzionalità delle specie vegetali ed il servizio ecosistemico che si vuole privilegiare. I benefici della vegetazione infatti sono molteplici come evidenziato dalla letteratura scientifica del campo e riportato anche nei precedenti report RdS. Per le specie da inserire nelle infrastrutture verdi in aree urbane, come tetti e pareti, non si può prescindere dalla scelta di specie autoctone o naturalizzate tipiche del territorio, per preservare ed arricchire la biodiversità locale, né dall'evitare di introdurre specie aliene che possano competere negativamente con le specie locali anche per un successo duraturo della struttura verde. Uno studio preliminare del territorio è doveroso in modo che la vegetazione selezionata adatta alle infrastrutture verdi possa essere interconnessa con quella degli ambienti rurali periferici, consentendo così alle specie animali, soprattutto insetti e altri artropodi, di spostarsi arricchendo la biodiversità locale. Le piante inserite in queste infrastrutture urbane possono anche fornire come servizio ecosistemico un'attenuazione dell'inquinamento atmosferico, migliorando la qualità dell'aria; tuttavia le piante non sono tutte uguali e alcune funzionano meglio di altre per questo scopo.

Il focus di questo paragrafo è sulle specie vegetali in grado di migliorare la qualità dell'aria, pertanto verranno evidenziate le principali caratteristiche ecofisiologiche e morfologiche delle piante determinanti ai fini del sequestro di inquinanti in ambito urbano.

Le piante possono intercettare e catturare sia inquinanti gassosi sia i particolati [17]. I gas inquinanti tipo O_3 , NO_x , SO_2 , CO_2 e CO sono in grado di attraversare gli stomi, piccole strutture disposte per la maggior parte sulla pagina inferiore della foglia, eseguendo lo stesso percorso di diffusione della CO_2 . I due principali processi attraverso cui la pianta è in grado di sottrarre all'aria ambiente delle sostanze inquinanti di tipo gassoso in modo diretto sono l'assorbimento attraverso gli stomi e l'adsorbimento attraverso lo strato ceroso della cuticola e dell'epidermide [18]. Diversamente, in modo indiretto, la rimozione delle particelle dall'aria può avvenire per loro deposizione sulle foglie e sui rami delle piante [19]; queste particelle con le piogge possono essere trasferite sul suolo [20].

La capacità della vegetazione di ridurre i gas serra e altri inquinanti atmosferici come i particolati dipende dalla diversità di specie, età dell'ecosistema, densità delle piante e dal clima. La cattura degli inquinanti è quindi specie specifica. Le piante differiscono tra loro per dimensioni, geometria della chioma, tipologia e micromorfologia della foglia, rivestimenti cerosi, presenza di tricomi e distribuzione delle foglie [21] [22] [23]; ed infatti sulla base della struttura della foglia è possibile stimare il potenziale di assorbimento e cattura degli inquinanti [24].

Nella cattura degli inquinanti gassosi un ruolo fondamentale è svolto dalla morfologia, dalla densità degli stomi e dalla conduttanza stomatica, oltre che dallo spessore e dalla struttura della cuticola. Maggiore è la densità stomatica e lo spessore della cuticola maggiore sarà la capacità di assorbire gli inquinanti [25]. Invece, per l'assorbimento degli idrocarburi aromatici un ruolo fondamentale è svolto dagli strati cerosi dell'epicuticola fogliare. La cattura dei PM_{10} è influenzata dal livello di viscosità delle foglie: maggiore è la viscosità maggiore è la cattura dei particolati mentre la cattura di polveri più sottili come $PM_{2,5}$ e PM_1 è influenzata dalla rugosità e micro-rugosità della foglia. Altre strutture che influenzano la cattura dei particolati sono la presenza di peli fogliari e la loro densità.

In Figura 19 sono riportate delle immagini al microscopio elettronico a scansione di strutture fogliari importanti ai fini della purificazione dell'aria.

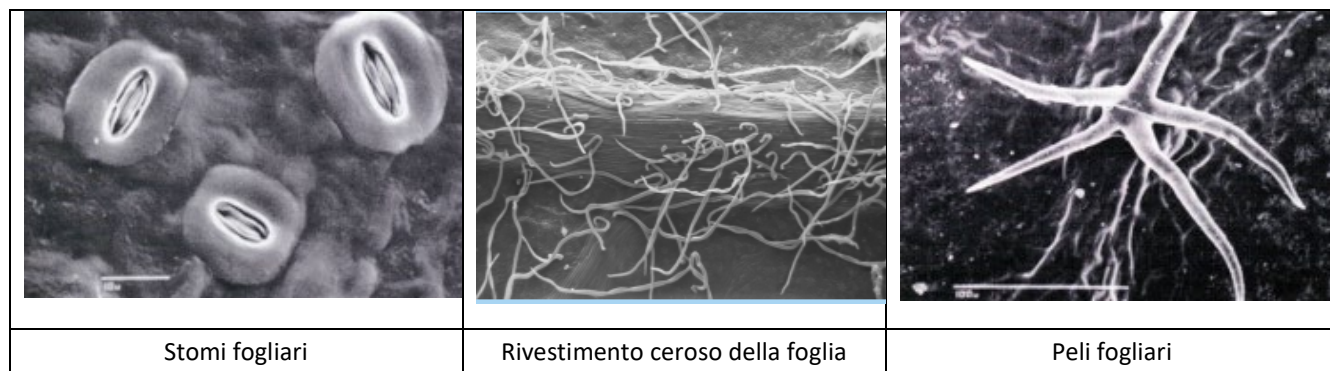


Figura 19. Immagini al microscopio elettronico a scansione (SEM) di alcune strutture fogliari adattate alla cattura di sostanze inquinanti. Fonte: Baraldi et al 2018 [25]

La maggior parte degli studi sulla mitigazione degli inquinanti atmosferici da parte della vegetazione sono state effettuati su piante arboree che sono presenti nei parchi e nelle alberature delle città, ma anche nei boschi. Nel 2018, Coldiretti ha redatto un elenco di 10 specie di alberi che presentano una buona capacità complessiva di mitigare l'inquinamento negli ambienti urbani ([www.coldiretti.it/ambiente-e-sviluppo-sostenibile/piante mangia smog](http://www.coldiretti.it/ambiente-e-sviluppo-sostenibile/piante-mangia-smog)). Si tratta di alberi di grandi dimensioni che possono raggiungere anche i 40 m di altezza come per esempio l'ontano nero. Tra questi alberi è anche presente il *Ginkgo biloba*, considerato un residuo fossile, risalendo le sue origini a 250 milioni di anni fa. Nella Tabella 6 si riportano le specie e le tonnellate di CO₂ che queste specie possono catturare in 20 anni.

Tabella 6. Elenco delle specie arboree che presentano un'alta capacità di assorbimento della CO₂ e ottime capacità di mitigazione complessiva (rielaborazione da fonti IBIMET CNR Bologna)

Specie botanica	Nome comune	CO ₂ catturata (tonnellate in 20 anni)	Capacità ant inquinanti gassosi	Capacità antipolvere	Capacità totale di mitigazione
<i>Acer platanoides</i>	Acero riccio	3,8	Alta	media	ottima
<i>Betula pendula</i>	Betulla verrucosa	3,1	alta	media	ottima
<i>Quercus cerris</i>	Cerro	3.1	alta	media	ottima
<i>Ginkgo Biloba</i>	Ginkgo	2,8	alta	alta	ottima
<i>Tilia Plathyphyllos</i>	Tiglio nostrano	2,8	alta	alta	ottima
<i>Celtis australis</i>	Bagolaro	2,8	alta	alta	ottima
<i>Tilia cordata</i>	Tiglio selvatico	2,8	alta	alta	ottima
<i>Ulmus minor</i>	Olmo comune	2,8	alta	media	ottima
<i>Fraxinus excelsior</i>	Frassino comune	2,8	alta	media	ottima
<i>Alnus glutinosa</i>	Ontano nero	2,6	alta	media	ottima

La deposizione e cattura dei particolati

Le piante si dividono in piante annuali, perenni, sempreverdi e caducifoglie. Tra le piante sempreverdi ci sono le conifere, come per esempio i pini, che rispetto alle caducifoglie presentano una maggiore efficienza nella cattura delle polveri in quanto hanno una maggiore superficie fogliare e maggiore complessità strutturale. Le piante sempreverdi inoltre, non perdendo le foglie, possono catturare particelle inquinanti anche in inverno quando l'inquinamento è maggiore, a differenza delle piante caducifoglie dove questa azione può essere svolta solo in minima parte dai rami e tronco. Nella scelta va anche considerato che alcune specie tollerano meno gli inquinanti ambientali in modo particolare quelli derivanti dal traffico per cui non sono adatte ad essere inserite nelle strade cittadine molto trafficate [26]. In generale la superficie e la struttura fogliare sono fondamentali per la cattura delle polveri. Gli alberi presentano grandi dimensioni ed estesa superficie fogliare per cui giocano un ruolo predominante nella cattura degli inquinanti, inoltre il deposito delle particelle inquinanti è favorito dai movimenti di aria tra il fogliame della chioma mentre gli arbusti per le loro dimensioni ridotte sono meno efficaci.

Piante rampicanti inserite nella parete verde dell'edificio ENEA

Recentemente è stato individuato come motivo di seria preoccupazione per le Amministrazioni Comunali l'effetto "street canyon", ossia l'accumulo di inquinanti atmosferici (gassosi e PM), dovuto alla scarsa ventilazione, causata dall'alta densità di alberi, con chioma estesa e frondosa, in strade strette e molto edificate. L'effetto "street canyon", in determinate tipologie di strade urbane incentiva l'interesse per implementare forme di vegetazione non arborea, come le infrastrutture verdi, che potrebbero essere poste a ridosso degli edifici alla distanza ottimale dalla strada, sorgente di emissione degli inquinanti.

Ciò malgrado ancora scarseggiano risultati di sperimentazioni che diano stime affidabili del ruolo di arbusti e di specie di piante rampicanti ed erbacee nella rimozione dei PM, inoltre pochi studi sono stati realizzati per individuare le piante, arbustive rampicanti ed erbacee più resistenti all'inquinamento urbano e per la standardizzazione di protocolli per il calcolo della concentrazione totale e delle dimensioni dei PM sequestrati. Inoltre, sono da identificare i principali inquinanti adsorbiti, che derivano dalla condensazione di ossidi di azoto (NO_x), anidride solforosa e dalla contaminazione urbana di Al, Si, Fe e Zn. È importante sottolineare che gli studi intrapresi hanno evidenziato risultati discordanti per l'individuazione della dimensione delle particelle maggiormente adsorbite dalla vegetazione. Alcuni studi hanno indicato che la frazione più fine <2,5 µm è la dimensione delle particelle dominante, adsorbita dalla vegetazione erbacea, rampicante ed arbustiva, che rappresenta il 53,9-72,9% delle particelle sequestrate per tutte le specie in tutti i siti a diverso livello di inquinamento stradale [27]. Altri studi hanno evidenziato maggiore percentuale di accumulo di PM di maggiori dimensioni. La difficoltà della realizzazione di tali studi deriva dal fatto che la massa di PM sequestrato deriva dalla intensità del traffico, sia per emissione diretta dei veicoli, sia per successiva risospensione delle particelle per movimento dei veicoli, oltre che dal posizionamento e distanza della schermatura verde dalle corsie stradali.

Poiché anche per le specie erbacee ed arbustive e rampicanti la velocità di deposizione è specie-specifica come delineato in [28] è stata messa a confronto la velocità di sequestro particolato di *Hedera helix* (edera), con quella riscontrata in altri comuni arbusti rampicanti. La velocità di deposito oltre ai valori di accumulo dei PM

potrebbero consentire la modellazione futura del potenziale di rimozione dell'inquinamento da PM, utilizzando specie di riferimento come *Hedera helix* scelte come modello, in numerosi studi internazionali.

Studi hanno mostrato l'efficacia di piante come *Hedera helix* e *Parthenocissus quinquefolia* nella cattura dei particolati. Queste piante sono presenti spesso nelle città a coprire muri formando le cosiddette pareti tradizionali. Anche per questo motivo, queste due specie rampicanti sono state inserite nel prototipo di parete verde ENEA e studiate per le funzioni di isolamento termico e assorbimento della CO₂.

Nella Tabella 7 sono riportati i valori rispetto alla loro azione di cattura dei PM; nella stima effettuata è stata considerata un indice di area fogliare (LAI) per *Hedera helix* pari a 2.6 m²/m² di muro e per *Parthenocissus quinquefolia* pari a 5 m²/m² di muro.

Tabella 7. Valori medi di accumulo dei PM in base alle dimensioni del particolato per le specie *Hedera helix* e *Parthenocissus quinquefolia* (elaborazione da Mazur J. 2018) [29]

Specie	Nome comune	0.2–2.5 µm [µg/cm ²]	2.5–10 µm [µg/cm ²]	10–100 µm [µg/cm ²]	Somma dei PM [µg/cm ²]
<i>Hedera helix</i>	Edera	1.08	3.10	16.70	20.88
<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	Vite canadese	1.00	2.60	12.00	15.60

Entrambe le specie presentano una buona capacità di accumulo delle polveri; tuttavia, *Hedera helix* presenta una capacità di cattura relativamente “bassa” delle PM più sottili, dovuta alla bassa quantità di peli presenti sulle foglie, che è comunque compensata dall'intercettazione di PM 10-100 µm. Il *Parthenocissus quinquefolia* non ha ugualmente una grande quantità di peli sulle foglie e manifesta un accumulo di PM inferiore a quello dell'*Hedera helix*. Tuttavia gli autori hanno effettuato l'esperimento in tarda estate, e andrebbe ripetuto in piena estate quando la massa fogliare del *Parthenocissus* è in pieno vigore al fine di confermarne i risultati. Il *Parthenocissus quinquefolia* è una specie caducifolia e per la cattura dei particolati può espletare la sua funzione massima solo in estate.

Un'altra pianta rampicante utilizzata spesso per le siepi e le recinzioni è il *Trachelospermum jasminoides*, specie inserita anche nella parete verde dell'ENEA. Questa specie per la tipologia delle foglie maggiormente cerosi si è dimostrata essere ancor più efficace di *Hedera helix* nella cattura delle PM₁₀ e PM_{2,5} mentre ad esempio *Phlomis fruticosa*, pianta comune anche in Italia e utilizzata nelle cosiddette pareti viventi si è dimostrata molto meno efficace nella cattura delle PM e quindi potenzialmente meno adatta per migliorare la qualità dell'aria [30].

I COV biogenici emessi dalle piante

Le piante emettono esse stesse dei COV e quando si fa riferimento ai COV prodotti dalle piante si parla di COV biogenici. Questi composti come per esempio i monoterpeni e gli isopreni vengono emessi dagli organi della pianta quali foglie, fiore, radici e hanno un ruolo fondamentale nella pianta in quanto costituiscono un mezzo di comunicazione, di difesa e di protezione della pianta stessa. Ad oggi, le sostanze conosciute emesse dalle piante sono circa 1700 [21] [25]. Questi composti, in genere, non sono percepiti dall'uomo tranne le sostanze odorose tipo il pinene o il limonene emesse rispettivamente dai pini e dai limoni. Vengono invece percepiti dagli insetti

che ne possono essere attratti e quindi funzionano da attrattori oppure da repellenti e deterrenti per gli insetti che possono essere dannosi per quelle piante.

L'emissione di questi composti in ambito urbano è ampiamente studiata in quanto alcuni di essi possono reagire con altri inquinanti atmosferici. Per esempio, in presenza di alti livelli di NO_x , la degradazione dell'isoprene porta alla formazione di ozono troposferico [31]; al contrario, in condizioni limitate di NO_x , il COV biogenico può ridurre l' O_3 [32]. Poiché l'emissione dei COV biogenici dipende dalla specie vegetale e dalle condizioni di inquinamento ambientale, attenzione meritano anche questi composti ai fini della scelta delle specie vegetali nei progetti di inclusione del verde in ambito urbano. Queste sostanze sono note per le specie arboree [21] [22] [17], mentre ci sono ancora pochi lavori per le specie arbustive e quelle erbacee. Sono oggetto di studio alcune piante arbustive ed erbacee che possono essere utilizzate per le coperture orizzontali verdi e che possono anche essere inserite in diverse tipologie di coperture verticali verdi. In Tabella 8 direttamente estratta dalla [25], sono riportate le quantità di isoprene e monoterpeni emesse da diverse specie vegetali

Tabella 8. Quantità di isoprene, monoterpeni emessi dalle piante e corrispondente quantità di ozono potenzialmente formabile (OFP). Isoprene e monoterpeni sono valutati come microgrammi emessi per grammo di peso secco per ora ($\mu\text{g g DW}^{-1} \text{h}^{-1}$)

Isoprene and monoterpenes emission of the 15 species under study. Values are means $\pm$ standard error ($n = 3$). n.d. = not detected.

Species	Isoprene ($\mu\text{g g DW}^{-1} \text{h}^{-1}$)	Monoterpenes ($\mu\text{g g DW}^{-1} \text{h}^{-1}$)	OFP ($\text{g plant}^{-1} \text{d}^{-1}$)
<i>Lonicera pileata</i>	0.78 ± 0.16	0.12 ± 0.05	0.068
<i>Filipendula purpurea</i>	0.25 ± 0.03	0.18 ± 0.04	0.006
<i>Filipendula vulgaris</i> 'Kahome'	0.26 ± 0.08	0.28 ± 0.12	0.006
<i>Salvia nemorosa</i>	0.79 ± 0.17	0.29 ± 0.09	0.017
<i>Solidago praecox</i>	n.d.	0.95 ± 0.33	0.001
<i>Rudbeckia sullivantii</i> 'Goldsturm'	0.04 ± 0.01	0.16 ± 0.04	0.001
<i>Gaura lindheimeri</i>	0.51 ± 0.11	0.45 ± 0.14	0.011
<i>Erigeron karvinskianus</i>	0.64 ± 0.14	0.58 ± 0.23	0.014
<i>Campanula</i> <i>persicifolia</i>	n.d.	2.12 ± 0.29	0.077
<i>Veronica longifolia</i>	0.68 ± 0.12	0.75 ± 0.07	0.015
<i>Origanum vulgare</i>	0.98 ± 0.14	2.29 ± 0.58	0.021
<i>Satureja repandens</i>	0.85 ± 0.32	4.16 ± 1.28	0.074
<i>Achillea millefolium</i>	n.d.	0.44 ± 0.10	0.001
<i>Hypericum</i> <i>moserianum</i>	20.14 ± 3.87	3.00 ± 2.25	0.440
<i>Sedum spectabile</i>	0.17 ± 0.08	0.06 ± 0.03	0.001

Come evidenziato dalla Tabella 8, la maggior parte delle specie studiate presenta un livello di emissione di COV biogenici piuttosto basso rilasciando quantità inferiori a $1 \mu\text{g g DW}^{-1} \text{h}^{-1}$, ad eccezione di *Hypericum moserianum* che è considerata come un alto emettitore di queste sostanze. Diversamente, le specie *S. repandens*, *O. vulgare* e *C. persicifolia* sono considerate come emettitori moderati. Ad ogni modo, è interessante notare che nella maggior parte di queste specie l'emissione che reagisce per formare ozono è piuttosto trascurabile.

Rispetto all'assorbimento e cattura dei particolati quelle che tra queste specie presentano un numero maggiore di stomi soprattutto sulla pagina abaxiale ma anche su quella adaxiale sono: *A. millefolium*, *L. pileata*, *F. purpurea*, e *F. vulgaris* "Kahome", suggerendo perciò per queste specie un ruolo potenziale maggiore nell'assorbimento e cattura dei particolati. La presenza di tricomi sulla superficie fogliare, come detto precedentemente, influenza la capacità di rimozione degli inquinanti nelle piante riportati nella Tabella 8. La maggiore densità di tricomi è presente in *F. vulgaris* "Kahome", *S. nemerosa* e *G. lindheimeri*, che quindi presentano un potenziale più elevato per la cattura dei PM₁₀. Mentre *L. pileata*, *R. sullivantii*, *S. spectabile* e *A. millefolium* sono considerate più adatte alla cattura di polveri più sottili avendo foglie con superfici più ruvide.

In conclusione di questo paragrafo, i fattori da considerare per la scelta di specie vegetali per le infrastrutture verdi su edifici in ambiente urbano sono numerosi, così come numerose sono le potenzialità delle piante che differiscono ampiamente tra le diverse specie vegetali; certamente la capacità delle piante di sequestrare composti inquinanti rappresenta un valore aggiunto che va comunque ben definito e bilanciato rispetto alla produzione di sostanze biogeniche, che possono seppur in modo differente contrastare l'effetto ambientale positivo sulla cattura dei COV.

2.4 Effetti del verde parietale sul microclima del "gap" dell'edificio

L'azione esercitata dalla vegetazione presente sulle pareti verdi nei confronti dell'ambiente circostante può essere attribuita all'effetto di diversi meccanismi fisiologici e non: evapotraspirazione; assorbimento e riflessione della radiazione solare; ridotta penetrazione dell'aria calda e fredda ambientale verso la parete perimetrale dell'edificio; isolamento termico dovuto alla cavità d'aria intrappolata nell'intercapedine; movimento del vento modificato. Di seguito vengono riportati i dati ottenuti durante la campagna sperimentale del 2020 utilizzando i sensori predisposti nell'edificio F92 con il finanziamento del precedente Triennio 2016-2018 del programma RdS (Tabella 9).

Tabella 9. Sensori climatici

Sensori climatici	Collocazione
Radiazione globale (GR-2)	Esterno parete Sud-Ovest
Radiazione globale (GR-3)	Intercapedine parete Sud-Ovest
Radiazione globale (GR-4)	Esterno parete Sud-Est
Radiazione globale (GR-5)	Intercapedine parete Sud-Est
Temperatura aria (AT-3)	Intercapedine parete Sud-Ovest
Temperatura aria (AT-5)	Intercapedine parete Sud-Est
Umidità relative RH-3	Intercapedine parete Sud-Ovest
Umidità relative (RH-5)	Intercapedine parete Sud-Est
Velocità vento (WS-2)	Intercapedine parete Sud-Ovest 1° piano
Velocità vento (WS-3)	Intercapedine parete Sud-Ovest 2° piano
Velocità vento (WS-4)	Intercapedine parete Sud-Est 1° piano
Velocità vento (WS-5)	Intercapedine parete Sud-Est 2° piano

Nei grafici sottostanti vengono riportati i valori medi mensili dei diversi parametri monitorati. Vengono messi a confronto i dati raccolti durante la stagione invernale (gennaio e febbraio) con quelli rilevati durante la stagione

estiva (luglio e agosto). Tali dati vengono inoltre messi in relazione con i valori monitorati dalla stazione meteorologica presente sul tetto dell'edificio F92 (Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34).

Osservando i dati della radiazione globale (Figura 20) possiamo notare come in entrambe le direzioni la quantità di radiazione solare trasmessa dietro le pareti risulta decisamente più bassa rispetto alla radiazione solare incidente, si va da una riduzione di $\sim 72\%$ nei mesi invernali a una riduzione di $\sim 80\%$ nei mesi estivi per la parete a Sud-Ovest. Per la parete Sud-Est la riduzione risulta di $\sim 38\%$ per i mesi invernali e di $\sim 62\%$ per i mesi estivi.

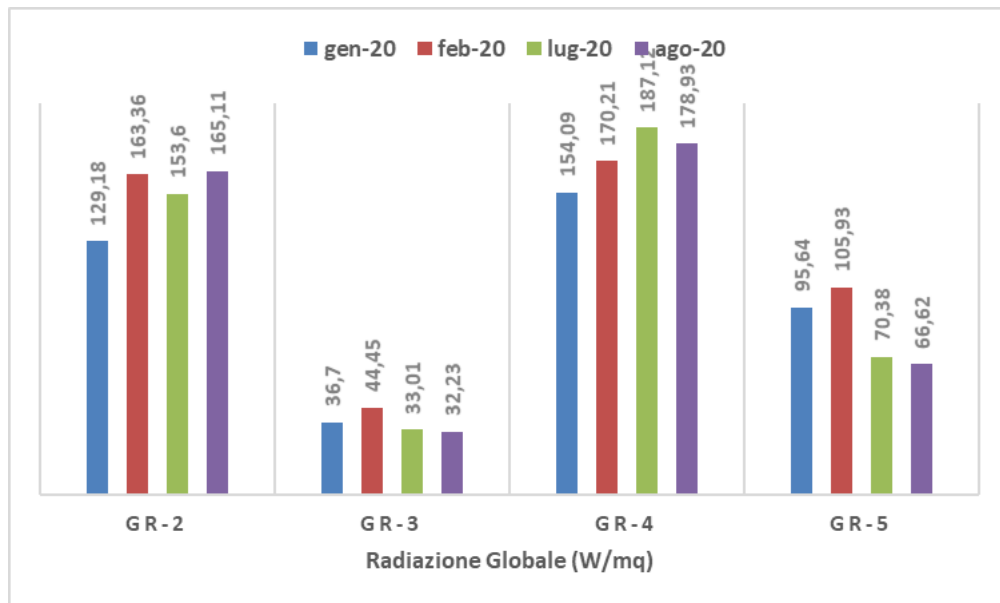


Figura 20. Valori della radiazione globale esterna e nell'intercapedine delle due pareti.
Parete Sud-Ovest: GR-2 (esterna); GR-3 (intercapedine)
Parete Sud-Est: GR-4 (esterna); GR-5 (intercapedine)

Per quanto riguarda la velocità del vento (Figura 21), considerati i valori medi mensili misurati dalla stazione meteorologica sul tetto, gennaio 2,99 m/s, febbraio 4,02 m/s, luglio 3,99 m/s, agosto 4,19 m/s, possiamo affermare che abbiamo una consistente diminuzione della velocità nell'intercapedine più netta a Sud-Est e comunque a parità di orientamento ancora maggiore al 2° piano.

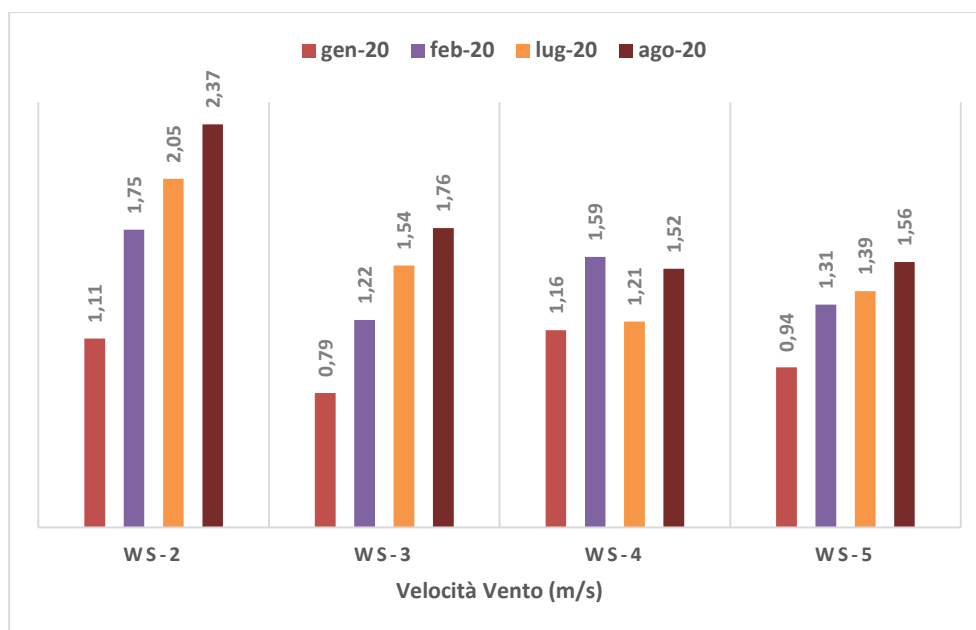


Figura 21. Valori velocità del vento nell'intercapedine. Parete Sud-Ovest: WS-2 (1° piano); WS-3 (2° piano). Parete Sud-Est: WS-4 (1° piano); WS-5 (2° piano)

Per quanto riguarda la temperatura dell'aria nel sito sperimentale, i valori mensili medi dei mesi in questione sono stati: gennaio 8,62 °C, febbraio 10,44 °C, luglio 25,63 °C, agosto 26,04 °C. Dai dati riportati nel grafico possiamo notare che nel periodo invernale non ci sono differenze tra le temperature misurate nel sito e quelle misurate nelle intercapedini né a Sud-Est né a Sud-Ovest. Diversamente, per i mesi estivi si nota una leggera diminuzione della temperatura solo nel mese di luglio (~3°C) nell'intercapedine a Sud-Ovest.

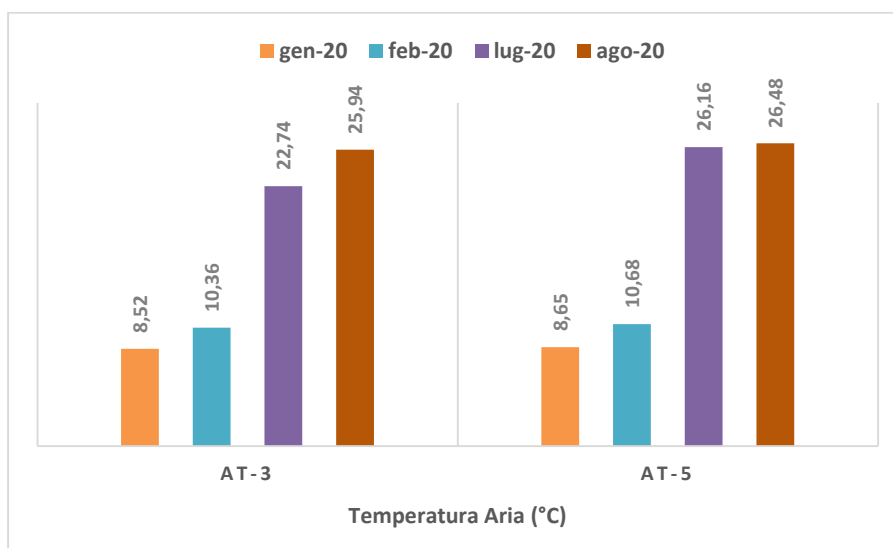


Figura 22. Temperatura dell'aria. Intercapedine Sud-Ovest: AT-3; Intercapedine Sud-Est: AT-5

La stazione sperimentale sul tetto per l'umidità relativa (Figura 23) nei mesi in analisi ha monitorato i seguenti valori: gennaio 72,93 (%), febbraio 70,35 (%), luglio 54,51 (%), agosto 60,18 (%). I valori misurati nelle intercapedini mettono in evidenza una diminuzione dell'umidità a Sud-Est sia nei mesi invernali (~1%) che nei mesi estivi (~2%). Viceversa, nell'intercapedine a Sud-Ovest, il valore dell'umidità non presenta variazioni rispetto al dato esterno nei mesi invernali, mentre risulta leggermente superiore nei mesi estivi (~1%).

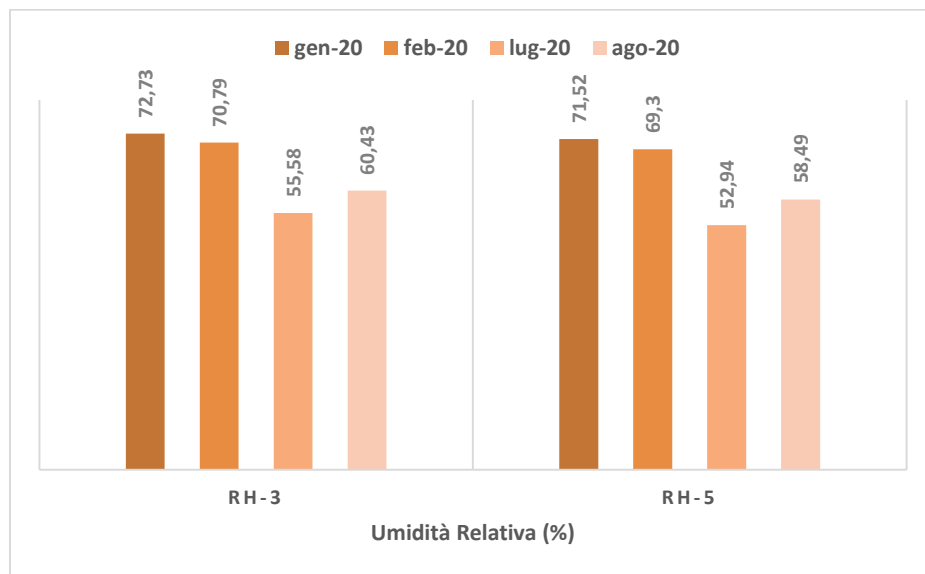


Figura 23. Umidità relativa. Intercapeidine Sud-Ovest: RH-3; Intercapeidine Sud-Est: RH-5

Pertanto, l'installazione delle pareti verdi in un ambiente urbano, oggi estremamente carente di aree verdi, può portare diversi benefici sia su scala locale, l'edificio su cui vengono collocate, che su scala urbana nei confronti dell'attenuazione dell'effetto isola di calore.

2.5 Flussi energetici del sistema parete verde dell'edificio

Nel 2013, la Commissione europea ha pubblicato la sua "Strategia per le infrastrutture verdi, Capitale naturale dell'Europa", seguita da un'agenda politica di ricerca e innovazione per la realizzazione di soluzioni naturali e di "rinaturazione" delle aree urbane come le infrastrutture verdi (tetti e pareti verdi, giardini pluviali, parchi con alberi da strada) [33] [34], [34]. Le tecnologie energetiche naturali, soprattutto tetti e pareti verdi, migliorano l'isolamento termico degli edifici e l'efficienza energetica dei sistemi di condizionamento, apportano benefici microclimatici basati sulle proprietà biologiche delle piante. Di seguito, si riportano le più importanti proprietà dei sistemi vegetali sugli edifici [35].

Evapotraspirazione (consumo di calore latente): è un sistema di raffreddamento naturale tipico dei tetti e delle pareti verdi. L'acqua evapora e il cambiamento di fase, o evaporazione, dall'acqua liquida a vapore acqueo, provoca il consumo di calore latente che riduce la temperatura circostante. Si verifica quando l'acqua viene spostata dal terreno di coltura attraverso la pianta e quindi rilasciata sotto forma di vapore attraverso gli stomi delle foglie.

Riflessività (albedo): i tetti verdi tendono ad avere un'albedo (o riflettività della radiazione solare) più elevata rispetto ai tetti convenzionali e quindi assorbono meno "calore" solare. Le piante di *Sedum* diventano addirittura più riflettenti sotto "stress" da calore. Poiché la maggior parte dei tetti sono scuri e con un'albedo ridotta (riflettono pochissima energia solare) si riscaldano rapidamente. I tetti cosiddetti "freddi" (tra i quali le superfici bianche e i tetti verdi) aiutano a ridurre l'effetto "isola di calore urbana" perché presentano un'albedo più alta e assorbono meno energia solare. Questo fenomeno, durante la notte, consente di irradiare meno radiazione termica negli ambienti delle città.

Massa termica: gli strati di un tetto verde o di un sistema di pareti verdi contribuiscono ad aumentare la massa

termica di un tetto o di una parete tradizionale favorendo l'assorbimento del calore durante il giorno e il suo lento rilascio nel corso della notte. L'aumento del contenuto di acqua contribuisce in modo significativo alla massa termica.

Schermatura verde: la massa fogliare ombreggia le pareti e i terrazzi degli edifici e in questo modo riducono il trasferimento e l'assorbimento di calore nell'edificio. Quando la radiazione solare riscalda eccessivamente le piante, queste cominciano a traspirare acqua (vapore acqueo) per mantenere una temperatura fogliare non superiore ai 20 °C. Inoltre, con la fotosintesi, le piante assorbono CO₂ e producono ossigeno e, come per il processo di evapotraspirazione, estraggono l'energia necessaria per il processo fotosintetico dall'ambiente raffreddandola. Con i processi biologici della evapotraspirazione e della fotosintesi, le piante introducono acqua (sotto forma di vapore acqueo) nell'aria, aumentandone l'umidità che provoca una riduzione della temperatura e aumenta il comfort degli ambienti urbani. Mediamente per percepire l'effetto della evapotraspirazione occorrono superfici inverdite pari ad almeno 2.000 m².

Inverdimento per i sistemi di condizionamento: i condizionatori d'aria aspirano l'aria esterna con un ciclo di refrigerazione per assorbire e rimuovere il calore da quest'aria e scaricando il calore all'esterno. Pertanto, la temperatura dell'aria in ingresso è un fattore importante per l'efficienza della climatizzazione. La riduzione della temperatura dell'aria dell'ambiente intorno alle prese d'aria e alle unità del condizionatore può migliorare l'efficienza del condizionatore d'aria. Una temperatura esterna più elevata favorisce un assorbimento maggiore di potenza elettrica (W) con una diminuzione della resa frigorifera. Le coperture verdi sulle facciate esterne degli edifici consentono la schermatura della radiazione solare e l'emissione di vapore acqueo (traspirazione), favorendo una diminuzione della temperatura dell'aria che circonda la macchina esterna del sistema di condizionamento (condensatore) che favorisce una maggiore efficienza del sistema di condizionamento e, conseguentemente, una riduzione del consumo di elettricità per il condizionamento dell'aria esterna. Un aumento di 1°C della temperatura dell'aria equivale a un aumento di circa il 4 per cento di consumo di elettricità per il condizionamento estivo [36]. Una notevole percentuale del carico termico istantaneo viene assorbito dalla vegetazione mentre la restante parte viene accumulata nelle strutture; solo la quantità di calore trasmessa dall'aria per convezione diviene un carico effettivo per l'impianto di condizionamento. La schermatura vegetale interviene su due fattori che caratterizzano l'andamento delle temperature e, di conseguenza, l'andamento del flusso termico. Tenuto conto della natura ondosa che caratterizza la temperatura, la schermatura vegetale ne riduce l'ampiezza e ne varia la fase. Questi due effetti si traducono in una riduzione dei picchi di temperatura raggiunti sulle superfici esposte e, pertanto, di flusso termico che investe la parete e in un ritardo temporale che "sposta" il picco massimo di temperatura superficiale esterna delle pareti dell'edificio. In definitiva, si riduce fortemente il flusso termico che penetra all'interno dell'edificio. Il fenomeno dello sfasamento è molto importante rispetto al consumo elettrico degli impianti di condizionamento nelle aree geografiche dove la richiesta di energia elettrica cade tra la tarda mattinata e le prime ore del pomeriggio: uno sfasamento di tre ore, per esempio, sposta il picco di temperatura dell'aria su temperature dell'aria meno elevate, con vantaggi sia economici e sia ambientali. Infatti, il climatizzatore sarà attivato durante le ore meno calde e pertanto il condensatore (macchina esterna) lavorerà a temperature favorevoli allo scambio termico [37]. A riprova del fatto che la vegetazione contribuisce a migliorare le prestazioni energetiche degli edifici è opportuno sottolineare che gli standard di certificazione dell'efficienza e del risparmio energetico, quali LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e BREEAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), hanno iniziato ad includere le soluzioni vegetali naturali nei sistemi di punteggio per la qualità energetica degli edifici.

ANALISI DATI

Dai dati raccolti nei mesi di maggio, giugno, luglio ed agosto 2020 (Tabella 10), è stato possibile valutare il “taglio di flusso termico” che le coltri vegetali esercitano sia quando questa viene posta sul tetto e sia quando realizzata come “parete verde” prospiciente la parete del fabbricato. L’analisi è stata svolta fissando a 26 °C la temperatura interna di comfort degli ambienti dell’edificio, così come dettato dalla UNI/TS 11300-1 e tenendo conto delle temperature rilevate rispettivamente per il tetto e per la parete in relazione ai seguenti dati di ingresso:

Temperatura parete non protetta [T]:	°C
Temperatura parete protetta [T]:	°C
Temperatura tetto non protetto [T]:	°C
Temperatura tetto protetto [T]:	°C
Temperatura interna [T]:	26 °C (299,15 K)
Trasmittanza tetto non protetto [τ]:	0,35 W/m ² K
Trasmittanza tetto protetto [τ]:	0,20 W/m ² K
Trasmittanza parete [τ]:	0,80 W/m ² K
Area di riferimento [S]:	1 m ²
L’intervallo temporale [t] tra due misure consecutive è di:	1 h

Il calcolo del flusso termico è espresso dalla relazione: $Q = \tau \cdot S \cdot \Delta T \cdot t$ [W · h] (A)

In accordo con la (A) sono stati stimati i flussi energetici che caratterizzano le pareti verdi (verde) rispetto alle pareti privi della vegetazione (no-verde) rispetto al passaggio del calore verso l’interno dell’edificio prototipo. I calcoli sono stati riferiti a una temperatura di comfort degli ambienti interni fissata a 26 °C (non si è tenuto conto della inerzia termica della parete).

Di seguito si riporta le stratigrafie della parete, secondo la norma ISO 6946, (Tabella 10) dell’edificio, l’andamento dei flussi energetici per i mesi da maggio ad agosto per le pareti di Sud Ovest (Figura 24) e di Sud Est (Figura 25). Sono inoltre riportate le stime dei valori relativi ai flussi termici della parete di Sud-Ovest (Figura 26) e di Sud-Est (Figura 27). Infine, sono riportate le stime dei consumi dell’energia elettrica per il condizionamento degli ambienti interno di Sud Ovest (Tabella 11) e di Sud Est (Tabella 12).

Tabella 10. Stratigrafia delle pareti dell’edificio

STRATIGRAFIA					
	DESCRIZIONE	SPESSORE (m)	CONDUTTIVITA' [λ] W/mK	RESISTENZA TERMICA [R] m ² K/W	TRASMITTANZA TERMICA [τ] W/m ² K
Rsi	Resistenza termica interna			0,100	
1	Intonaco interno	0,020	0,700	0,029	
2	Mattoni forati	0,080	0,300	0,267	
3	Intercapedine aria	0,060			
4	Mattoni forati	0,250	0,300	0,833	
5	Intonaco esterno	0,020	0,900	0,022	
RESISTENZA TERMICA STRUTTURA [Rstruttura]				1,251	
TRASMITTANZA TERMICA STRUTTURA [Ustruttura]					0,80

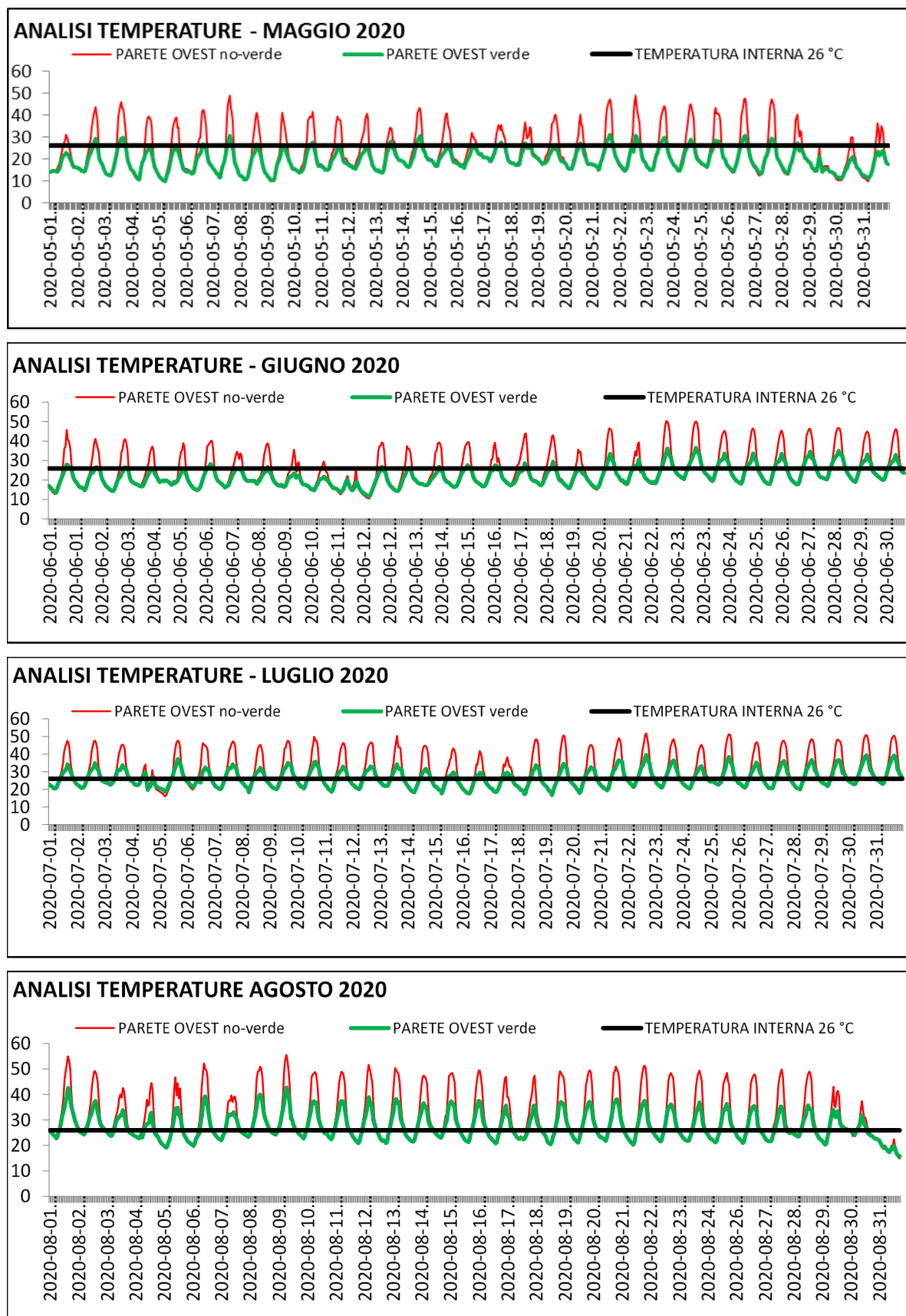


Figura 24. Analisi delle temperature della parete di Sud-Ovest dell'edificio prototipo

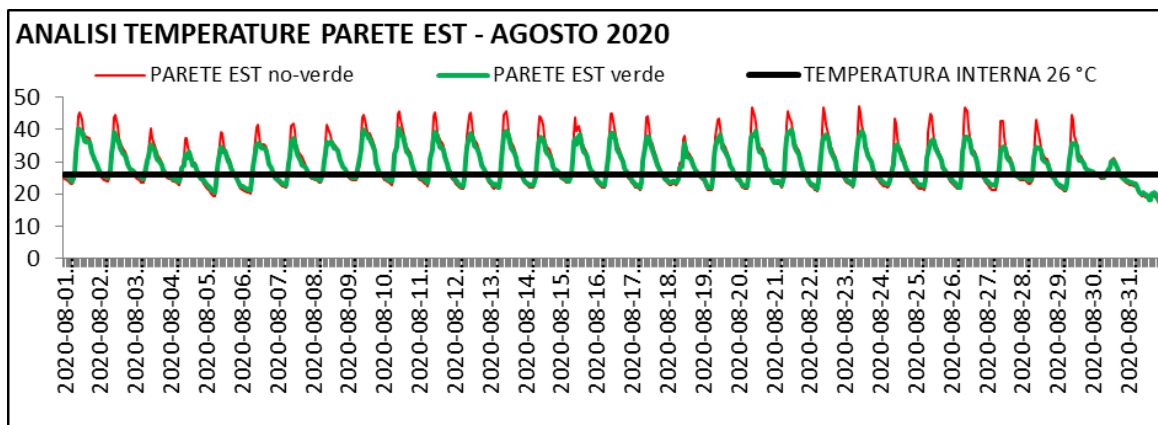
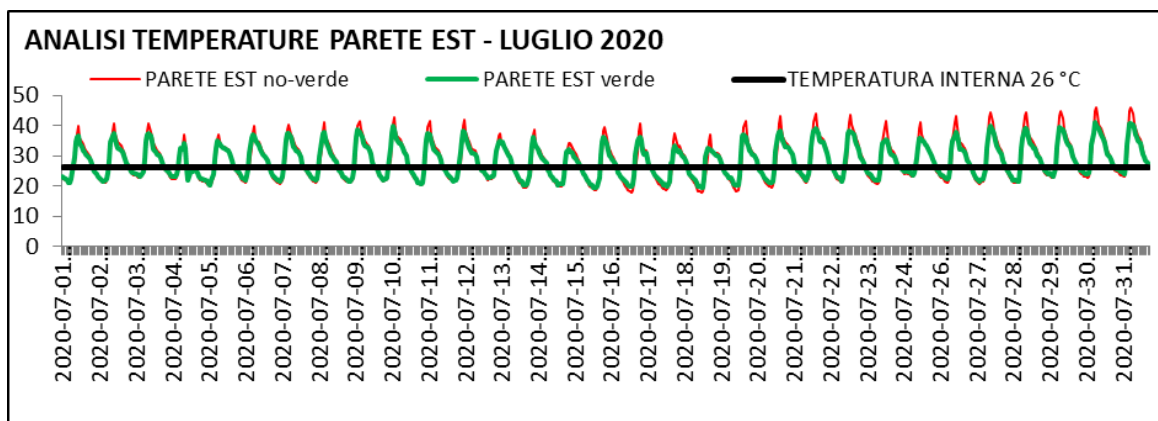
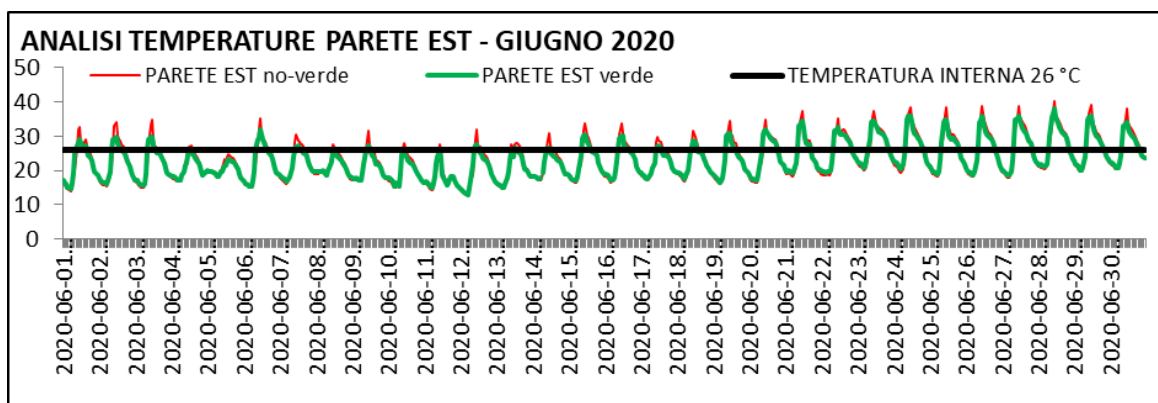
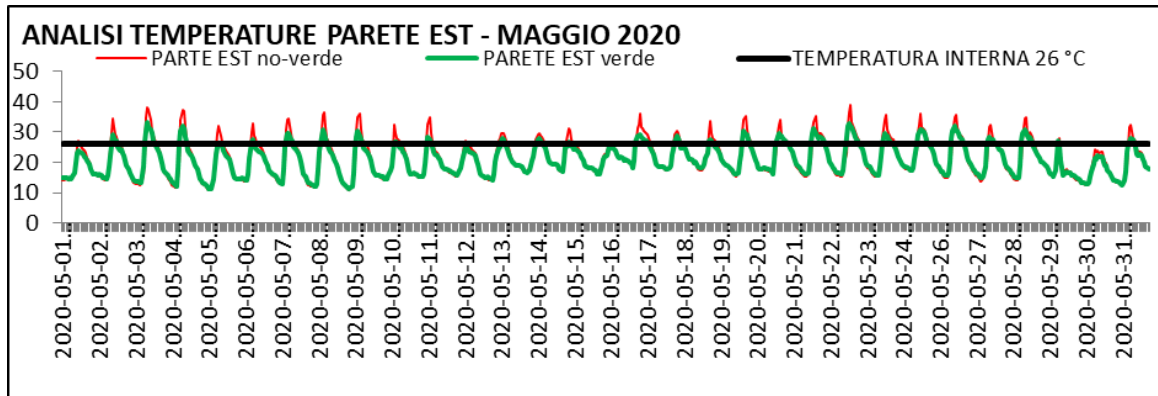


Figura 25. Analisi delle temperature della parete Sud Est dell'edificio prototipo

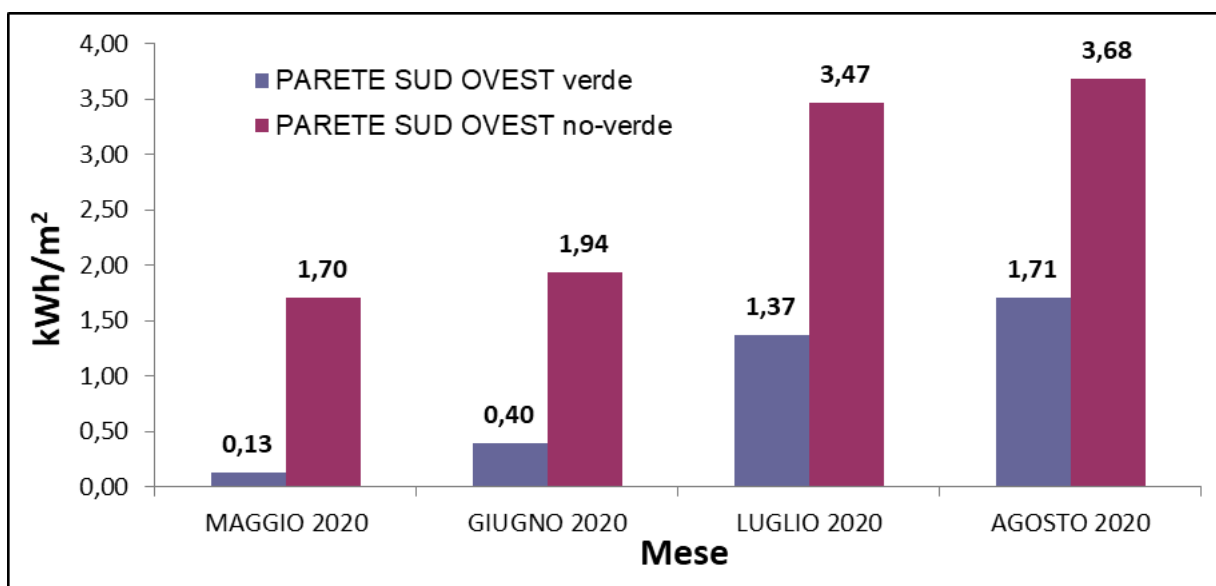


Figura 26. Flussi termici entranti nell'edificio prototipo per le pareti di Sud Ovest

Tabella 11. Parete Sud Ovest. Valori di riduzione del flusso termico entrante nell'edificio e al risparmio di energia elettrica per il condizionamento interno.

Temperatura interna dell'edificio	26 °C
Riduzione flusso termico entrante nell'ambiente interno edificio	8,59 kWh _t /m²
Riduzione energia elettrica per il condizionamento (EER = 3,7)	2,32 kWh _{el} /m²

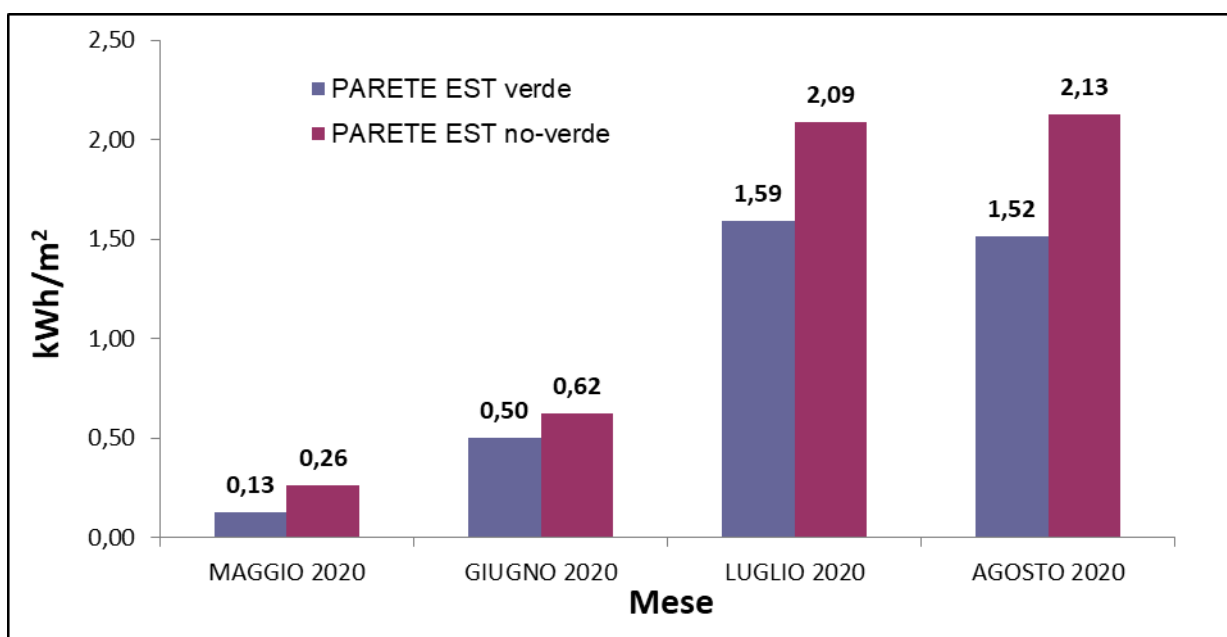


Figura 27. Flussi termici entranti nell'edificio prototipo per le pareti di Sud Est

Tabella 12. Parete Sud Est. Valori di riduzione del flusso termico entrante nell'edificio e di risparmio di energia elettrica per il condizionamento in relazione alle pareti inverdite

Temperatura interna dell'edificio	26 °C
Riduzione flusso termico entrante nell'ambiente interno edificio	8,55 kWh _t /m ²
Riduzione energia elettrica per il condizionamento (EER = 3,7)	2,31 kWh _{el} /m ²

3 TETTO VERDE

In Figura 28 si riportano le immagini scattate nel corso del 2020 al prototipo di tetto verde presente nel CR ENEA Casaccia. Le immagini rappresentano l'evoluzione in differenti mesi dell'anno della copertura vegetale composta nei due appezzamenti: a Graminaceae (*Festuca arundinacea* e *Poa pratensis*) e a *Sedum* (mix di: *Sedum spurium*, *Sedum album*, *Sedum sexangulare*, *Sedum reflexum*, *Sedum rupestre*, *Sedum palmeri* *Sedum* sp.). L'appezzamento a Graminaceae ha subito un evidente stress idrico per la tardiva accensione del sistema di irrigazione dovuta al *lockdown* di marzo che non ha consentito l'ingresso nel Centro. In Figura 29 si riporta un confronto tra lo stato del prato ad aprile 2020 e quello relativo all'anno precedente che era stato regolarmente irrigato.



Figura 28 Tetto verde ENEA. Le fotografie a sinistra si riferiscono all'appezzamento a Graminaceae di *Festuca arundinacea* e *Poa pratensis*, mentre quelle a destra all'appezzamento a *Sedum*



Figura 29. Confronto dello stato del tetto verde tra aprile 2019 e aprile 2020

3.1 Predisposizione operativa del sistema sperimentale con la definizione dei sensori e dei punti di misura funzionali al monitoraggio dell'evapotraspirazione (ET) e della fotosintesi

Di seguito, si riporta un elenco dei principali sensori installati nel sito sperimentale del tetto verde ENEA.

A livello della stazione meteorologica collocata sul davanzale del tetto sono presenti:

- AT01 Temperatura dell'aria
- RH01 Umidità dell'aria
- RG01 Radiazione globale
- PAR01 Radiazione PAR
- UVA01 Radiazione UVA
- UVB01 Radiazione UVB
- WS01 Velocità del vento
- WD01 Direzione del vento
- RG01 Pluviometro

A livello del prato sono presenti:

- TS11 Temperatura superficiale sotto il manto erboso del settore a Graminaceae
- TS12 Temperatura superficiale a livello del tetto non ricoperto da colture vegetale (tetto nudo)
- TS13 Temperatura superficiale sotto il manto erboso del settore a *Sedum*

Nell'anno 2020, le attività di ricerca riguardanti l'evapotraspirazione e la fotosintesi delle piante sono state definite e condotte in serra bioclimatica, come riportato in dettaglio nel Capitolo Serra Bioclimatica di questo Report. I risultati della sperimentazione del 2020 in serra bioclimatica hanno consentito di ottimizzare la pianificazione della sperimentazione del 2021 sul tetto, sia per quanto riguarda le specie orticole da testare (vite, pomodoro, sedano, lattuga) che per quanto riguarda le condizioni di crescita in vaso (substrato, fertilizzante, irrigazione). Sul tetto la misura dell'evapotraspirazione verrà stimata tramite l'utilizzo di una bilancia a cella di carico; infatti, durante la prima annualità (2019), ne sono state acquistate due, una da mantenere fissa nella serra bioclimatica ed un'altra da utilizzare sul tetto per brevi periodi, per evitarne il danneggiamento dovuto agli agenti climatici esterni. Sulle stesse piante verrà effettuata la stima (indiretta) della fotosintesi tramite lo strumento SPAD-502 Konica Minolta acquistato nel 2020 (Figura 30). Lo strumento consente di misurare il contenuto di clorofilla a livello della lamina superiore delle foglie, senza danneggiarle. Le piante scelte presentano una morfologia fogliare (per superficie) adatta all'utilizzo dello strumento. Lo SPAD determina la

quantità di clorofilla misurando l'assorbanza della foglia in due regioni spettrali di diverse lunghezze d'onda; considerato che la clorofilla presenta due maggiori picchi di assorbimento nel blu (400-500 nm) e nel rosso (600-700 nm) e non assorbe nel vicino infrarosso, lo SPAD misura l'assorbanza della foglia nelle regioni del rosso e del vicino infrarosso e calcola un valore numerico SPAD che è proporzionale alla quantità di clorofilla in essa presente. Il contenuto di clorofilla, oltre ad essere un indicatore indiretto della fotosintesi, è anche un buon parametro per valutare le condizioni della pianta, infatti risulta che sia proporzionale alla quantità di azoto presente nella foglia oggetto della misura.

Una volta effettuate queste misurazioni di evapotraspirazione e fotosintesi, sarà auspicabilmente possibile mettere in relazione tra di loro gli andamenti di questi due parametri fisiologici chiave delle piante cresciute sul tetto. Lo studio verrà condotto parallelamente su piante orticole coltivate sul tetto e ripetute in serra per compararne i risultati.



Figura 30. Misuratore di clorofilla portatile SPAD-502 (Konica Minolta)

3.2 Andamento dei parametri climatici sul tetto – anno 2020

Il sito sperimentale è dotato di una stazione meteorologica a livello del tetto (§3.1). Nei grafici di seguito sono riportati gli andamenti per l'anno 2020 dei principali parametri climatici: temperatura (AT01) e umidità dell'aria (RH01), radiazione globale (GR01), velocità (WS01) e direzione (WD01) del vento. In generale, gli andamenti di questi parametri rientrano tipicamente nella classificazione climatica CSA (estate calda) [38].

L'andamento medio mensile della temperatura dell'aria è mostrato in Figura 31 nel grafico a doppio asse insieme all'umidità relativa. Luglio e agosto risultano i mesi più caldi con un massimo medio registrato ad agosto di 37,25°C. Per quanto riguarda l'umidità relativa, il valore minimo (16,68%) si registra a luglio.

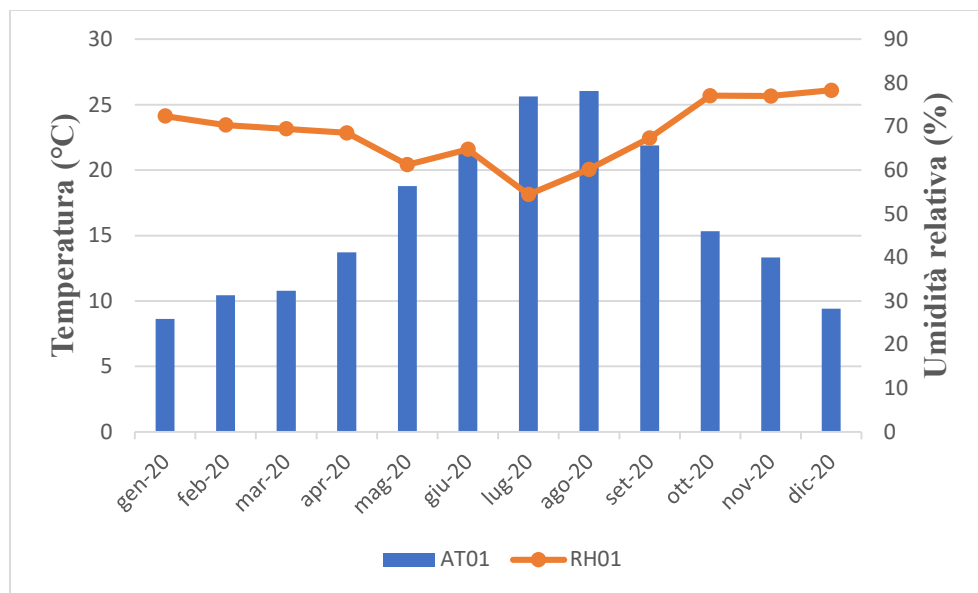


Figura 31. Temperature medie mensili e umidità relative medie mensili nel 2020 registrate dalla stazione meteorologica sul tetto. AT01: temperatura ambiente; RH01: umidità relativa

Per quanto riguarda l'irraggiamento, dal grafico della radiazione globale (Figura 32) si osserva che il valore medio mensile più alto si è avuto a luglio, mentre il valore massimo registrato mensile si è avuto a giugno, in linea con il fatto che, a Roma, la durata media del giorno più lunga si ha a giugno (15h 12m).

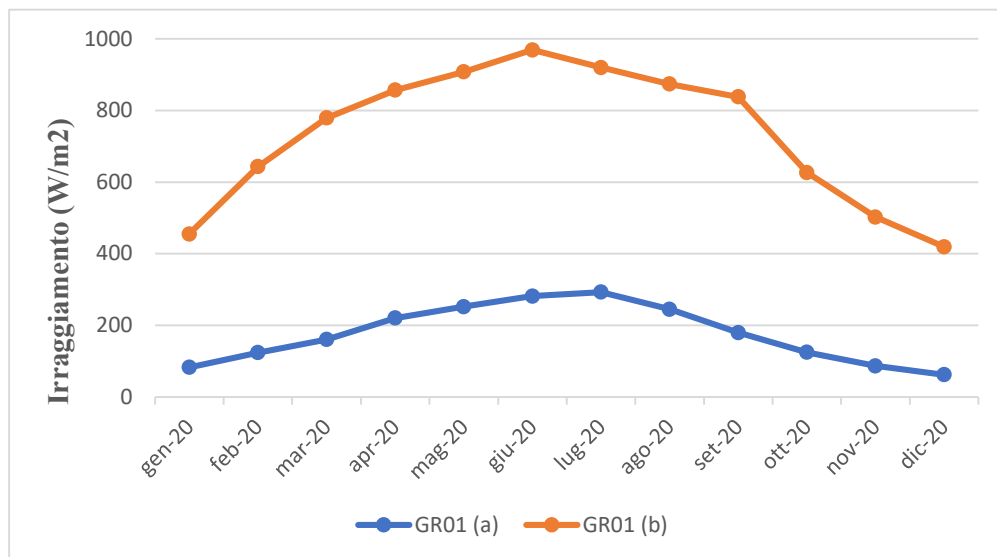


Figura 32. Irraggiamento medio mensile (a) e irraggiamento massimo mensile (b) nel 2020, registrate dalla stazione meteorologica sul tetto. GR01: radiazione globale

Per quanto riguarda la velocità media mensile del vento, il valore si mantiene per quasi tutti i mesi nell'intervallo 3,5÷4.5 m/s (Figura 33). Secondo la scala dei venti questi valori identificano una brezza tesa.

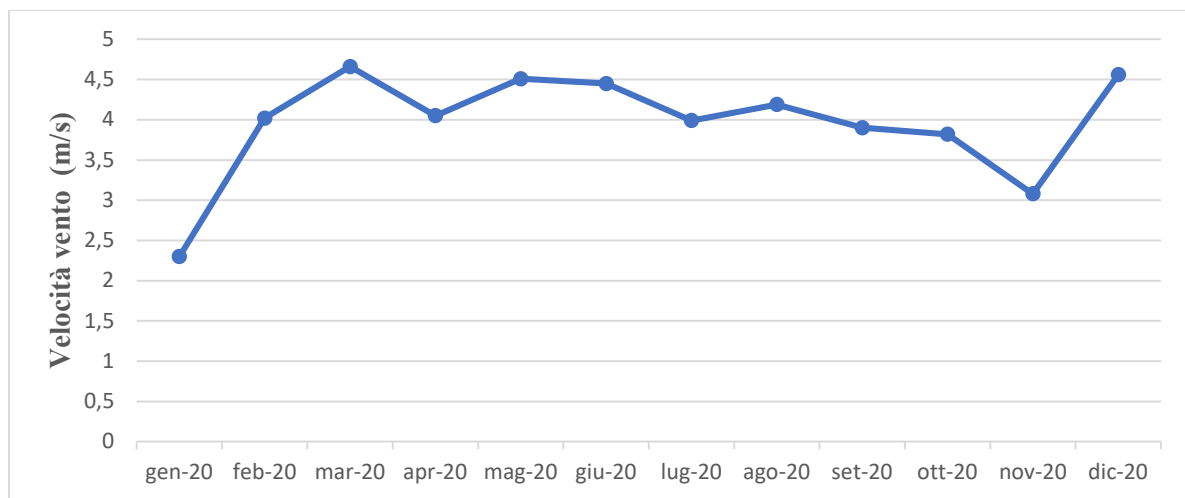


Figura 33. Velocità media mensile del vento nel 2020, registrate dal sensore anemometro (WS01) della stazione meteorologica sul tetto

Inoltre, il diagramma della rosa dei venti riportato in Figura 34 geolocalizzato su *Google Earth* rappresenta schematicamente la provenienza dei venti che insistono sul sito sperimentale nel 2020. Per ciascuna direzione i bracci sono colorati con bande corrispondenti alle classi di velocità del vento e la lunghezza dei bracci varia in funzione della frequenza dei venti in ciascuna direzione. Complessivamente i venti che sopraggiungono più intensamente nella stazione meteorologica provengono principalmente da sud-ovest, ma anche da ovest e nord-ovest e sono praticamente assenti correnti da nord-est.

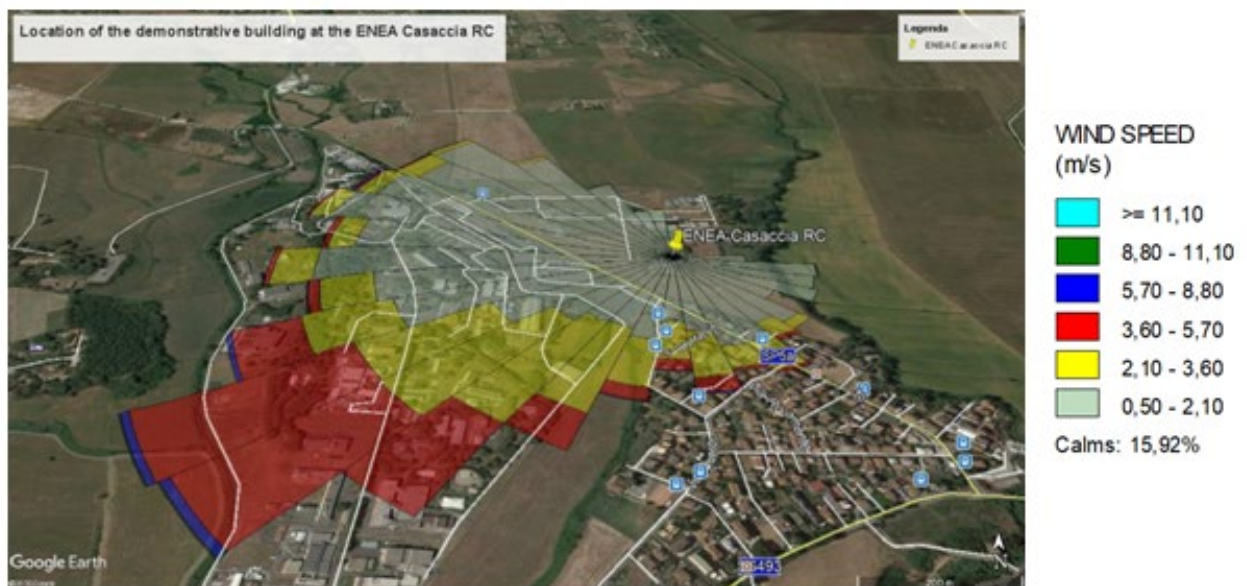


Figura 34. Grafico della rosa dei venti ottenuto con i dati registrati nel 2020 dell'anemometro della stazione meteorologica sul tetto con i sensori di velocità (WD01) e direzione (WD01) del vento

3.3 Confronto tra due differenti tipologie vegetali sull'isolamento termico del manto erboso

Il monitoraggio dei dati termici negli anni precedenti ha consentito di valutare l'influenza della vegetazione a prato di Graminaceae sull'isolamento termico del tetto verde. Si ricorda che l'appezzamento a prato del tetto verde ENEA è costituito da un mix di piante microterme, la *Festuca arundinacea* e la *Poa pratensis*, specie tipicamente presenti nelle configurazioni di prati verdi compatti e a bassa manutenzione. In particolare, la *Festuca arundinacea* è una pianta perenne molto robusta, vigorosa, con radicazione profonda e utilizzata per prati erbosi di forte calpestio, in combinazione con *Poa* e/o *Lolium perenne*. La *Poa pratensis* cresce bene in terreni freschi ma anche asciutti, mostra una lenta crescita iniziale ma molto vigorosa per il forte apparato radicale rizomatoso, pertanto anche questa specie si adatta bene al calpestio.

La sensoristica sul tetto è stata ampliata di alcuni sensori (§3.1); in particolare, a dicembre 2019 è stato integrato un sensore di temperatura superficiale (TS13) localizzato sotto il manto erboso dell'appezzamento a *Sedum*, per consentire di valutare l'effetto dei due diversi tipi di vegetazione – Graminaceae e *Sedum* – sulla riduzione delle temperature superficiali e, conseguentemente, sui risparmi energetici ottenibili a livello dell'ambiente sottostante il tetto verde. A questo scopo, vengono visualizzati graficamente gli andamenti delle temperature superficiali rilevate sotto il manto erboso a erbe microterme (TS11) e sotto il manto erboso a *Sedum* (TS13), evidenziando le riduzioni di temperatura dovute allo strato verde rispetto al tetto non provvisto di copertura vegetale (TS12). Di seguito è riportata l'analisi mese per mese utilizzando i dati di una settimana valutata come rappresentativa del mese; per ogni mese si riporta il grafico delle temperature superficiali e il grafico a doppio asse con i dati di temperatura e di umidità relativa dell'aria.

Gennaio 2020

Nel mese di gennaio 2020 (settimana dal 23 al 29) si osserva una certa uniformità delle temperature superficiali sotto i *Sedum* (TS13) rispetto alle temperature rilevate sotto il prato a Graminaceae (TS11), nonostante in alcuni giorni queste ultime risultino più elevate di quasi 1°C, soprattutto di notte (Figura 35a). In questo mese la temperatura dell'aria raggiunge un valore massimo di 16,86°C alle ore 16:00 (Figura 35b).

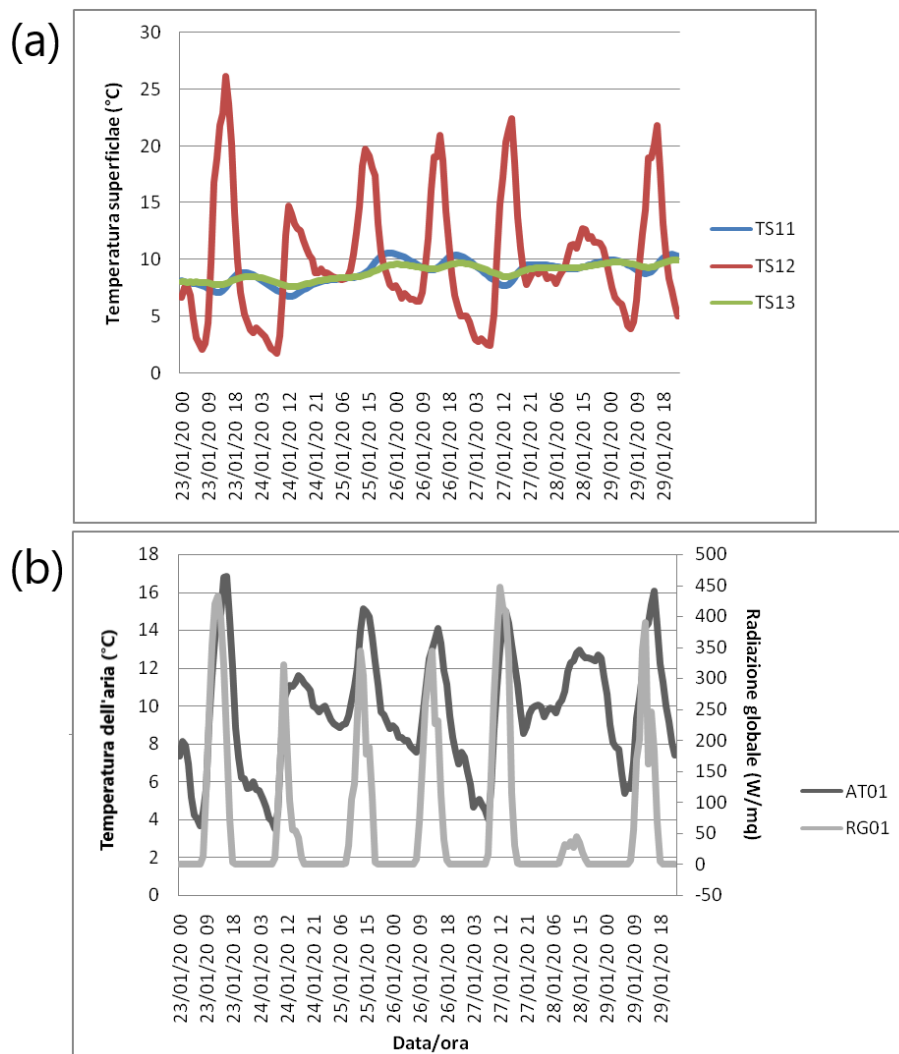


Figura 35. Gennaio 2020, settimana dal 23 al 29. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) media e radiazione globale (GR) media rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale

Febbraio 2020

Nel mese di febbraio 2020 (settimana dal 22 al 28) le temperature superficiali monitorate presentano un andamento molto simile al mese precedente e si rilevano solo poche differenze dovute ai due diversi tipi di vegetazione (Figura 36).

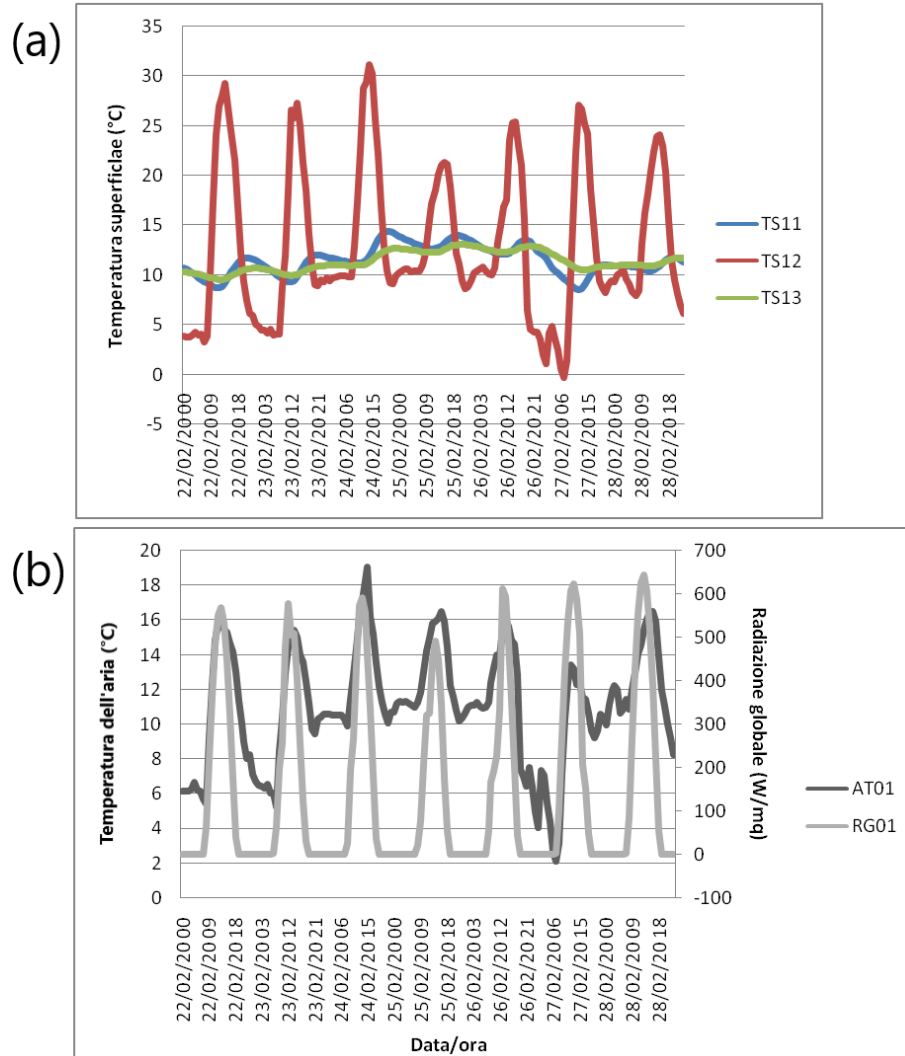


Figura 36. Febbraio 2020, settimana dal 22 al 28. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae ; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) media e radiazione globale (GR) media rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale

Marzo 2020

Nel mese di marzo 2020 (settimana dal 23 al 29) il monitoraggio delle temperature superficiali mostra una maggiore uniformità sotto il *Sedum* (TS13) con un abbattimento della temperatura superficiale maggiore rispetto al prato a Graminaceae (TS11) che registra maggiori variazioni nelle 24h e tra il giorno e la notte. Diversamente, sulla superficie del tetto nudo (TS12) la temperatura mostra dei picchi molto più elevati durante il giorno e delle riduzioni più consistenti durante la notte (Figura 37). E' necessario considerare che, durante il mese di marzo, il tetto non è stato irrigato dovuto alle difficoltà logistiche a seguito all'emergenza Covid-19 e che la temperatura dell'aria (AT) massima registrata nella settimana è stata di 16,23°C alle ore 12, mentre la radiazione globale (GR) massima è stata 779 W/mq (Figura 37b). Di conseguenza, come si vede dalle foto di Aprile riportata in Figura 29 il prato a Graminaceae è essiccato, mentre il *Sedum spurium*, predominante in queste condizioni rispetto alle altre specie di *Sedum*, nel periodo invernale va in dormienza.

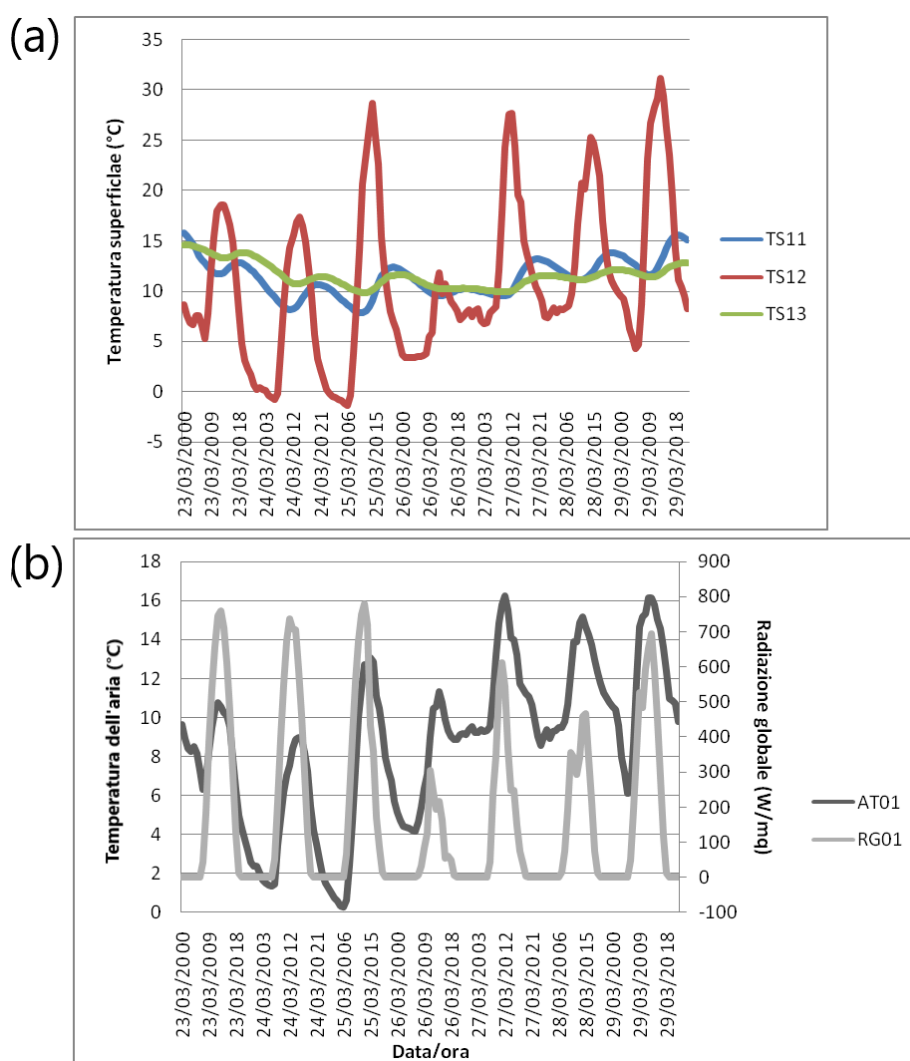


Figura 37. Marzo 2020, settimana dal 23 al 29. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae ; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) media e radiazione globale (GR) media rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale

Aprile 2020

Nel mese di aprile 2020 (settimana dal 23 al 29) le temperature superficiali massime tra le ore 12:00 e le ore 14:00 sul controllo privo di vegetazione (TS12) raggiungono circa 38°C, mentre sotto il manto erboso a Graminaceae (TS11) raggiungono i 17°C alle ore 14:00 (Figura 38). Diversamente, di notte, la temperatura superficiale sotto il manto erboso, sia sotto le Graminaceae (TS11) che sotto il *Sedum* (TS13), si mantiene più elevata di oltre 10°C rispetto a quella misurata su tetto nudo. In particolare, alle 2:00 di notte la temperatura superficiale del prato è al di sopra di 18°C, mentre sul tetto nudo scende fino a 6°C. Come già evidenziato nei mesi precedenti, la temperatura rilevata sotto il *Sedum* presenta meno oscillazioni tra il giorno e la notte rispetto a quelle evidenziate sotto il prato; inoltre, di notte, la temperatura si mantiene più elevata sotto il manto del prato rispetto al manto a *Sedum*. La ripresa vegetativa dei manti erbosi, dopo lo stress idrico subito nei mesi di marzo-aprile, che verrà osservata nei mesi successivi ci consentirà di confermare questi andamenti. Ad aprile, i valori massimi registrati per la temperatura dell'aria (AT) sono vicini a 21 °C, mentre i valori massimi di radiazione globale (GR) superano 840 W/mq (Figura 38).

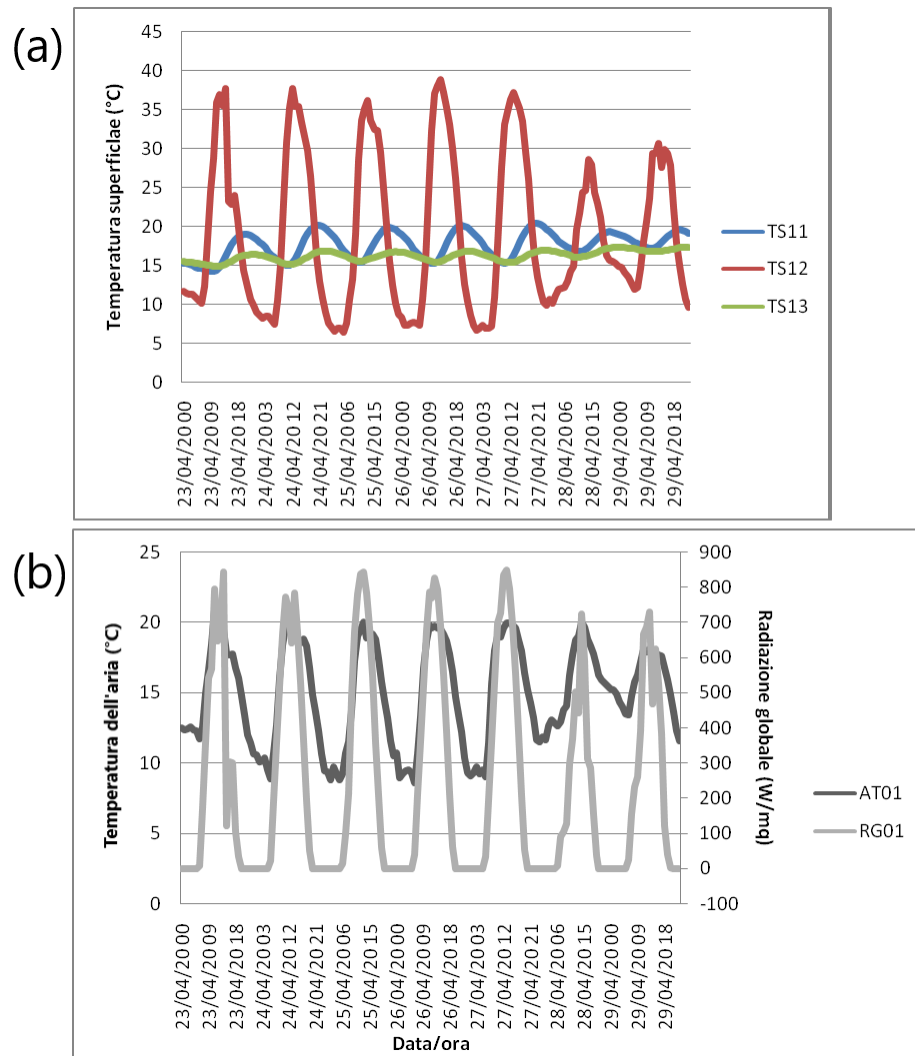


Figura 38. Aprile 2020, settimana dal 23 al 29. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae ; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione

Maggio 2020

Nel mese di maggio 2020 (settimana dal 14 al 20), le temperature superficiali rilevate sul tetto privo di vegetazione (TS12) sono molto elevate in alcuni giorni, raggiungendo 38°C alle ore 13:00. Mediamente, l'abbattimento della temperatura sotto il manto erboso è di circa 18°C. Sotto la vegetazione a Graminaceae, l'escursione termica tra il giorno e la notte può raggiungere i 4°C, mentre sotto il *Sedum* si rileva una maggiore stabilità con inferiori variazioni nei valori di temperatura superficiale (Figura 39a). A maggio, i valori massimi di temperatura dell'aria (AT) raggiungono i 28 °C, mentre quelli di radiazione globale (GR) superano gli 800 W/mq (Figura 39b). La vegetazione sul tetto è in ripresa vegetativa come si evidenzia dalla Figura 28, e si mantiene in condizioni ottimali per il resto dei mesi.

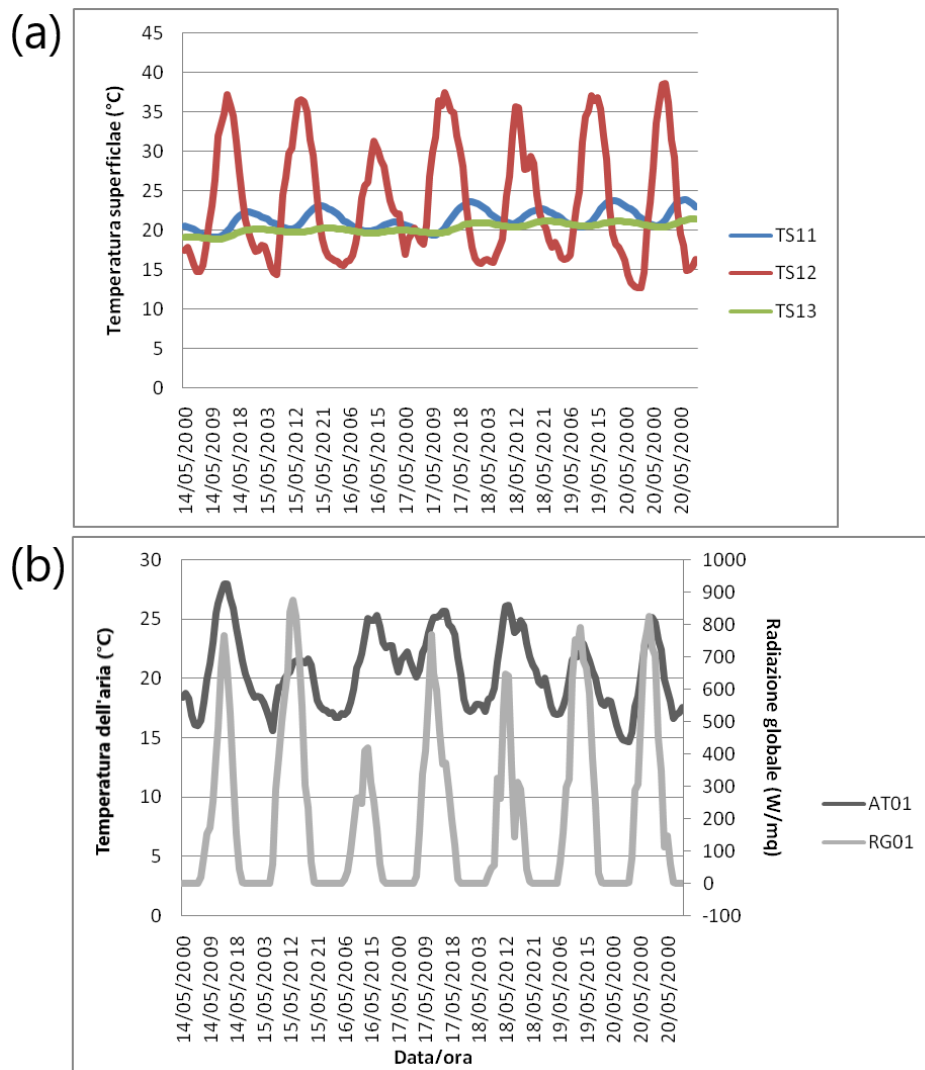


Figura 39. Maggio 2020, settimana dal 14 al 20. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae ; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) media e radiazione globale (GR) media rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale

Giugno 2020

Nel mese di giugno 2020 (settimana dal 14 al 20), la temperatura superficiale sotto il manto erboso a Graminaceae (TS11) mostra il valore più elevato alle ore 20:00 (24,33°C) e quello più basso alle ore 10:00 (20,66°C); mentre la temperatura superficiale sotto il manto di *Sedum* (TS13), il valore registrato più elevato è alle ore 21:00 (21,70°C) e quello più basso è alle ore 7:00 (19,29°C). Si osserva anche per questo mese, un andamento più costante sotto al *Sedum* rispetto alle Graminaceae in quanto le variazioni giorno/notte sono pari a 2°C a differenza dei circa 4 °C rilevati sotto il prato a Graminaceae. Per quanto riguarda il tetto privo di vegetazione (TS12), la temperatura superficiale massima registrata a giugno 2020 è stata di 41°C alle ore 14:00 e la minima di circa 13°C alle 5:00 (Figura 40). Gli andamenti della temperatura ambiente (AT) e della radiazione globale (GR) sono graficati in Figura 40b.

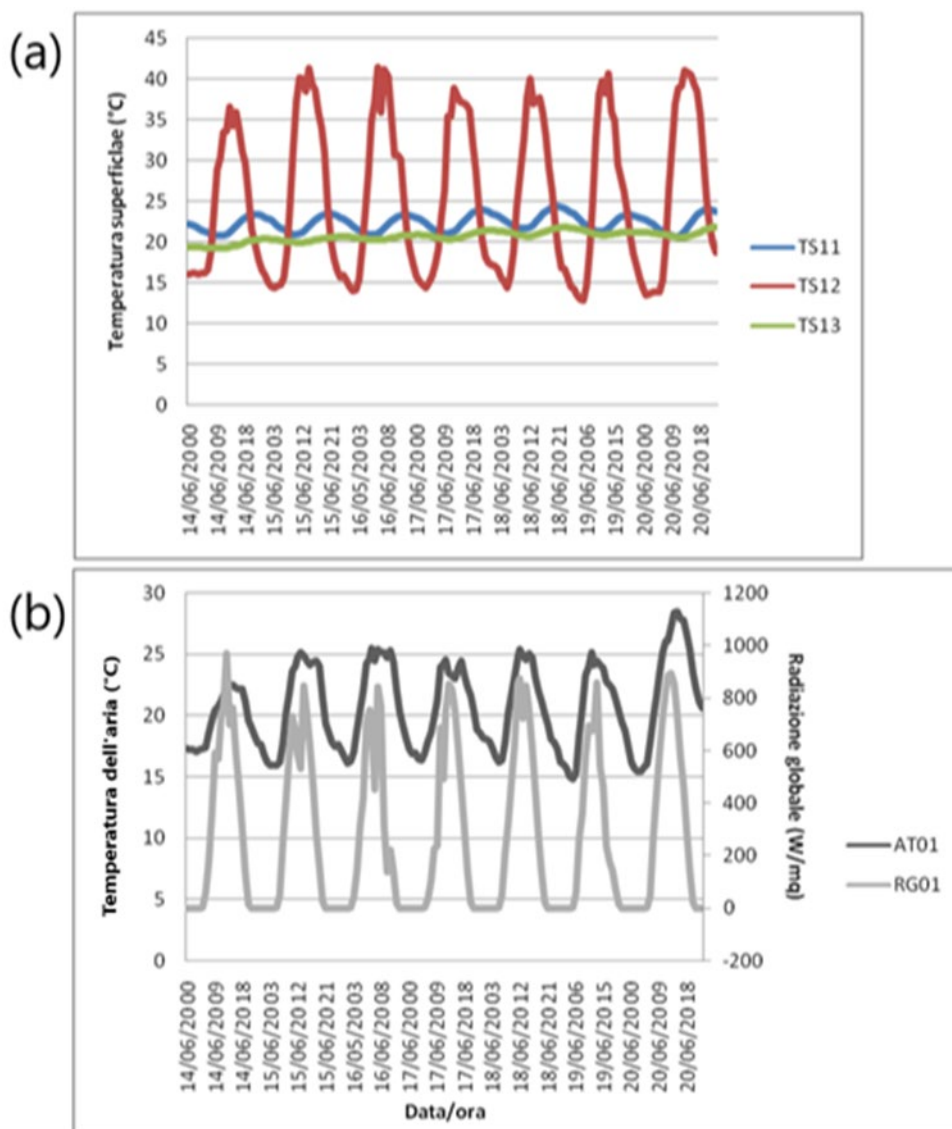


Figura 40. Giugno 2020, settimana dal 14 al 20. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae ; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) media e radiazione globale (GR) media rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale

Luglio 2020

Nel mese di luglio 2020 (settimana dal 14 al 20), riguardo la temperatura superficiale sotto il manto erboso del prato a Graminaceae (TS11), il valore registrato più elevato è di 24,42°C alle ore 18:00 e quello più basso è di 20,48°C alle ore 10:00; riguardo la temperatura superficiale sotto il manto a *Sedum* (TS13), il valore registrato più elevato è di 25,25°C alle ore 00:00 e quello più basso è di 21,45°C alle ore 10:00. L'andamento riscontrato nei mesi precedenti si mantiene anche a luglio, in questo caso però la differenza delle temperature superficiali tra la copertura a *Sedum* e quella a Graminaceae è mediamente di 2°C. Per quanto riguarda il tetto privo di vegetazione (TS12), la temperatura superficiale massima registrata a luglio 2020 è stata di 47°C alle ore 12:00 e la minima di circa 15°C alle 4:00 (Figura 41a). Gli andamenti della temperatura ambiente (AT) e della radiazione globale (GR) sono graficati in Figura 41b.

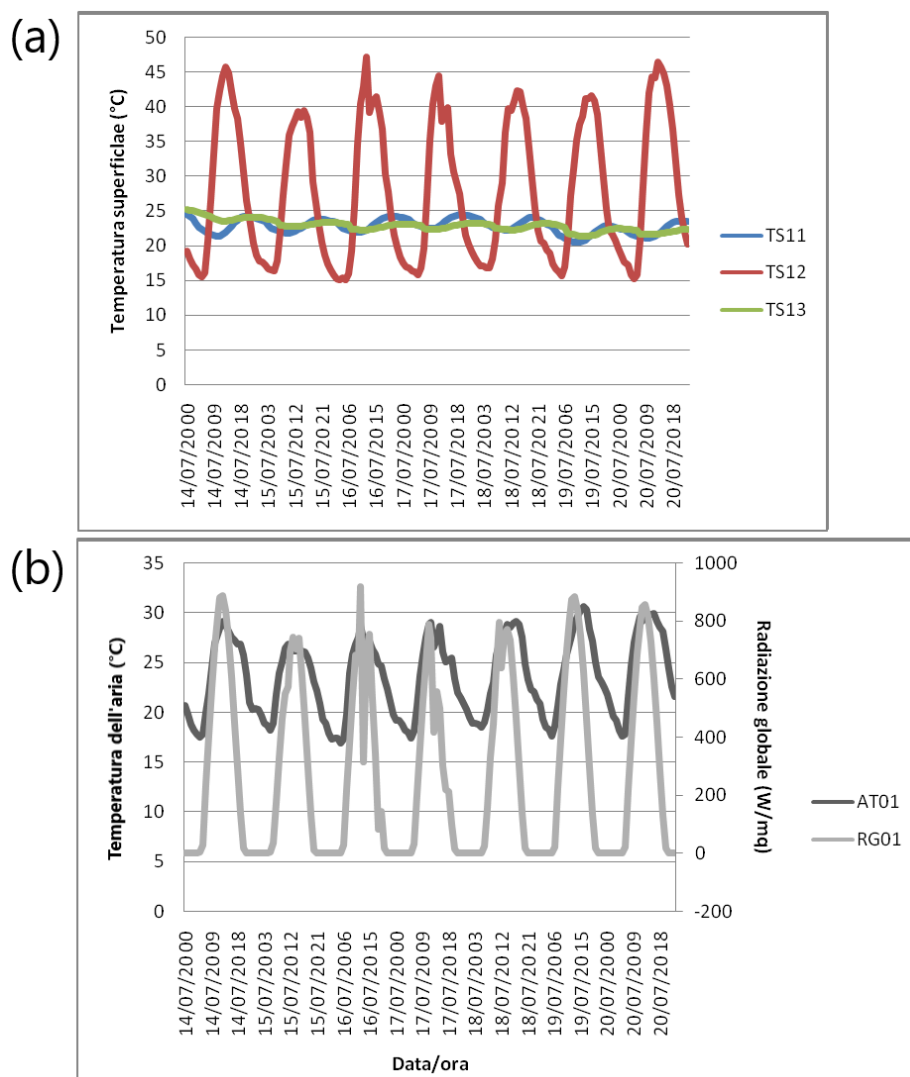


Figura 41. Luglio 2020, settimana dal 14 al 20. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae ; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) media e radiazione globale (GR) media rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale

Agosto 2020

Nel mese di agosto 2020 (settimana dal 14 al 20), la temperatura superficiale sul controllo senza vegetazione (TS12) mostra picchi di giorno intorno ai 50°C, mentre di notte scende sotto i 20°C. Sul tetto ricoperto da prato a Graminaceae la temperatura superficiale (TS11), pur mantenendosi stabilmente al di sotto di 30°C, presenta delle flessioni con temperature più elevate nel tardo pomeriggio, tra le 18:00 e le 19:00, e temperature più basse di mattina, alle ore 10, come rilevato anche per gli altri mesi. Le temperature superficiali sotto il *Sedum* (TS13), invece, non subiscono grandi variazioni, mostrando un massimo di 26°C alle ore 20:00 ed un minimo di 24°C alle ore 11:00. Si conferma dunque che la copertura a *Sedum* rispetto al comune prato a Graminaceae determina meno variazioni della temperatura superficiale misurata sotto al manto erboso (Figura 42a). Il valore di temperatura dell'aria (AT) massimo registrato a livello del tetto ad agosto è stato di 33°C alle ore 12:00 e i valori massimi di radiazione globale (GR) sono stati superiori ad 800 W/mq tra le ore 12:00 e le 14:00 (Figura 42b).

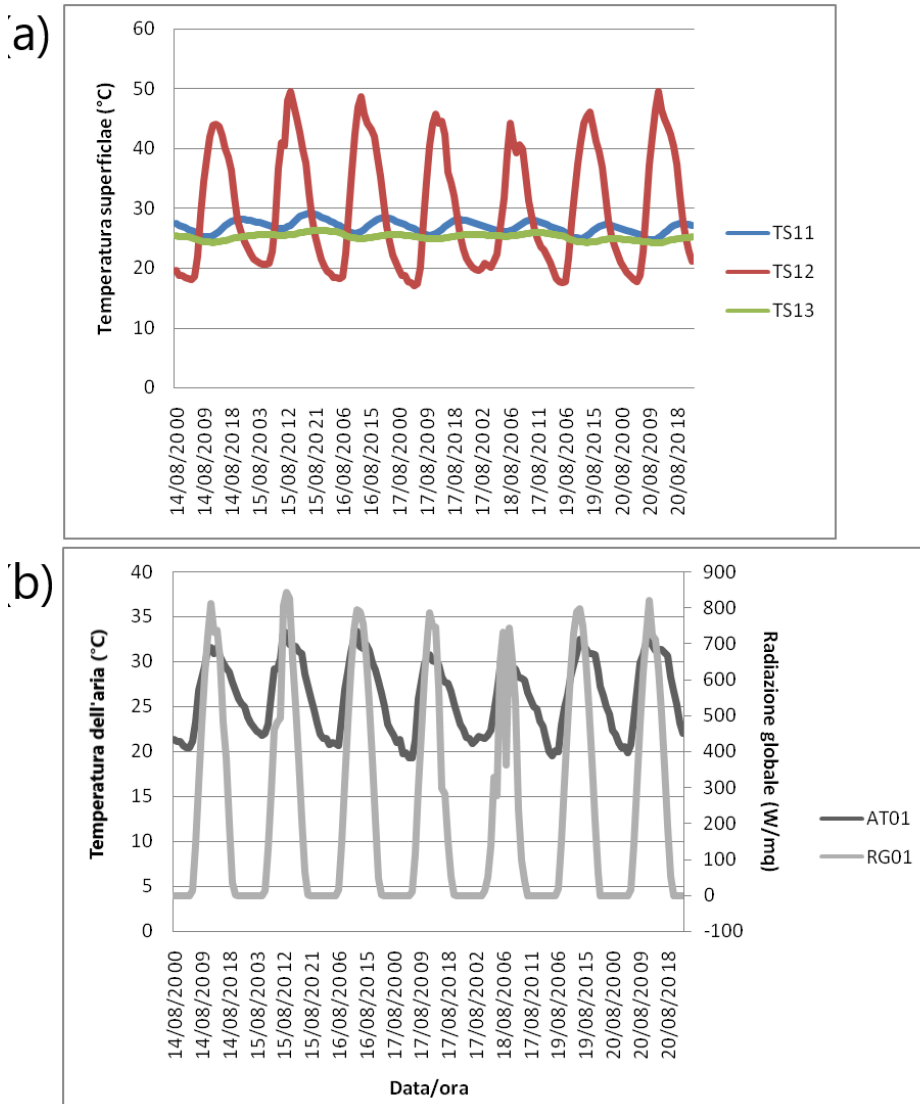


Figura 42. Agosto 2020, settimana dal 14 al 20. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae ; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) media e radiazione globale (GR) media rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; RG01: radiazione globale

Confronto dell'andamento giornaliero tra il 23 gennaio ed il 14 agosto 2020

Di seguito riportiamo i grafici per visualizzare il dettaglio orario degli andamenti delle temperature superficiali (TS11, TS12 e TS13) durante due giornate contrapposte dal punto di vista delle condizioni climatiche medie che si registrano nel sito sperimentale: in particolare, il 23 gennaio come giornata tipo invernale ed il 14 agosto come giornata tipo estiva (Figura 43).

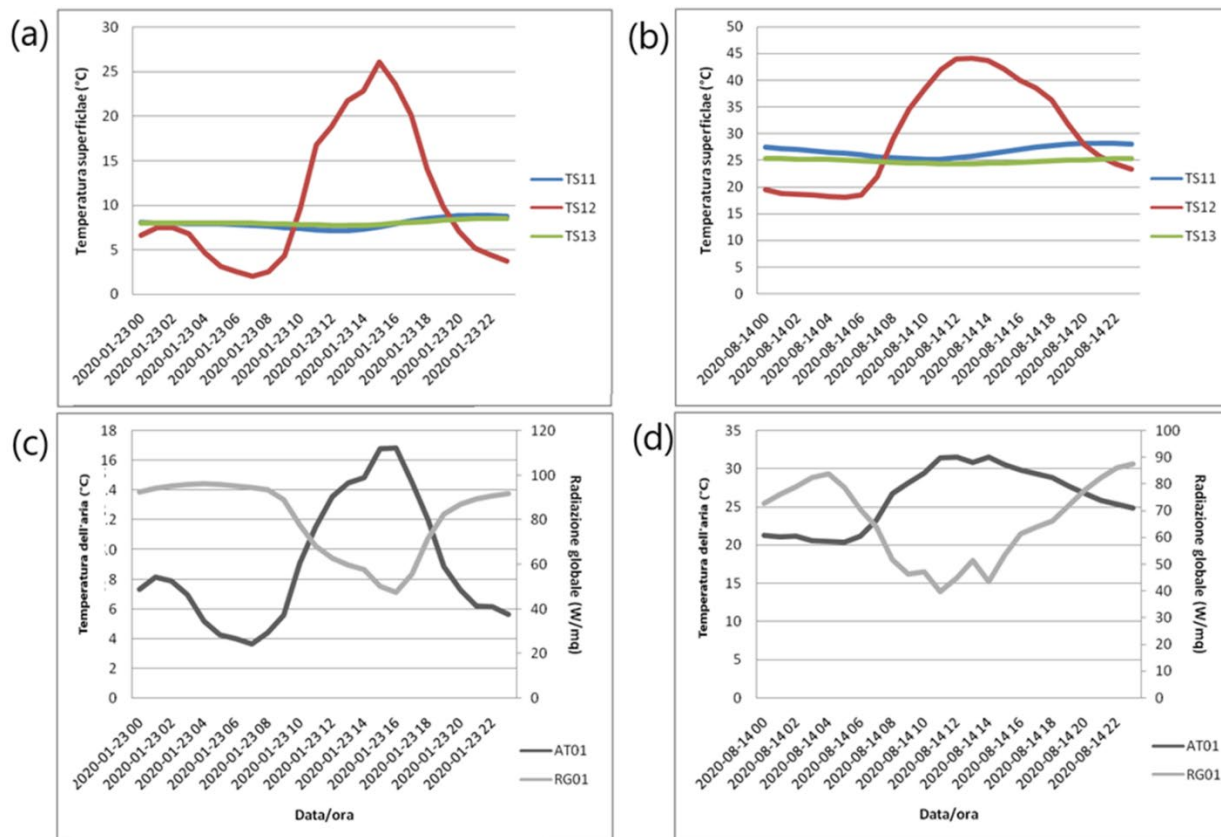


Figura 43. Confronto tra il 23 gennaio e il 14 agosto 2020. Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde il 23 gennaio (a) e il 14 agosto (b). TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae ; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione. Temperatura dell'aria (AT) media e radiazione globale (GR) media rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde il 23 gennaio (c) e il 14 agosto (d). AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale

Osservando il grafico del 23 gennaio, sotto il *Sedum*, di giorno viene mantenuta una temperatura leggermente più alta (di circa mezzo grado) rispetto al prato a Graminaceae, mentre di notte si verifica il contrario e si rileva una temperatura di poco più alta sotto al prato di Graminaceae. Tuttavia, nell'interpretazione di questi risultati, bisogna anche considerare le caratteristiche delle specie vegetali ed il loro livello di adattamento rispetto alle condizioni idriche. Nel settore del tetto con il mix di *Sedum*, il *Sedum spurium* costituisce la specie più abbondante e maggiormente sviluppata rispetto alle altre, dovuto alle condizioni di irrigazione adoperate nella gestione del tetto verde ENEA che assicurano un buon apporto idrico costante. Tale specie di *Sedum* va in dormienza in inverno, pertanto la copertura del manto erboso diminuisce in inverno rispetto all'estate, con il risultato che la radiazione luminosa incidente sullo strato verde e sul substrato scalda maggiormente facendo rilevare un'aumento della temperatura superficiale.

Diversamente, il 14 agosto, la temperatura superficiale sotto il *Sedum* (TS13) si mantiene più bassa rispetto al prato a Graminaceae (TS11), sia di giorno che di notte, e tra le due diverse coperture vegetali si rilevano circa 3 °C di differenza tra le ore 18:00 e le ore 19:00 e 2°C di differenza alle ore 14:00. In definitiva si rileva un abbattimento

delle temperature superficiali di 17°C con il tetto verde a prato Graminaceae e di circa 19°C con la copertura a *Sedum*.

Settembre 2020

Nel mese di settembre 2020 (settimana dal 23 al 29), le temperature superficiali si mantengono più basse sotto il *Sedum*, sia di giorno che di notte, rispetto alla copertura a prato (Figura 44a). Gli andamenti della temperatura ambiente (AT) e della radiazione globale (GR) nella settimana considerata del mese di settembre sono mostrate in Figura 44b.

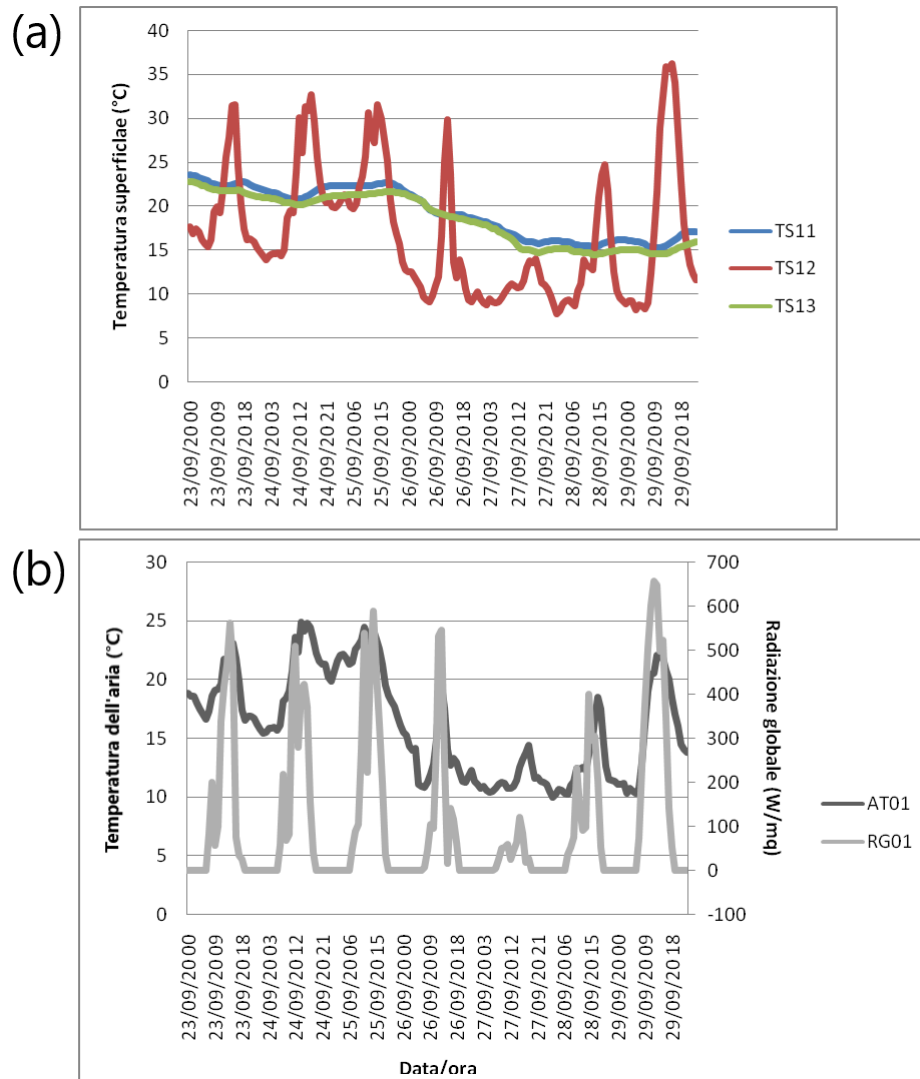


Figura 44. Settembre 2020, settimana dal 23 al 29. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae ; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) media e radiazione globale (GR) media rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale

Ottobre 2020

In ottobre 2020, durante la settimana dal 23 al 29, le differenze di TS si assottigliano sia tra i due diversi tipi di vegetazione (Figura 45a). Gli andamenti della temperatura ambiente (AT) e della radiazione globale (GR) nella settimana considerata è mostrato in Figura 45b.

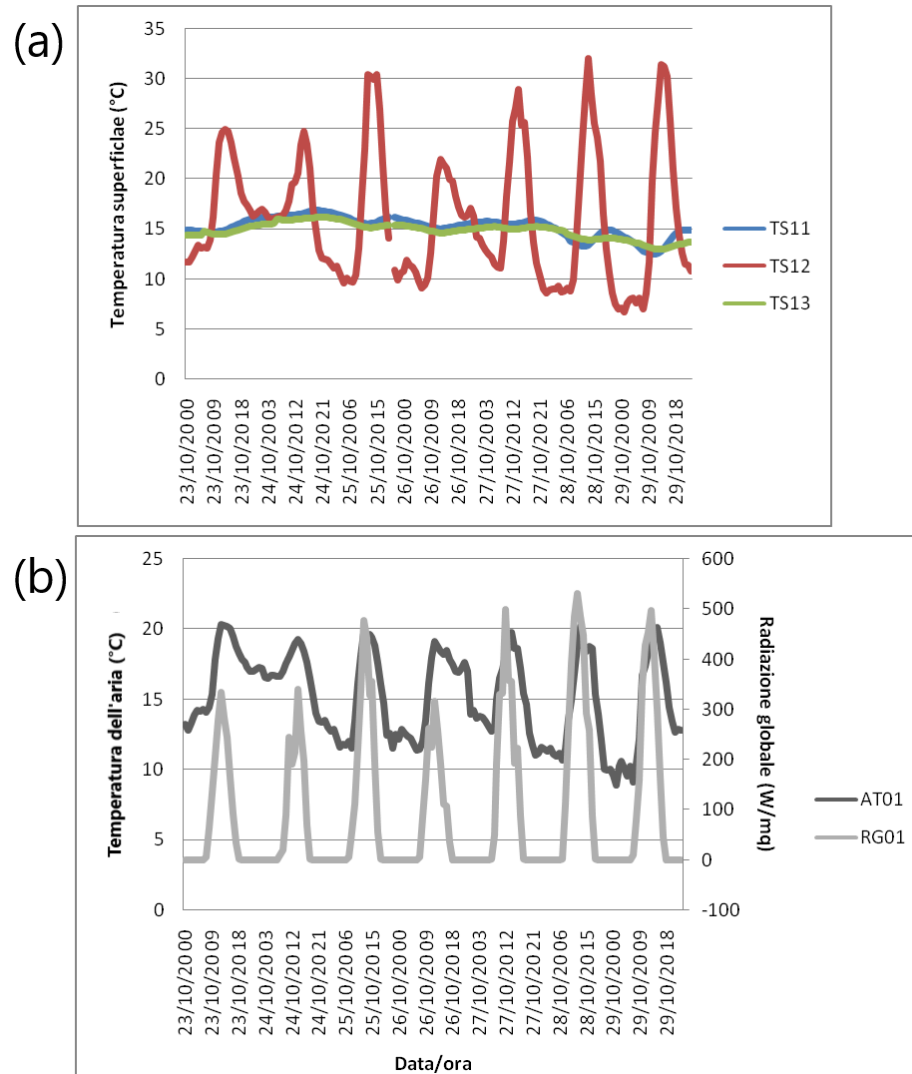


Figura 45. Ottobre 2020, settimana dal 23 al 29. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae ; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) media e radiazione globale (GR) media rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale

Novembre 2020

A novembre 2020, durante la settimana dal 23 al 29, cominciano ad evidenziarsi le differenze di TS sia tra i due diversi tipi di vegetazione (Figura 46a). Gli andamenti della temperatura ambiente (AT) e della radiazione globale (GR) nella settimana sono mostrati in Figura 46b.

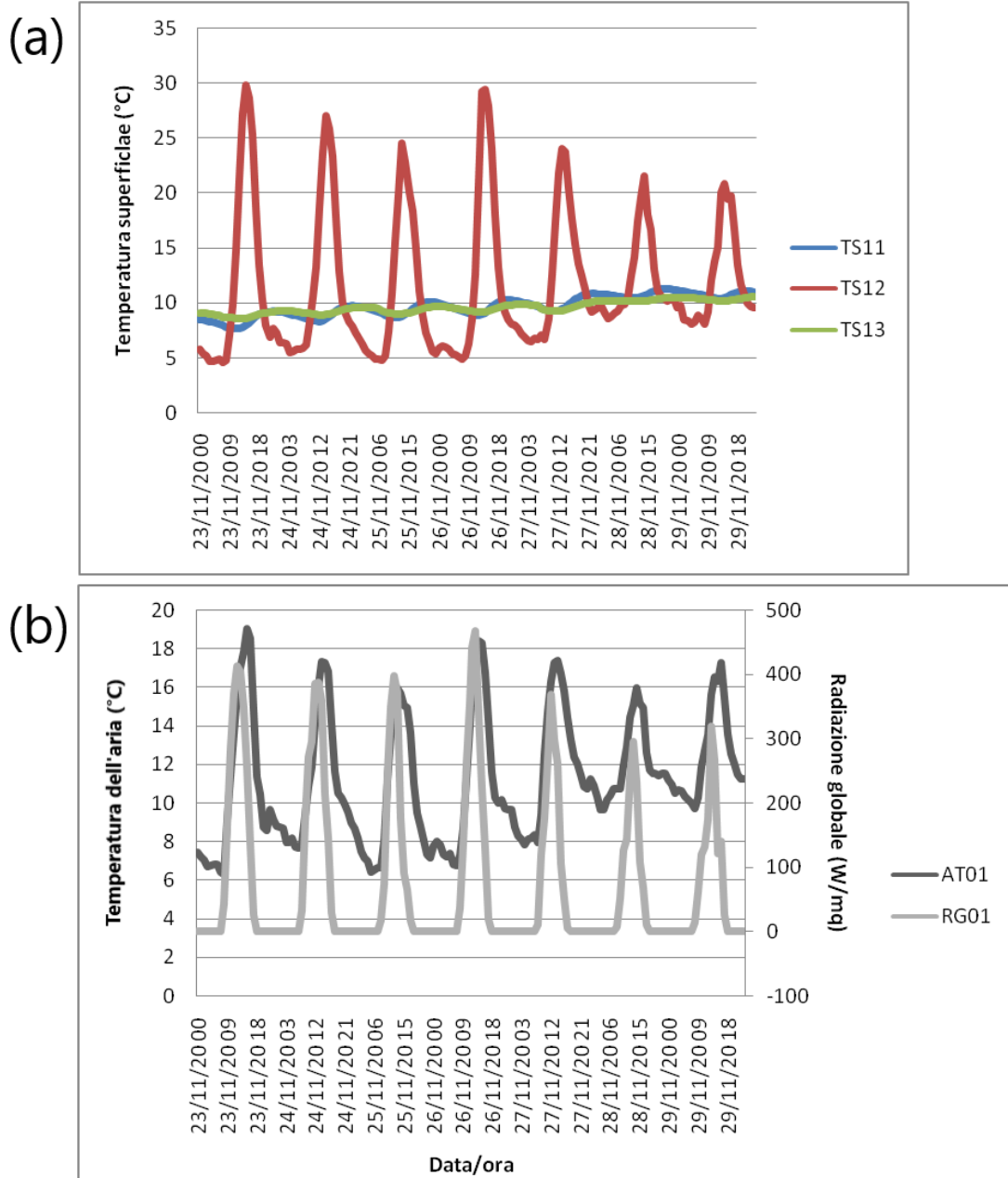


Figura 46. Novembre 2020, settimana dal 23 al 29. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae ; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) media e radiazione globale (GR) media rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale

Dicembre 2020

A dicembre 2020, durante la settimana dal 23 al 29, come osservato in tutti i mesi freddi, non vi sono particolari differenze significative di TS tra i due diversi tipi di vegetazione (Figura 47a). Gli andamenti della temperatura ambiente (AT) e della radiazione globale (GR) sono mostrato in Figura 47b.

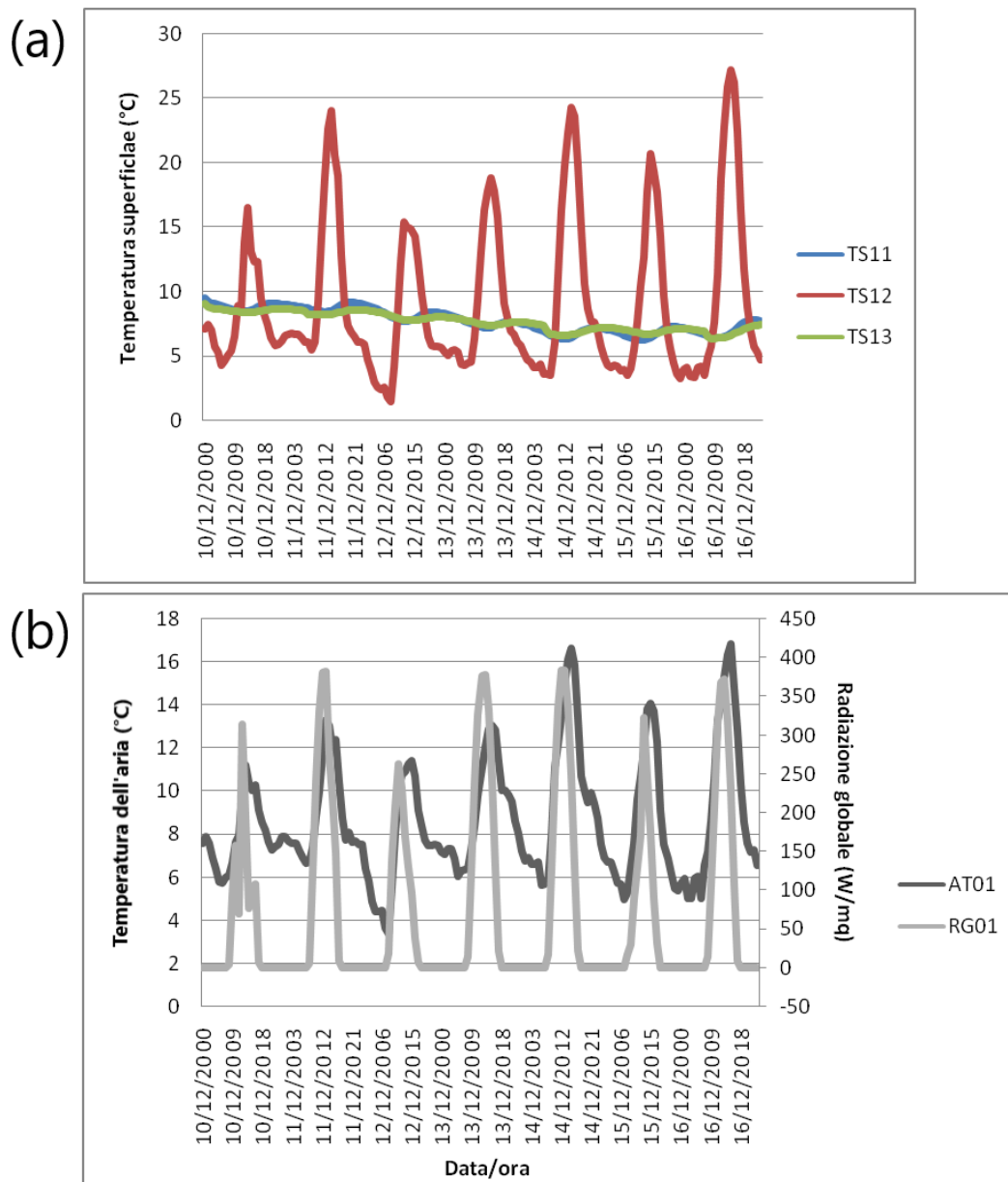


Figura 47. Dicembre 2020, settimana dal 10 al 16. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae ; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto non coperto dalla vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) media e radiazione globale (GR) media rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale

In conclusione, sotto la copertura vegetale di entrambe le tipologie di vegetazione si verifica una riduzione delle temperature rispetto al tetto nudo piuttosto elevato con differenze dai 20 ai 25°C in estate e 10-15°C in inverno. In estate, la differenza di temperature superficiali sotto il manto erboso dovuta alle due diverse coperture vegetali esaminate è di pochi gradi centigradi, con la copertura a *Sedum* che mantiene valori di temperatura superficiale inferiori rispetto al prato di Graminacee. Da questo risultato si deduce che in estate la copertura a

Sedum potrebbe portare un maggiore vantaggio per l'isolamento termico degli edifici, al contrario in inverno la copertura a prato potrebbe essere più indicata. Ne consegue che alcune specie vegetali possono esibire migliori *performance* nell'isolamento termico di un tetto rispetto ad altre, pertanto ulteriori sforzi della ricerca devono essere indirizzati allo studio delle specie vegetali più adatte in base al clima e all'ambiente circostante dell'edificio su cui il tetto verde è installato che consentano anche una maggiore riduzione della temperatura superficiale sotto il manto erboso. In definitiva, i risultati di questa analisi dovranno essere ulteriormente confermati, senza tralasciare che i benefici dovuti alle due diverse tipologie di vegetazione vadano considerati complessivamente in base al microclima ambientale ed alle capacità evapotraspirative delle piante.

3.4 Valutazione della schermatura nei confronti della radiazione solare incidente da parte dello strato verde attraverso la raccolta dei valori di albedo con l'osservazione dei fattori biometrici relativi all'altezza e allo spessore dello strato verde con misure su parcelle test

3.4.1 Sperimentazione albedometro

Lo strumento impiegato nella sperimentazione è l'albedometro LPPYRA11 della DELTAOHM che misura la radiazione globale e la radiazione diffusa riemessa dal terreno, l'albedo di una superficie è ricavabile dal rapporto tra queste due grandezze. Per questo motivo l'albedometro monta due piranometri, uno rivolto verso l'alto che misura la radiazione incidente che raggiunge il terreno mentre il secondo, più basso rivolto verso il terreno che misura la radiazione riflessa. I piranometri montati su LPPYRA11 sono classificabili come *Spectrally Flat Class A (Secondary standard)* secondo la norma ISO 9060:2018 e secondo i criteri della pubblicazione della *World Meteorological Organization (WMO) "Guide to Meteorological Instruments and Methods of observation"* (1983). La sperimentazione è stata condotta sul tetto ENEA a livello del settore coperto da un tappeto di Graminaceae costituito da un mix di *Festuca* e *Poa* (Figura 48).



Figura 48. Tetto verde del green building ENEA (15 dicembre 2020)

L'obiettivo della sperimentazione è di valutare quali parametri ambientali e dello sviluppo del tappeto erboso influiscono sull'albedo con lo scopo di arrivare a definire delle linee guida per la gestione di superfici verdi che ottimizzino l'effetto di mitigazione della vegetazione sul microclima urbano. La relazione tra albedo e temperatura negli ambienti urbani è stata molto studiata [39] [40] ed è noto che il delta di temperatura tra una superficie e l'aria aumenta al diminuire dell'albedo (Figura 49).

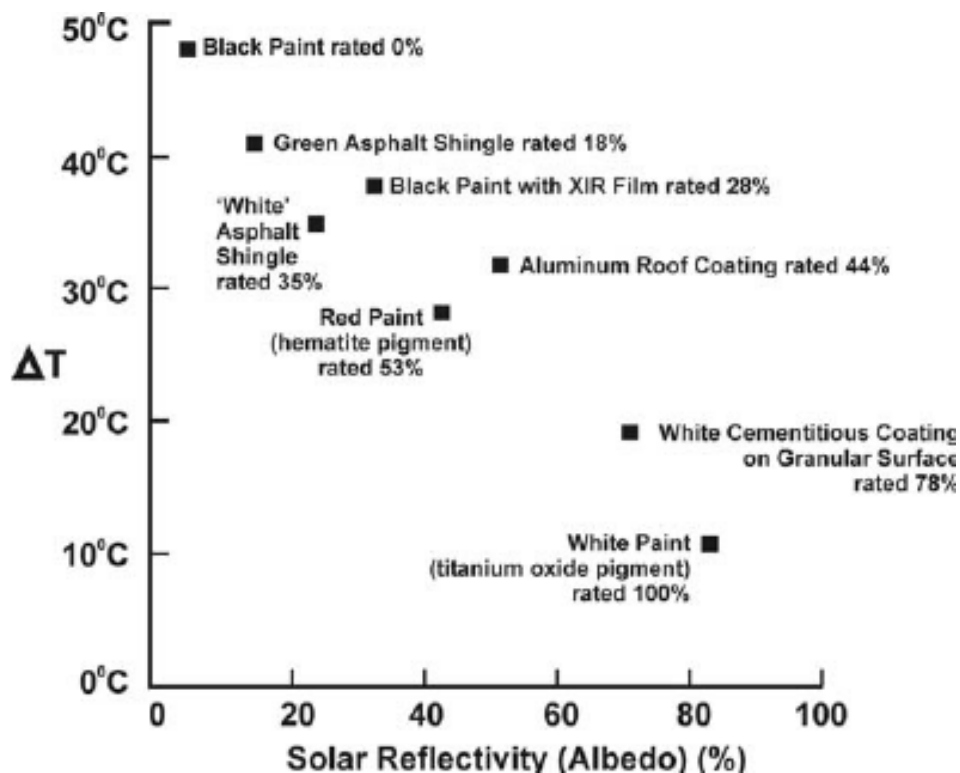


Figura 49. Relazione tra il delta della temperatura di superficie e la temperature dell'aria (ΔT) e l'albedo di diversi rivestimenti per i tetti esposti al sole. (Fonte: Oke et al 1982 [41])

Installazione dell'albedometro

Lo strumento è stato collocato su treppiedi posizionato su un'area omogenea e rappresentativa del cotico erboso, posizionato ad un'altezza di 1,5 metri (Figura 50), rispettando le indicazioni riportate anche nella scheda tecnica:

- Altezza albedometro: 1,50 cm misurati dal piranometro rivolto verso il basso, 157 cm circa da quello rivolto verso l'alto.
- Intervallo di *logging*: i dati registrati ogni 5 minuti riportano la media delle 5 misurazioni effettuate, ovvero una misurazione al minuto.



Figura 50. Area di misurazione e altezza strumento

Il 27 ottobre 2020 dopo il taglio del prato all'altezza (spessore) di 4 cm è iniziata la registrazione dei dati. L'altezza del cotico erboso è stata misurata settimanalmente per la durata della prova in 6 punti di campionamento randomizzati (Figura 51) mediando l'altezza massima di 10 piante per ogni punto di campionamento.



Figura 51. Tetto verde, 24 novembre. In giallo sono visibili alcuni siti di misurazione del cotico erboso.

Irrigazione

L'irrigazione sul tetto è in genere stabilita in modo da permettere condizioni idriche ottimali del substrato e gestita anche in base all'andamento pluviometrico. Per questa specifica sperimentazione, in particolare, dal 27 ottobre al 15 novembre è stato programmato un solo intervento irriguo alle 6 di mattina con la durata di 15 minuti, successivamente per le numerose giornate soleggiate previste gli interventi irrigui sono stati portati a 4 sempre da 15 minuti ciascuno.

3.4.2 Andamento dei valori di albedo in relazione ai fattori biometrici di altezza dello strato verde

Nel grafico sotto le barre verdi riportano l'altezza misurata settimanalmente del cotico erboso (equivalente allo spessore del prato), mentre la linea gialla mostra l'andamento dell'albedo durante il periodo del test (Figura 52). Per ciascuna data è riportata la media dei valori di albedo della settimana precedente.

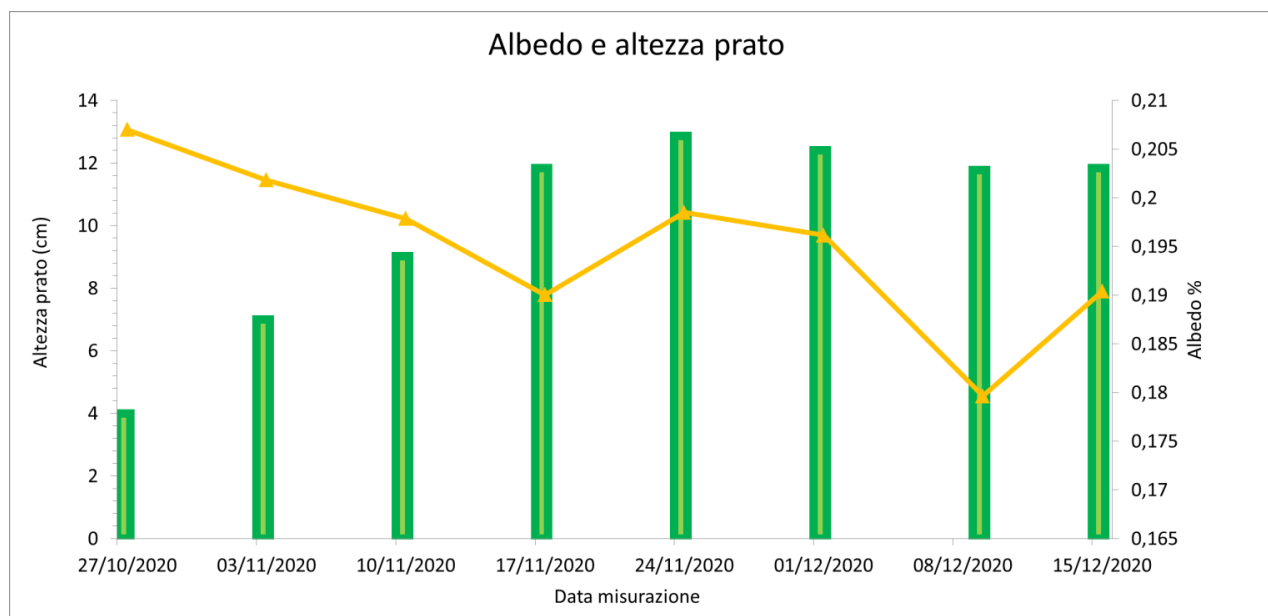


Figura 52. Crescita del prato registrata ogni sette giorni dal 27 ottobre fino al 15 dicembre. In giallo l'andamento dei valori dell'albedo, ogni punto corrisponde alla media settimanale dei valori di albedo registrati durante le ore di luce

La crescita del prato risulta costante dal 27 ottobre, giorno del taglio, fino al 24 novembre quando inizia a rallentare. Nelle settimane successive, anche grazie al calo termico, l'altezza si può considerare invariata; infatti, le diminuzioni dovute all'ingiallimento delle punte delle foglie più sviluppate (che erano evidentemente anche le più lunghe e vecchie) da cui la pianta riassorbe elementi nutritivi compensano lo stentato ulteriore allungamento di altri steli. L'albedo mostra un'interessante relazione inversamente proporzionale con la crescita del prato fino al 17 novembre, in seguito i valori di albedo risalgono il 24 novembre per poi calare nuovamente riducendosi notevolmente. Le stime di albedo ottenute dal rapporto tra radiazione incidente e radiazione riflessa si approssimano a quelli riportati in bibliografia [42].

3.4.3 Andamento dei valori di albedo in relazione alla radiazione globale

I valori dell'albedo sono influenzati dalla radiazione solare [43], pertanto i valori di albedo misurati sul prato del tetto sono stati confrontati con i valori di radiazione globale (GR01) raccolti dal piranometro nella stazione meteorologica del tetto (Figura 53).

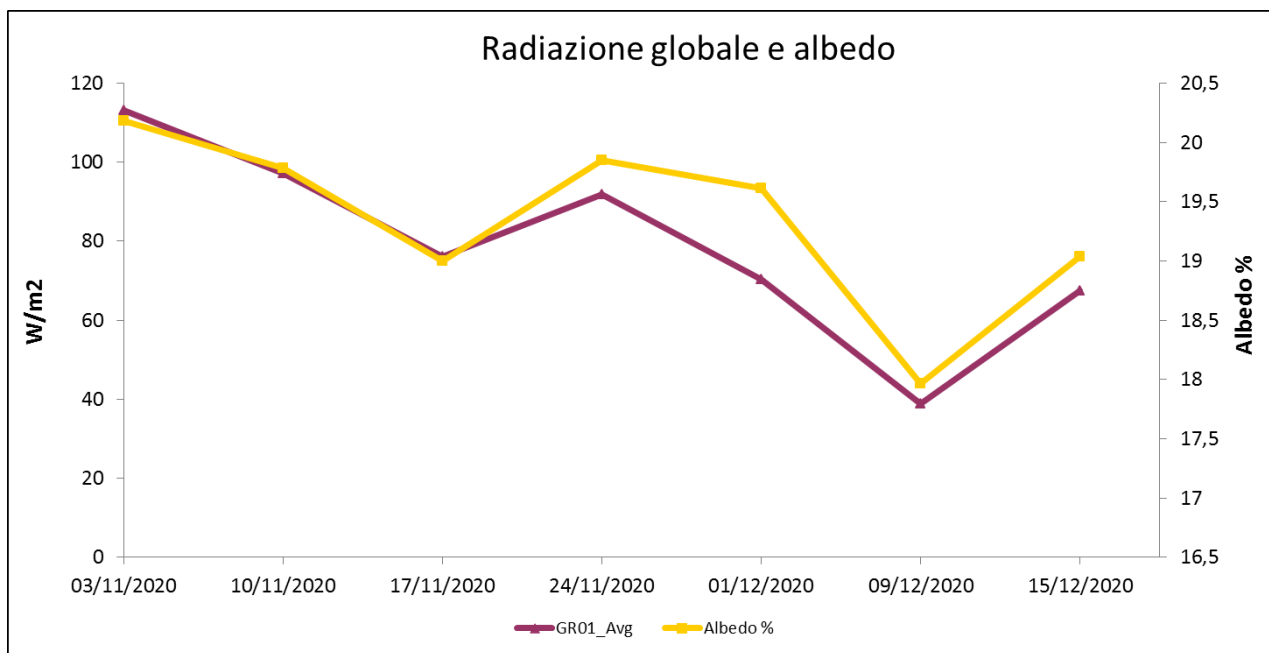


Figura 53. Andamenti della radiazione globale (GR01_Avg) e dell'albedo. Ogni punto rappresenta le medie settimanali

Il grafico mostra che gli andamenti di radiazione globale (GR01_Avg) e albedo praticamente coincidono, tuttavia si può evidenziare come dal 10 novembre al 1° dicembre l'albedo non segua pedissequamente la radiazione globale. Ovviamente si prevede di allungare i tempi della sperimentazione, ma i possibili motivi alla base di questa differenza, probabilmente legati ad altri fattori climatico-ambientali, dovranno essere approfonditi. E' interessante sottolineare che il cotico erboso nel periodo di studio rallenta la sua crescita proprio a partire dal 17 novembre (Figura 53).

E' stata effettuata anche un'analisi durante le diverse ore del giorno ed i risultati sono riportati nel grafico in Figura 54 che mostra l'andamento giornaliero della radiazione incidente, della radiazione riflessa e dell'albedo. Si può vedere come l'albedo del prato abbia oscillazioni nelle ore centrali della giornata dovute alle variazioni della radiazione incidente. Nei calcoli dell'albedo medio settimanale sono state escluse le code perché presentavano *outlayer* dovuti alla bassa intensità di radiazione solare nelle prime ore dell'alba e al tramonto.

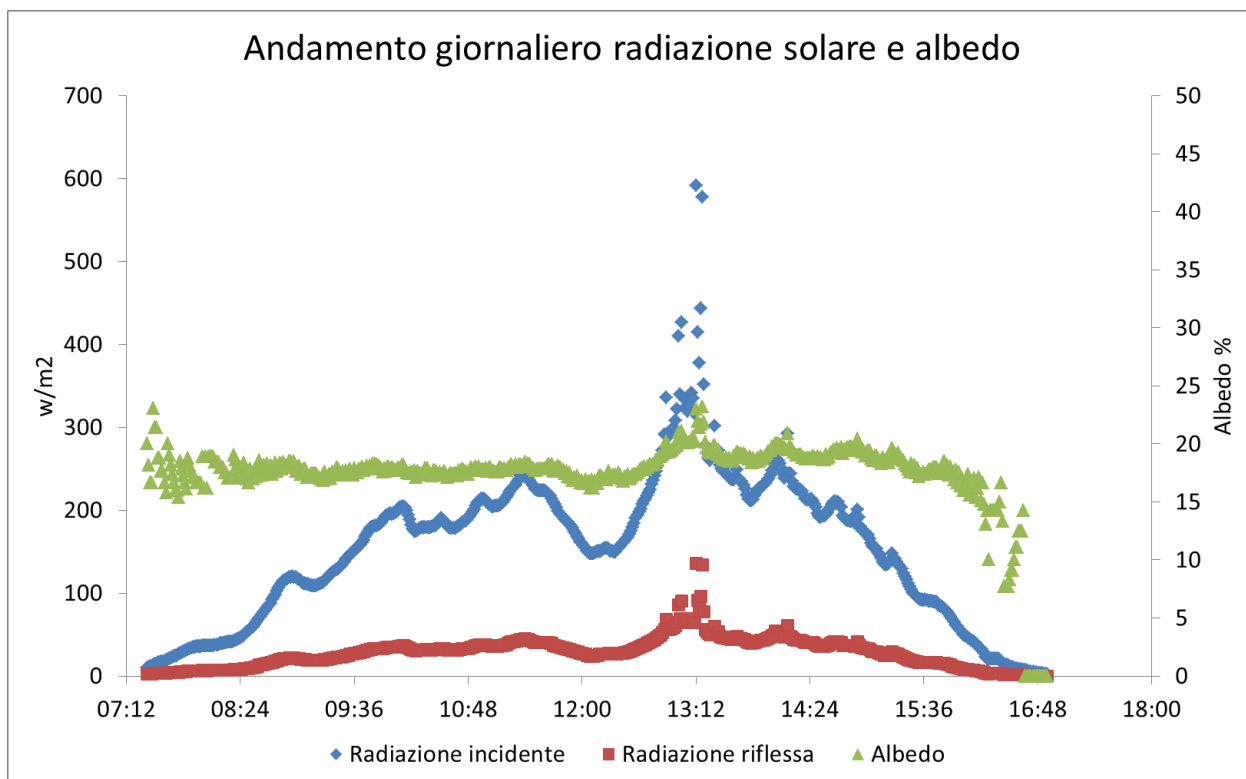


Figura 54. Andamento giornaliero di albedo e radiazioni incidente e riflessa, viene riportato a titolo esemplificativo la giornata del 5 novembre 2020

3.4.3 Andamento dei valori di albedo in relazione alla temperatura dell'aria e alla temperatura fogliare

Il grafico in Figura 55 mostra come la temperatura fogliare sia inferiore a quella dell'aria. E' interessante notare come l'albedo delle Graminacee, pur essendo principalmente dipendente dalla radiazione globale come visto precedentemente, potrebbe influenzare la temperatura fogliare. Infatti, i cali dell'albedo coincidono con un minore raffreddamento delle foglie rispetto alla temperatura dell'aria, come si può notare dalla pendenza delle curve degli andamenti, ad esempio durante la settimana che va dal 24 novembre al 1° dicembre dove vediamo che al calare dell'albedo la diminuzione della temperatura fogliare è minore di quella dell'aria.

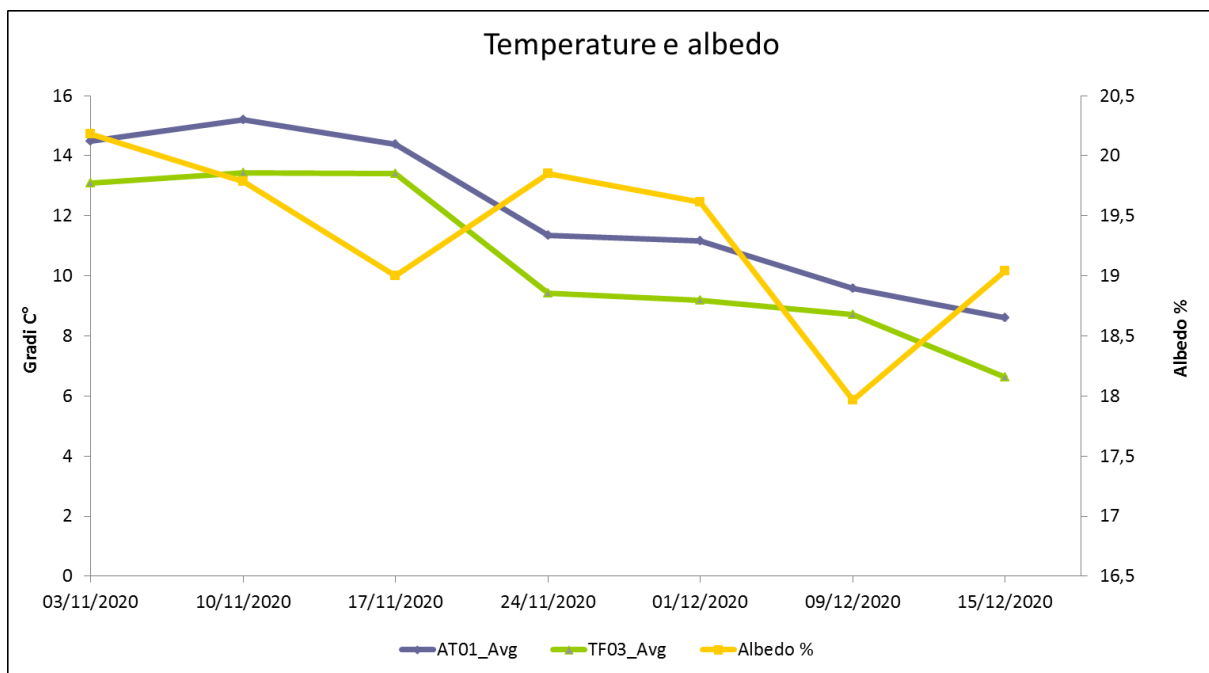


Figura 55. Andamenti delle temperature dell'aria (AT01_Avg) e della temperatura fogliare (TF03_Avg) del manto erboso a confronto sull'asse secondario con l'albedo del tetto verde

Certamente lo studio delle relazioni tra crescita, altezza del prato e albedo dovrà essere ripetuto in primavera ed estate (2021) per osservare le possibili variazioni presenti in momenti stagionali differenti con temperature e ore di luce che potranno favorire le attività fisiologiche del cotico erboso e l'interazione con il microclima del tetto verde.

Raccogliendo dati fisiologici sulle specie vegetali oggetto di studio si potranno individuare relazioni tra lo stato vegetativo e i valori dell'albedo.

In aggiunta, la sperimentazione sull'albedo proseguirà valutando differenti specie vegetali autoctone appartenenti a generi adattati a condizioni siccitose (xerofite), tra cui anche i *Sedum* presenti sul tetto verde sperimentale, ed altre coperture vegetali.

3.2 Flussi energetici del sistema tetto verde dell'edificio

Nel 2013, la Commissione europea ha pubblicato la sua "Strategia per le infrastrutture verdi, Capitale naturale dell'Europa", seguita da un'agenda politica di ricerca e innovazione per la realizzazione di soluzioni naturali e di "rinaturazione" delle aree urbane come le infrastrutture verdi (tetti e pareti verdi, giardini pluviali, parchi con alberi da strada). Le tecnologie energetiche naturali, soprattutto tetti e pareti verdi, migliorano l'isolamento termico degli edifici e l'efficienza energetica dei sistemi di condizionamento, apportano benefici microclimatici basati sulle proprietà biologiche delle piante. Di seguito, si riportano le più importanti proprietà dei sistemi vegetali sugli edifici.

Evapotraspirazione (consumo di calore latente): è un sistema di raffreddamento naturale tipico dei tetti e delle pareti verdi. L'acqua evapora e il cambiamento di fase, o evaporazione, dall'acqua liquida a vapore acqueo, provoca il consumo di calore latente che riduce la temperatura circostante. Si verifica quando l'acqua viene spostata dal terreno di coltura attraverso la pianta e quindi rilasciata sotto forma di vapore attraverso gli stomi delle foglie.

Riflessività (albedo): i tetti verdi tendono ad avere un'albedo (o riflettività della radiazione solare) più elevata

rispetto ai tetti convenzionali e quindi assorbono meno “calore” solare. Le piante di *Sedum* diventano addirittura più riflettenti sotto “stress” da calore. Poiché la maggior parte dei tetti sono scuri e con un'albedo ridotta (riflettono pochissima energia solare) si riscaldano rapidamente. I tetti cosiddetti “freddi” (tra i quali le superfici bianche e i tetti verdi) aiutano a ridurre l'effetto “isola di calore urbana” perché presentano un'albedo più alta e assorbono meno energia solare. Questo fenomeno, durante la notte, consente di irradiare meno radiazione termica negli ambienti delle città.

Massa termica: gli strati di un tetto verde o di un sistema di pareti verdi contribuiscono ad aumentare la massa termica di un tetto o di una parete tradizionale favorendo l'assorbimento del calore durante il giorno e il suo lento rilascio nel corso della notte. L'aumento del contenuto di acqua contribuisce in modo significativo alla massa termica.

Schermatura verde: la massa fogliare ombreggia le pareti e i terrazzi degli edifici e in questo modo riducono il trasferimento e l'assorbimento di calore nell'edificio. Quando la radiazione solare riscalda eccessivamente le piante, queste cominciano a traspirare acqua (vapore acqueo) per mantenere una temperatura fogliare non superiore ai 20 °C. Inoltre, con la fotosintesi, le piante assorbono CO₂ e producono ossigeno e, come per il processo di evapotraspirazione, estraggono l'energia necessaria per il processo fotosintetico dall'ambiente raffreddandola. Con i processi biologici della evapotraspirazione e della fotosintesi, le piante introducono acqua (sotto forma di vapore acqueo) nell'aria, aumentandone l'umidità che provoca una riduzione della temperatura e aumenta il comfort degli ambienti urbani. Mediamente per percepire l'effetto della evapotraspirazione occorrono superfici inverate pari ad almeno 2.000 m².

Inverdimento per i sistemi di condizionamento: i condizionatori d'aria aspirano l'aria esterna con un ciclo di refrigerazione per assorbire e rimuovere il calore da quest'aria e scaricando il calore all'esterno. Pertanto, la temperatura dell'aria in ingresso è un fattore importante per l'efficienza della climatizzazione. La riduzione della temperatura dell'aria dell'ambiente intorno alle prese d'aria e alle unità del condizionatore può migliorare l'efficienza del condizionatore d'aria. Una temperatura esterna più elevata favorisce un assorbimento maggiore di potenza elettrica (W) con una diminuzione della resa frigorifera. Le coperture verdi sulle facciate esterne degli edifici consentono la schermatura della radiazione solare e l'emissione di vapore acqueo (traspirazione), favorendo una diminuzione della temperatura dell'aria che circonda la macchina esterna del sistema di condizionamento (condensatore) che favorisce una maggiore efficienza del sistema di condizionamento e, conseguentemente, una riduzione del consumo di elettricità per il condizionamento dell'aria esterna. Un aumento di 1°C della temperatura dell'aria equivale a un aumento di circa il 4 per cento di consumo di elettricità per il condizionamento estivo. Una notevole percentuale del carico termico istantaneo viene assorbito dalla vegetazione mentre la restante parte viene accumulata nelle strutture; solo la quantità di calore trasmessa dall'aria per convezione diviene un carico effettivo per l'impianto di condizionamento. La schermatura vegetale interviene su due fattori che caratterizzano l'andamento delle temperature e, di conseguenza, l'andamento del flusso termico. Tenuto conto della natura ondosa che caratterizza la temperatura, la schermatura vegetale ne riduce l'ampiezza e ne varia la fase. Questi due effetti si traducono in una riduzione dei picchi di temperatura raggiunti sulle superfici esposte e, pertanto, di flusso termico che investe la parete e in un ritardo temporale che “sposta” il picco massimo di temperatura superficiale esterna delle pareti dell'edificio. In definitiva, si riduce fortemente il flusso termico che penetra all'interno dell'edificio. Il fenomeno dello sfasamento è molto importante rispetto al consumo elettrico degli impianti di condizionamento nelle aree geografiche dove la richiesta di energia elettrica cade tra la tarda mattinata e le prime ore del pomeriggio: uno sfasamento di tre ore, per esempio, sposta il picco di temperatura dell'aria su temperature dell'aria meno elevate, con vantaggi sia economici e sia ambientali. Infatti, il climatizzatore sarà attivato durante le ore meno calde e pertanto il condensatore (macchina esterna) lavorerà a temperature favorevoli allo scambio termico. A riprova del fatto che

la vegetazione contribuisce a migliorare le prestazioni energetiche degli edifici è opportuno sottolineare che gli standard di certificazione dell'efficienza e del risparmio energetico, quali LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) e BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), hanno da tempo incluso le soluzioni vegetali naturali nei sistemi di punteggio per la qualità energetica degli edifici.

ANALISI DATI

Dai dati raccolti nei mesi di maggio, giugno, luglio ed agosto 2020, è stato possibile valutare il “taglio di flusso termico” che la coltre vegetale esercita sia quando questa viene posta sul tetto e sia quando realizzata come “parete verde” prospiciente la parete del fabbricato (§2.5). L'analisi è stata svolta fissando a 26 °C la temperatura interna l'edificio, così come dettato dalla UNI/TS 11300-1 e tenendo conto delle temperature rilevate rispettivamente per il tetto e per la parete in relazione ai seguenti dati di ingresso:

Temperatura parete non protetta [T]:	°C
Temperatura parete protetta [T]:	°C
Temperatura tetto non protetto [T]:	°C
Temperatura tetto protetto [T]:	°C
Temperatura interna [T]:	26 °C (299,15 K)
Trasmittanza tetto non protetto [τ]:	0,35 W/m ² K
Trasmittanza tetto protetto [τ]:	0,20 W/m ² K
Trasmittanza parete [τ]:	0,80 W/m ² K
Area di riferimento [S]:	1 m ²
L'intervallo temporale [t] tra due misure consecutive è di:	1 h

Il calcolo del flusso termico è espresso dalla relazione: $Q = \tau \cdot S \cdot \Delta T \cdot t$ [W · h] (A)

In accordo con la (A) sono stati stimati i flussi energetici che caratterizzano il tetto verde (verde) rispetto all'area di tetto privo di vegetazione (no-verde). La stima è stata riferita ad una temperatura di “comfort” degli ambienti interni fissata a 26 °C (non si è tenuto conto della inerzia termica del solaio). Di seguito si riporta la stratigrafia del tetto, secondo la norma ISO 6946, (Tabella 13) e l'andamento dei flussi energetici per i mesi da maggio ad agosto (Figura 56). La stratigrafia riporta la trasmittanza termica migliorata dall'effetto relativo al sistema substrato sul quale si trova inserita la vegetazione. Sono riportate le stime dei valori relativi ai flussi termici (Figura 57). Infine, si riporta la stima dei consumi dell'energia elettrica per il condizionamento degli ambienti sottostanti il tetto (Tabella 14).

Tabella 13. Stratigrafia del tetto

STRATIGRAFIA					
	DESCRIZIONE	SPESSORE	CONDUTTIVITA' [λ]	RESISTENZA TERMICA [R]	TRASMITTANZA TERMICA [t]
		(m)	W/mK	m^2K/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 STRUTTURA [Rstruttura]				
TRASMITTANZA TERMICA STRUTTURA [Ustruttura]					0,35
	Substrato **	0,100	0,280	0,357	
	Strato drenante	0,058	0,033	1,758	
RESISTENZA TERMICA GREEN [Rgreen]				2,115	
TRASMITTANZA TERMICA GREEN [Ugreen]					0,47
RESISTENZA TERMICA TOTALE [Rtotale]				4,938	0,20
TRASMITTANZA TERMICA TOTALE [Utotale]					

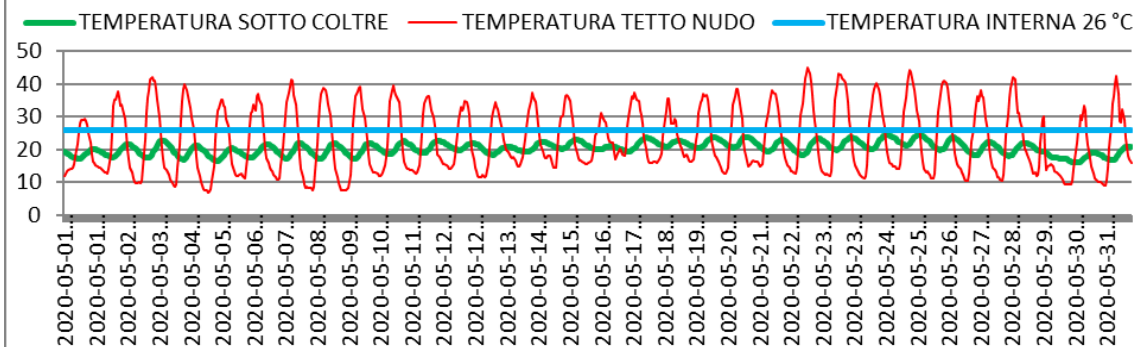
* Pignatta - UNI 10355

PERCENTUALE di
guadagno

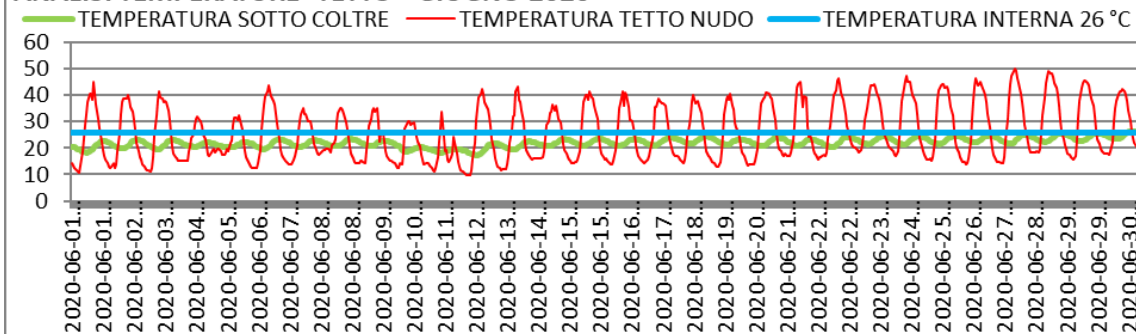
42,82%

** Sistema estensivo con spessore medio del substrato pari a 10 cm

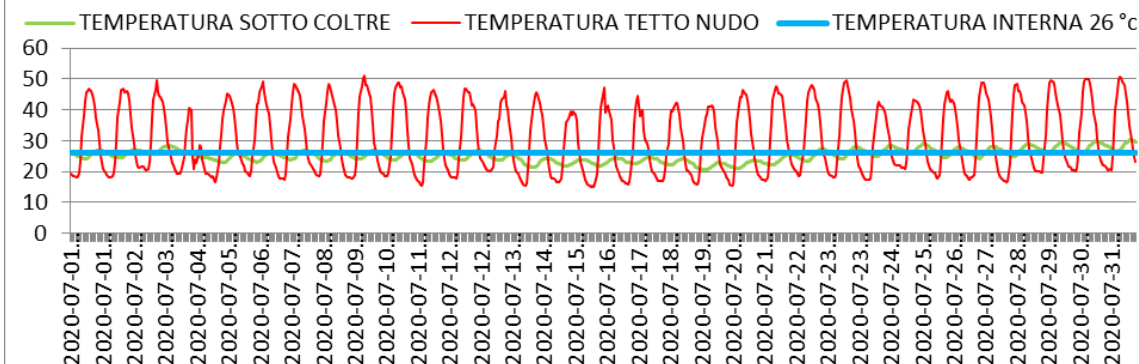
ANALISI TEMPERATURE TETTO - MAGGIO 2020



ANALISI TEMPERATURE TETTO - GIUGNO 2020



ANALISI TEMPERATURE TETTO - LUGLIO 2020



ANALISI TEMPERATURE TETTO - AGOSTO 2020

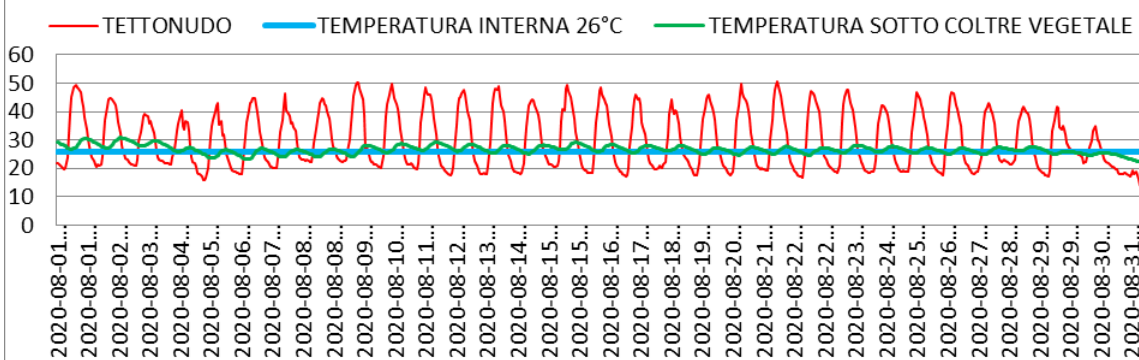


Figura 56. Analisi delle temperature del tetto sull'edificio prototipo

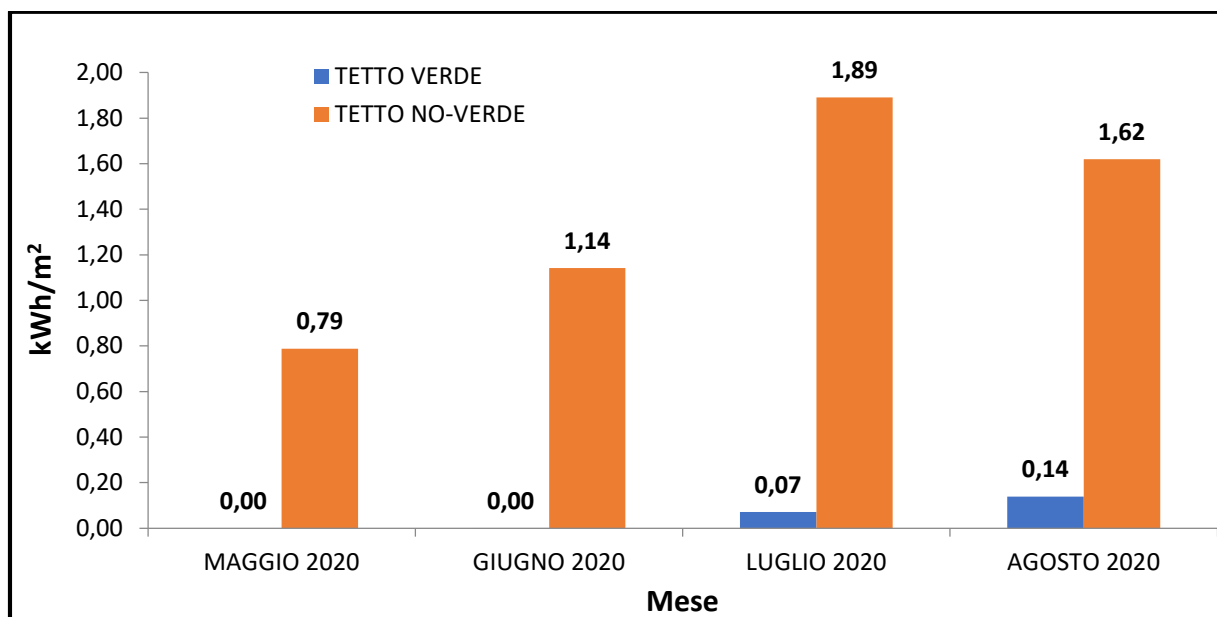


Figura 57. Flusso termico tetto

Tabella 14. Valori del flusso termico entrante nell'ambiente sottostante il tetto verde e del risparmio di energia elettrica per il condizionamento interno

Temperatura interna dell'edificio	26 °C
Riduzione flusso termico entrante nell'ambiente sottostante	5,23 kWh _t /m ²
Riduzione energia elettrica per il condizionamento (EER = 3,7)	1,41 kWh _{el} /m ²

4 Serra bioclimatica

4.1 Allestimento del sistema “verde” all'interno della serra bioclimatica

A valle degli studi effettuati nel 2019 sull'evapotraspirazione (ET) delle specie vegetali (Report RDS 2019 riferito alla prima annualità di questa ricerca, LA2.1) nel mese di luglio 2020 si è proceduto ad inserire, all'interno della serra bioclimatica presente nell'edificio F92 dell'area Capanna del CR Casaccia, un “allestimento vegetale” con lo scopo di sperimentare l'effetto dei processi evapotraspirativi delle piante sul raffrescamento dello spazio abitato durante il periodo estivo. L'attenzione è ricaduta su specie orticole in quanto anche in Italia l'agricoltura urbana/domestica è ormai una realtà consolidata che rappresenta un'opportunità per le famiglie di consumare cibi sani, freschi e a km zero. L'agricoltura urbana/domestica nel 2020 ha subito una impennata per effetto del periodo emergenziale, in particolar modo durante il *lockdown* primaverile i cittadini trovandosi a vivere confinati nella propria residenza hanno potuto dedicare più tempo ad attività manuali, come il giardinaggio che, secondo Coldiretti, soddisfa il sogno di 6 italiani su 10 (62%).

La scelta delle specie da introdurre nella serra bioclimatica è ricaduta su colture che, da dati di letteratura, hanno un elevato potenziale evapotraspirativo permettendo di svolgere al meglio la funzione termoregolatrice nella serra e tra queste, per la sperimentazione, sono state scelte tre colture orticole (lattuga, sedano e pomodoro) e la vite (Figura 58).



Figura 58. Specie vegetali scelte per la sperimentazione posizionate all'interno della serra bioclimatica

La serra bioclimatica è stata dotata di un impianto di irrigazione costituito da tubi, gocciolatori e raccordi (Figura 59a). L'impianto è collegato ad un rubinetto appositamente installato e posizionato al disotto del lavandino. L'impianto è gestito da un programmatore d'irrigazione che tramite apposite elettrovalvole è in grado di controllare fino a sei stazioni indipendenti. Il programmatore permette per ciascuna stazione di personalizzare i tempi e gli orari di irrigazione in modalità da remoto mediante l'applicazione MySOLEM web o cellulare (Figura 59b), il sistema collegandosi alle previsioni meteo locali può adattare la propria programmazione in base alle variazioni meteorologiche.

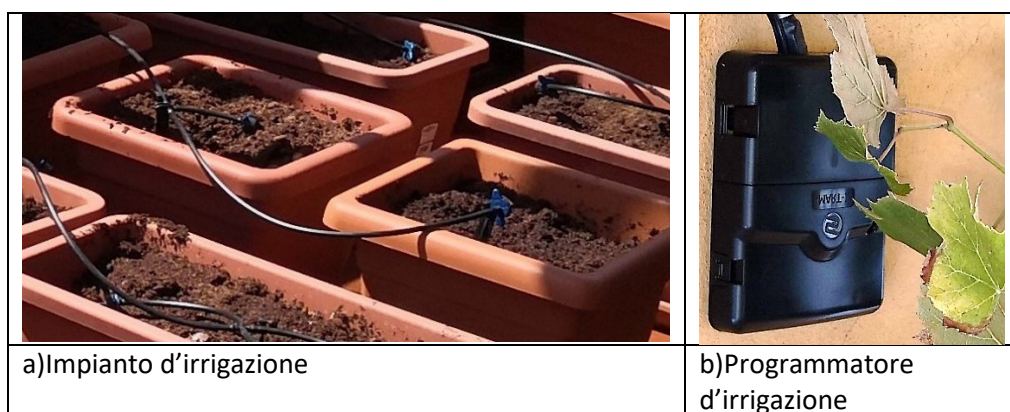


Figura 59. Impianto di irrigazione (a) e programmatore (b) inseriti all'interno della serra bioclimatica

La serra bioclimatica è stata inoltre dotata di bilance a celle di carico per la misura della quantità di acqua evapotraspirata (Figura 60). Le bilance a celle di carico sono provviste di un software che consente di rilevare in continuo il cambiamento di peso della coltura durante le 24 ore. La variazione di peso è stata calcolata in relazione al consumo idrico e alla capacità evapotraspirativa del sistema pianta+vaso.

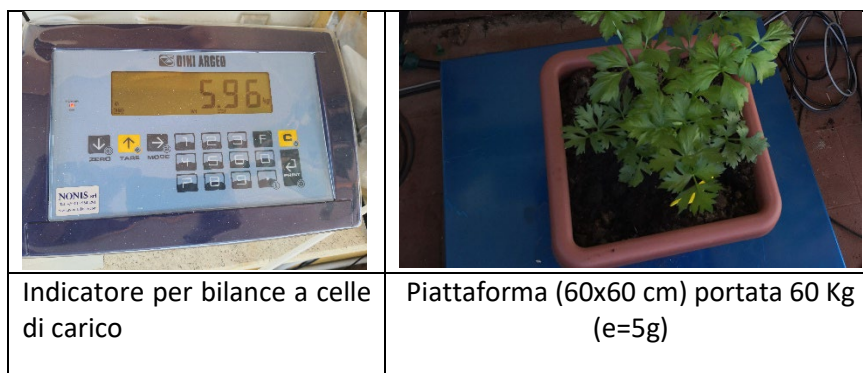


Figura 60. Elementi della bilancia a celle di carico durante la sperimentazione

Protocollo sperimentale

Ai fini della sperimentazione, all'interno della serra le piante sono state fatte crescere in vasi posizionati a terra; per ciascuna specie sono state previste diverse repliche biologiche, in particolare sono state allestite: 3 repliche per la pianta di vite, 6 repliche per la pianta di pomodoro, 9 repliche per la pianta di sedano e 12 repliche per la pianta di lattuga. Ciascuna replica è stata identificata con apposita targhetta. L'allestimento dei vasi e delle specie vegetali in serra è schematizzato in Figura 61.

Disposizione delle piante nella serra bioclimatica

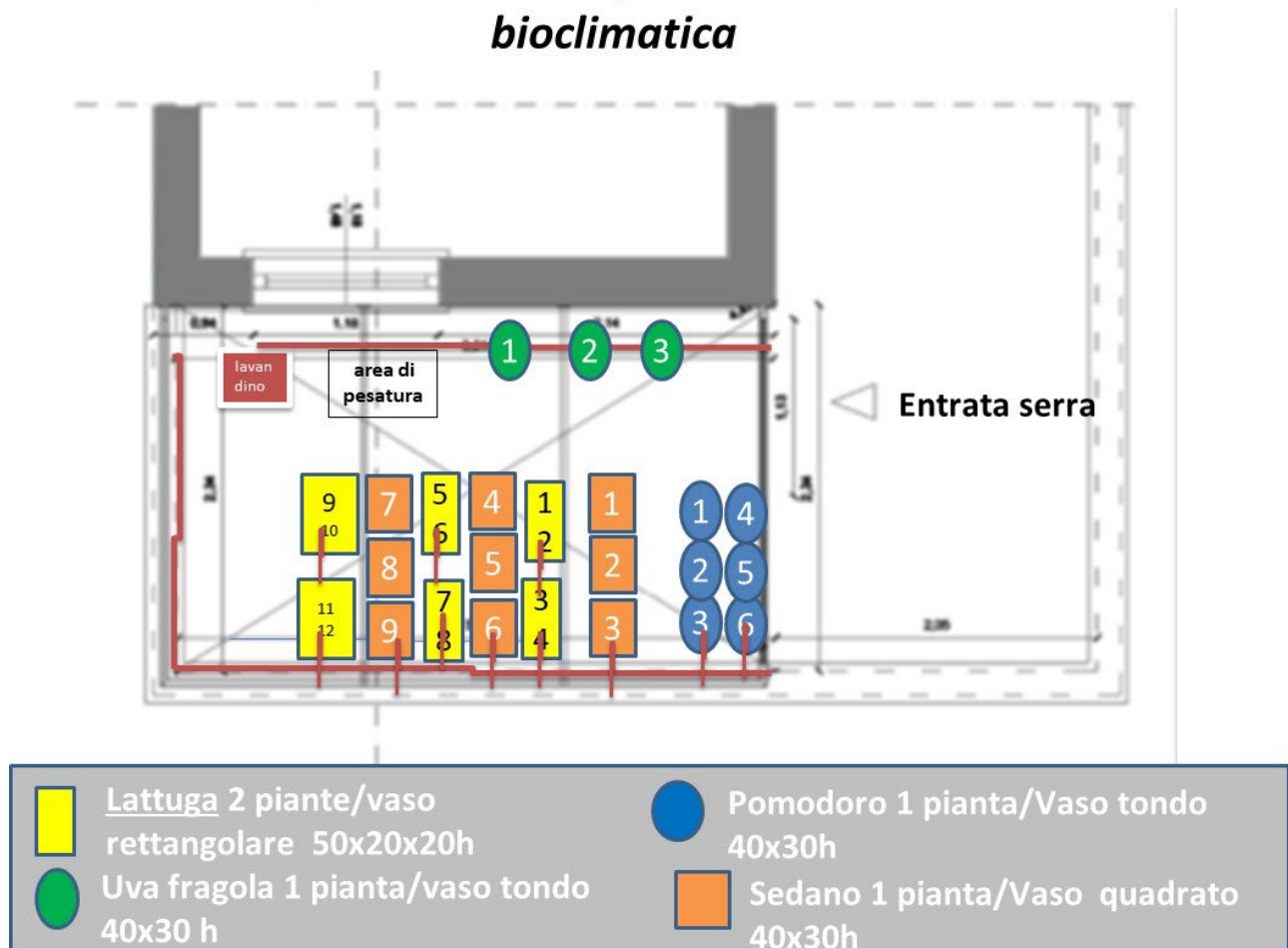


Figura 61. Allestimento del “sistema verde” in serra bioclimatica

La linea rossa disegnata nella Figura 61 rappresenta l’impianto di irrigazione che ai fini della sperimentazione è stato ripartito in due settori indipendenti, uno per le piante di vite e l’altro per quelle orticole, gestiti ciascuno da una elettrovalvola.

La misura della quantità di acqua evapotraspirata è stata effettuata dalle ore 11:00 alle ore 16:00 nel periodo compreso tra il 29 luglio ed il 25 settembre. Nella Figura 62 sono riportati degli scatti fotografici della serra bioclimatica con sistema verde in diversi momenti di crescita.



Figura 62. Serra bioclimatica con sistema verde fotografata in diversi momenti di crescita

4.2 Misura della evapotraspirazione (ET) delle piante

L'evapotraspirazione (ET) è definita come il quantitativo d'acqua realmente persa nell'unità di tempo per evaporazione e traspirazione da una coltura. La quantità di acqua persa per evapotraspirazione dipende dall'evapotraspirazione potenziale di riferimento (ET_0) e dal coefficiente colturale K_c ($ET_c = ET_0 \times K_c$) [44]. Differenti specie di piante hanno differenti capacità evapotraspirative che determinano specifici coefficienti colturali (K_c). Il coefficiente di coltura K_c varia durante il periodo di crescita della pianta quindi avremo valori differenti in relazione allo stadio di sviluppo della pianta: coefficiente per la fase iniziale ($K_{c,i}$), per la fase intermedia ($K_{c,int}$) e per la fase finale di crescita ($K_{c,f}$) (Tabella 15).

Tabella 15. Coefficienti colturali (K_c) nella fase iniziale (i), nella fase intermedia (int) e nella fase finale (f) del ciclo biologico di ciascuna coltura vegetale

Coltura vegetale	$K_{c,i}$	$K_{c,int}$	$K_{c,f}$
Verdure piccole (lattuga, broccoli, cavoli, carote, sedano, aglio, spinaci, ravanella, ecc.)	0,7	1,05	0,95
Famiglia delle Solanacee (melanzane, peperoni, pomodori, ecc.)	0,6	1,15	0,80
Uva			
- da tavolo o uva passa	0,30	0,85	0,45
- da vino	0,30	0,70	0,45

(Fonte: FAO, <http://www.fao.org>)

La rilevazione della variazione dei pesi in relazione alla capacità evapotraspirativa della specie vegetale è iniziata dopo che il sistema 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). La capacità di campo 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, riportati in Tabella 17, 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.

Tabella 16. Acqua mediamente evapotraspirata dal sistema (pianta+vaso) durante 5 ore nelle giornate indicate

Quantità di acqua ET (kg)									
	29/07	05/08	19/08	24/08	28/08	02/09	04/09	11/09	25/09
Sedano	0,11	0,13	0,21	0,21	0,29	0,13	0,16	0,1	-
Lattuga	0,16	0,12	0,33	0,27	0,20	0,16	0,14	0,07	-
Pomodoro	0,46	0,53	0,29	0,39	0,39	0,31	0,39	0,23	0,09
Vite	0,47	0,37	0,34	0,54	0,37	0,45	0,57	0,35	0,26

La perdita massima di acqua nelle condizioni sperimentali è stata di:

- 0.29 Kg per il sistema vaso + pianta di sedano;
- 0.27 kg per il sistema vaso + pianta di lattuga;
- 0.39 kg per il sistema vaso + pianta di pomodoro;
- 0.57 kg per il sistema vaso + pianta di vite.

Per le specie orticole sedano e lattuga l'inizio e la fine dell'esperimento hanno coinciso con la fase iniziale e finale del proprio ciclo di sviluppo in cui i valori di K_c sono più bassi della rispettiva fase intermedia (Tabella 15); di conseguenza l'effetto evapotraspirativo in questa fase è minore in linea con i risultati che evidenziano minori quantitativi di acqua evapotraspirata misurati durante i primi di stima. Diversamente, per le piante di pomodoro e di vite che presentano cicli di sviluppo più lenti, per le necessità del progetto, la sperimentazione è iniziata con le piante in una fase di sviluppo più avanzata che si è dimostrata caratterizzata già da una buona capacità evapotraspirativa; queste piante sono anche quelle che hanno mantenuto i livelli più alti di ET per tutto il periodo di monitoraggio.

In Tabella 17 sono riportate invece le quantità di acqua totale evapotraspirata in serra bioclimatica da ciascuna specie, tenendo in considerazione il numero dei vasi per ciascuna specie vegetale come indicati nella Figura 61, e dal “sistema verde” nel complesso inteso come l’insieme di tutte le piante all’interno dello spazio serra. La maggior ET si è verificata il 24 agosto ed è pari a 7.4 Kg di acqua evapotraspirata nel corso delle 5 ore di osservazione.

Tabella 17. Acqua evapotraspirata dal “sistema verde” nella serra bioclimatica in un tempo di 5 ore nelle giornate indicate

	kg ET								
	29-lug	05-ago	19-ago	24-ago	28-ago	02-set	04-set	11-set	25-set
sedano	0,99	1,17	1,89	1,89	2,61	1,17	1,44	0,9	-
lattuga	0,96	0,72	1,98	1,62	1,2	0,96	0,84	0,42	-
pomodoro	2,76	3,18	1,74	2,34	2,34	1,86	2,34	1,38	0,54
vite	1,41	1,11	1,02	1,62	1,11	1,35	1,71	1,05	0,78
Totale	6,12	6,18	6,63	7,47	7,26	5,34	6,33	3,75	1,32
kg ET/h	1,22	1,24	1,33	1,49	1,452	1,07	1,27	0,75	0,26

4.3 Influenza del processo naturale di ET del sistema verde nei confronti del raffrescamento della serra

Considerando un’evapotraspirazione massima registrata nella serra durante la sperimentazione di 1,49 kg ET/h (Tabella 17) e che la potenza [kW] necessaria all’evaporazione di 1 kg di acqua in 1 ora di tempo è pari a circa 0,676 kW/kg H₂O/h (a 30 °C), l’irraggiamento assorbito all’interno della serra con superficie di 8.5 mq è quindi rapportabile ad una potenza media pari a 0,12 kW/mq (Figura 63). Dunque, 120 Watt/mq è l’irraggiamento solare utilizzato mediamente dal sistema verde nelle 5 h di osservazione per il processo di ET. La potenza solare media incidente e trasmessa alle piante nella serra, per il giorno 24 agosto, è stata di circa 440 W/mq, media nelle 5 ore di monitoraggio; pertanto, la presenza del sistema verde ha assorbito il 27 % della potenza solare incidente, generando un carico termico latente anziché sensibile.

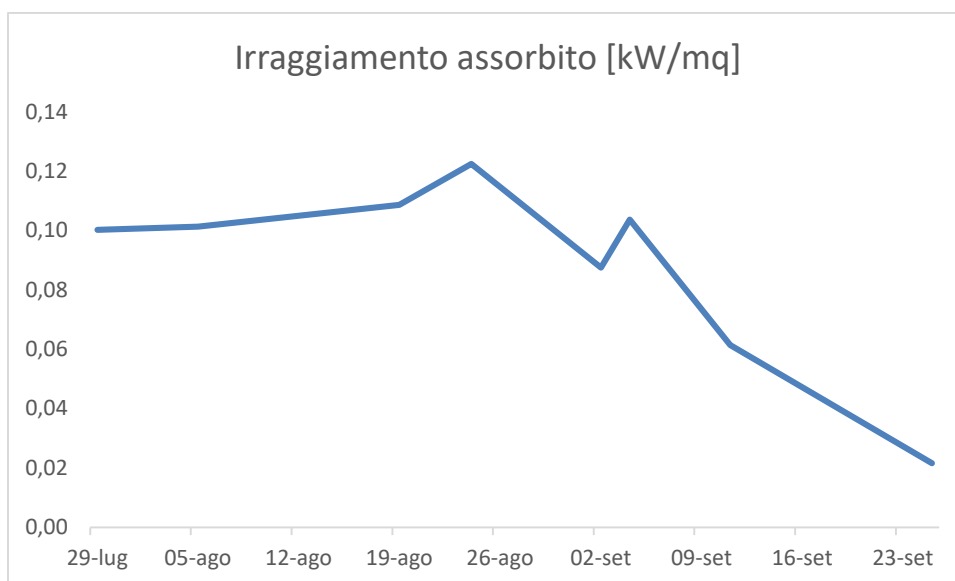


Figura 63. Irraggiamento assorbito dal “sistema verde” nella serra bioclimatica

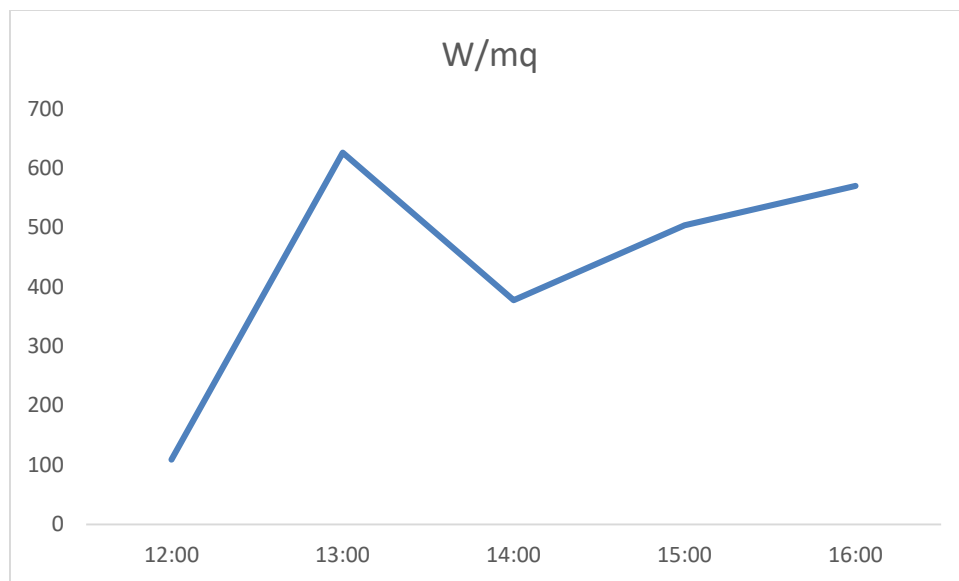


Figura 64. Potenza solare incidente e trasmessa alle piante il 24 Agosto

4.4 Valutazione della riduzione della radiazione solare in funzione della riduzione dell'effetto serra attraverso la regolazione del sistema di ombreggiamento e delle aperture per favorire la ventilazione, nel periodo estivo

Durante il periodo estivo e prima di inserire la vegetazione all'interno della serra, sono state osservate le variazioni delle temperature dell'aria interne alla serra in funzione della apertura e chiusura degli ombreggianti. In Figura 65 si riportano gli andamenti delle temperature dell'aria interna ed esterna alla serra in due diverse situazioni: ombreggianti chiusi (6 luglio) e ombreggianti aperti (7 luglio). In entrambi i giorni, tra le 14:00 e le 20:00 si osserva una temperatura dell'aria interna sempre maggiore rispetto alla temperatura dell'aria esterna, con differenze interno/esterno tra le due giornate di circa 16°C il 6 luglio e di 6°C il 7 luglio. Per queste giornate, l'uso dell'ombreggiante ha pertanto determinato una diminuzione della differenza tra la temperatura dell'aria interna ed esterna alla serra di circa 10°C.

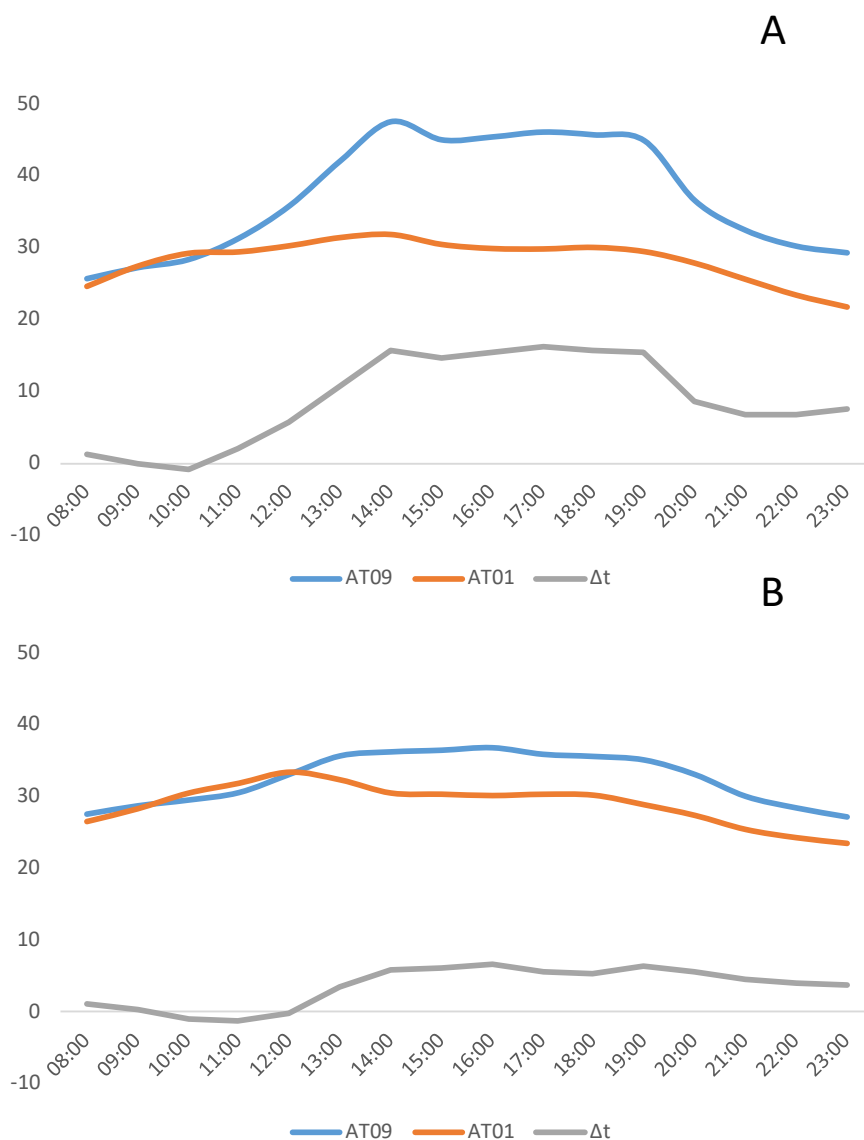


Figura 65. Differenze delle temperature dell'aria tra l'interno (AT09) e l'esterno (AT01) della serra bioclimatica con gli ombreggianti chiusi (senza ombra nella serra) il giorno 6 luglio (A), aperti (con ombra nella serra) il giorno 7 luglio (B)

Tra il 14 ed il 15 luglio è stato effettuato l'allestimento della serra con la messa a dimora delle piante e dell'impianto di irrigazione come descritto nel paragrafo 4.1.

Di seguito si riportano gli andamenti delle temperature interne ed esterne alla serra osservate in condizione di ombreggiante aperto sia in assenza (Figura 66) che in presenza della vegetazione (Figura 67). In quest'ultimo caso sono state anche lasciate semiaperte due finestre ad Ovest per favorire la ventilazione nella serra. In generale gli andamenti delle temperature misurate all'interno ed all'esterno della serra, sono simili tra di loro. Nella serra priva di vegetazione la temperatura dell'aria interna risulta sempre più elevata di quasi 6 °C rispetto alla temperatura dell'aria esterna, con picchi massimi alle ore 18:00. L'inserimento della vegetazione e l'apertura parziale delle finestrature ha determinato una diminuzione della differenza tra la temperatura interna e quella esterna: infatti nelle ore di luce si registra una differenza tra l'interno e l'esterno di 3°C.

In Figura 68, è mostrato l'andamento delle due temperature per il giorno 5 agosto dove si evidenzia il discostamento di circa 3°C tra la temperatura dell'aria esterna e quella interna alla serra.

I valori di umidità relativa all'interno della serra si mantengono anch'essi molto simili a quelli misurati nell'aria all'esterno. L'andamento è inversamente proporzionale alla temperatura e presenta un minimo quando le temperature sono massime (ore 14:00) (Figura 69).

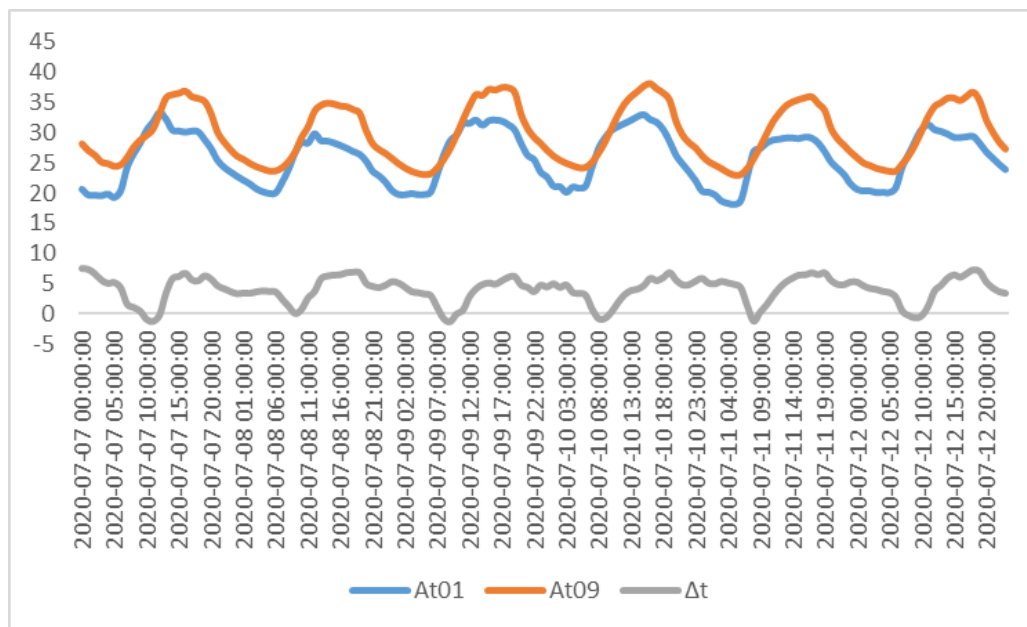


Figura 66. Differenze delle temperature dell'aria tra l'interno (AT09) e l'esterno (AT01) della serra bioclimatica con gli ombreggianti aperti in assenza della vegetazione dal 7 al 12 luglio 2020

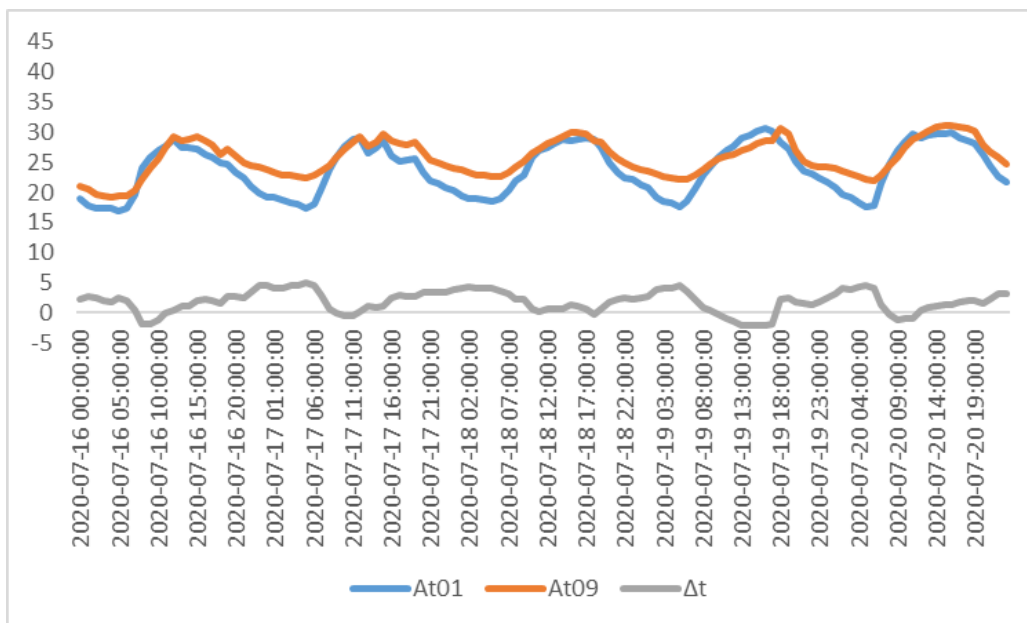


Figura 67. Differenze delle temperature dell'aria tra l'interno (AT09) e l'esterno (AT01) della serra bioclimatica con gli ombreggianti aperti in presenza della vegetazione dal 16 al 20 luglio 2020

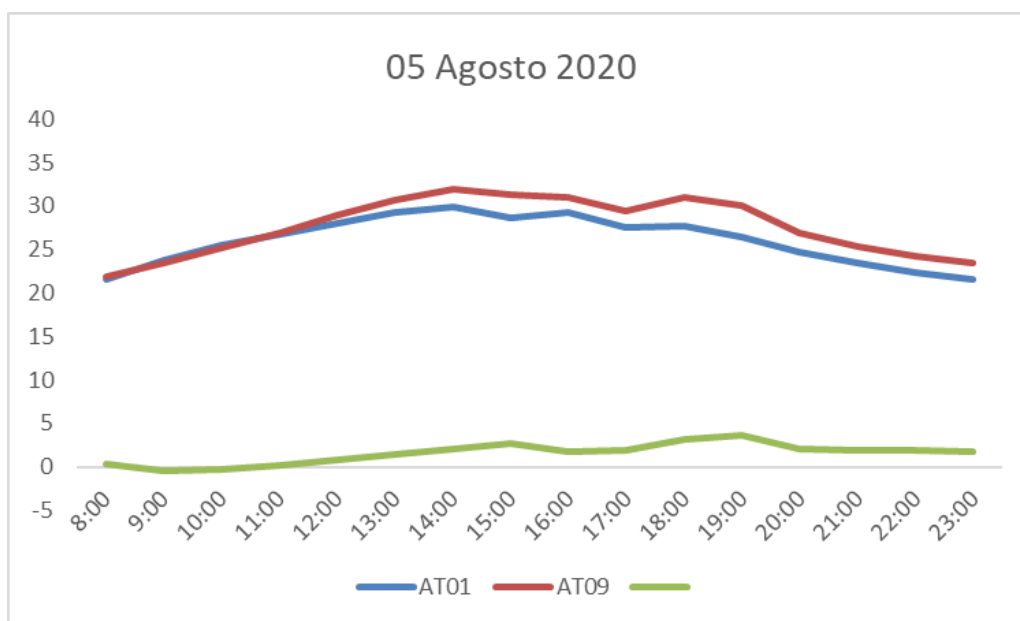


Figura 68. Differenze delle temperature dell'aria tra l'interno (AT09) e l'esterno (AT01) della serra bioclimatica relative al giorno 5 agosto 2020

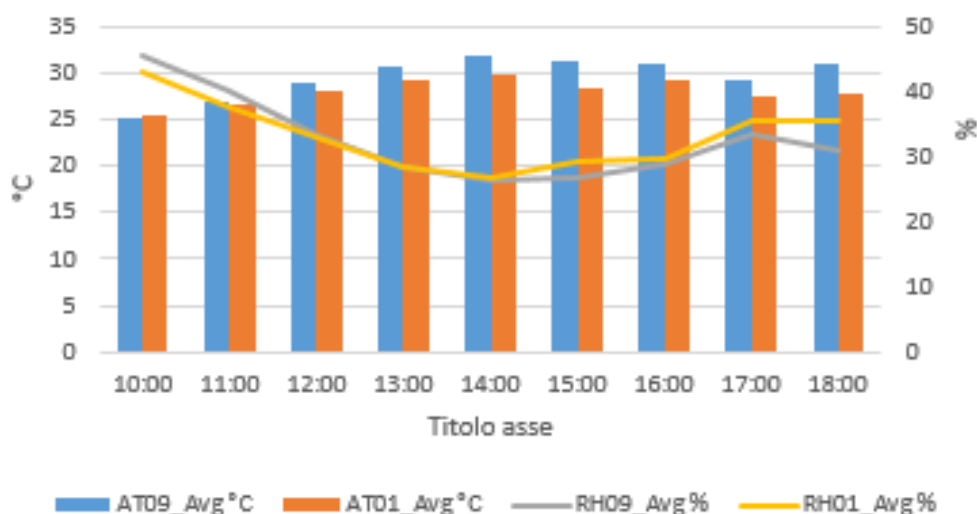


Figura 69. Andamento delle temperature (AT) e dell'umidità (RH) dell'aria tra l'interno (AT09, RH09) e l'esterno (AT01, RH01) della serra bioclimatica relative al giorno 5 agosto 2020

In conclusione, la serra ha per sua natura una temperatura dell'aria interna maggiore di quella esterna, in estate queste differenze possono essere anche di 16°C. L'utilizzo degli ombreggianti, l'inserimento del "sistema verde" e la parziale apertura delle finestre ha permesso di ridurre queste differenze a 3 °C rendendo le condizioni della serra meno peggiorative. In questo primo anno di sperimentazione con l'introduzione di un "sistema verde" in serra bioclimatica è stato calcolato che circa 120 Watt/mq di irraggiamento solare siano stati mediamente assorbiti dalla evapotraspirazione da parte della vegetazione. Stante la potenza media in ingresso nella serra di circa 440 W/mq, significa che circa il 27% di energia solare non viene assorbita dalle strutture (carico sensibile) ma passa come carico latente (evaporazione).

4.5 Studio dello scambio convettivo tra l'ambiente serra e l'ambiente interno della stanza adiacente, nel periodo invernale

Dalle ore 18:00 del 16 febbraio 2021 alle ore 13:42 del 26 febbraio, è stata aperta la finestra di collegamento tra la serra e la stanza adiacente. Nella Figura 70 si osserva che la temperatura dell'aria nella serra bioclimatica si mantiene anche di una decina di gradi più elevata rispetto alla temperatura dell'aria esterna alla serra. Ad esempio, il giorno 21 febbraio alle ore 16:00 la temperatura dell'aria interna alla serra è 28.68°C (massimo valore osservato nelle 24h) cioè 12°C più elevata della temperatura dell'aria misurata all'esterno della serra (16.52°C). Nella stessa giornata alle ore 16:00, la temperatura dell'aria nella stanza adiacente è 19,15°C cioè 3 °C più elevata della temperatura dell'aria esterna alla serra.

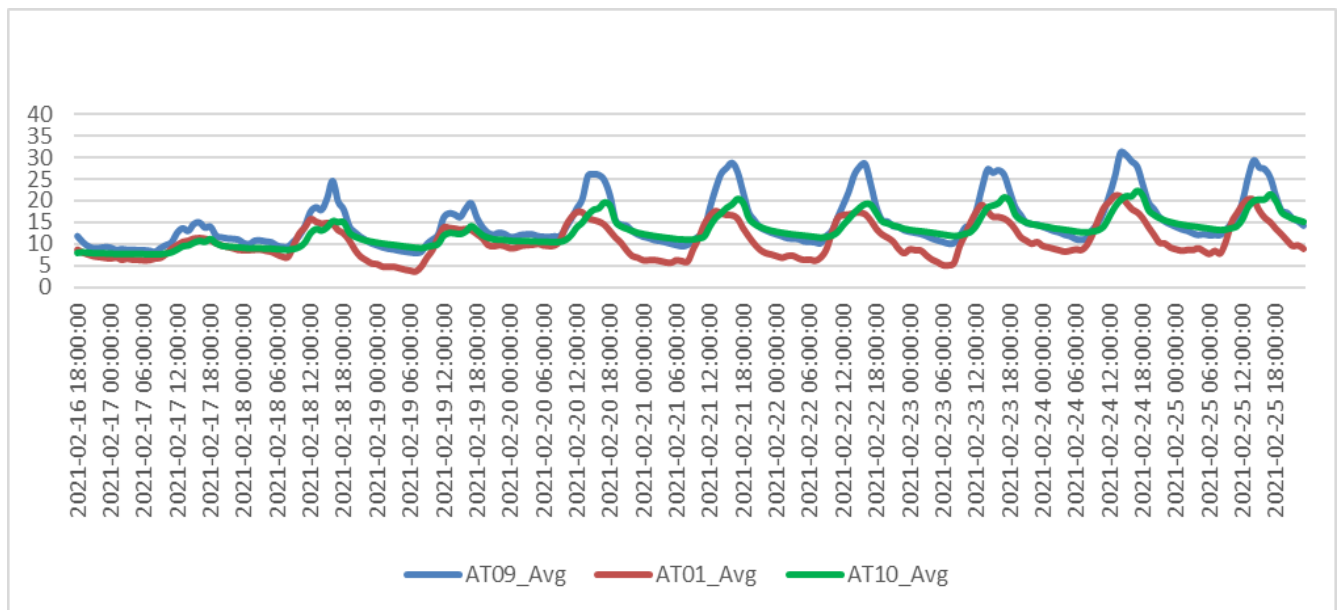


Figura 70. Differenze delle temperature dell'aria tra l'interno della serra (AT09), all'esterno della serra bioclimatica (AT01) e nella stanza adiacente la serra (AT10) con la finestra di collegamento, tra la serra e la stanza adiacente, aperta

Il giorno 26 febbraio 2021, alle ore 13:42, è stata chiusa la finestra di collegamento tra la serra e la stanza adiacente. Nella Figura 71 si osserva che la temperatura dell'aria interna alla serra, di giorno, raggiunge temperature fino a 21 °C più elevate rispetto alla temperatura dell'aria esterna alla serra, con il picco di temperatura alle ore 16:00. Il 27 febbraio alle 16:00, infatti, la temperatura dell'aria interna alla serra misurava 36.93°C mentre la temperatura dell'aria esterna alla serra 15,92°C. La temperatura dell'aria nella stanza adiacente si mantiene costante durante le 24h con valori che oscillano tra i 14-15°C. I risultati finora osservati mostrano che quando la serra è messa in comunicazione con l'ambiente interno essa permette un apporto termico positivo all'interno della stanza mentre quando la finestra di collegamento è chiusa funziona da "spazio tampone" riducendo le dispersioni dalla stanza.

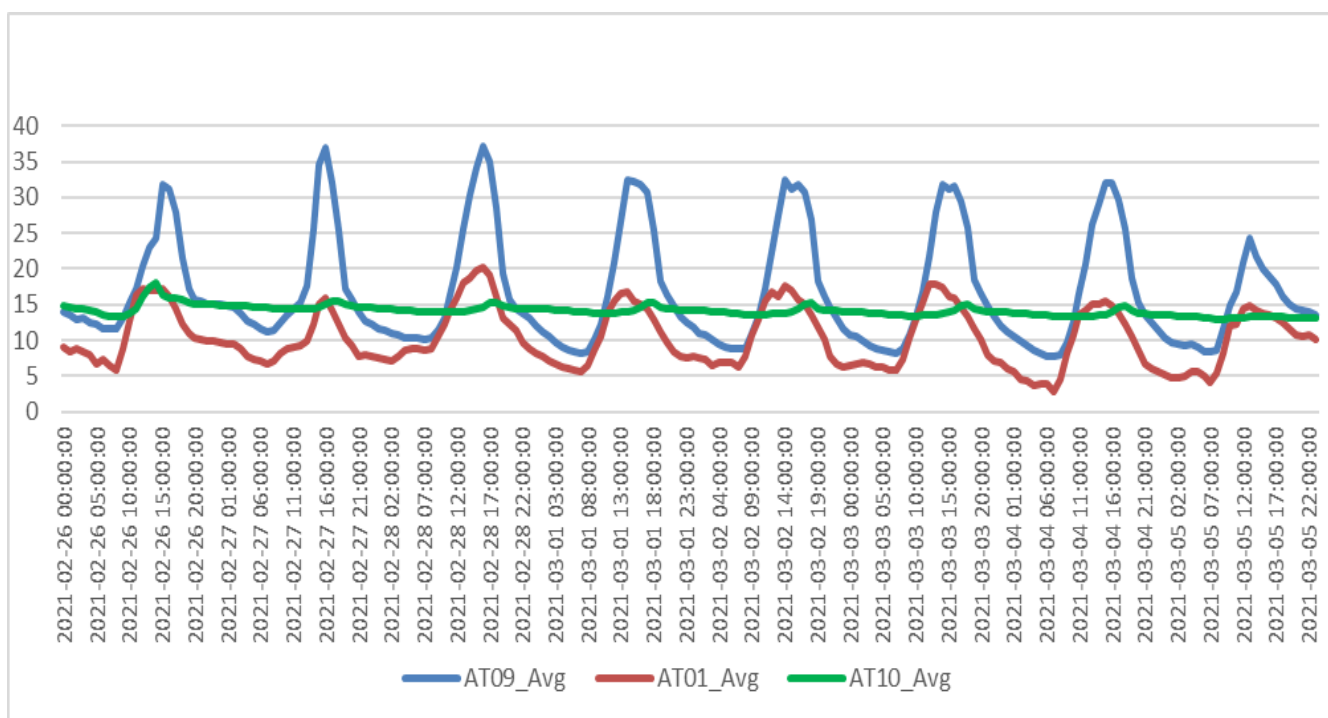


Figura 71. Differenze delle temperature dell'aria tra l'interno della serra (AT09), all'esterno della serra bioclimatica (AT01) e nella stanza adiacente la serra (AT10) con la finestra di collegamento, tra la serra e la stanza adiacente, chiusa.

5 Valutazione dell'efficienza ambientale di infrastrutture verdi attraverso tecniche di *Remote Sensing* & GIS

5.1 Premessa

Le *green technologies* stanno sempre più conquistando un ruolo primario nell'ambito dell'architettura eco-sostenibile, integrate nella costruzione di edifici, pubblici e privati, fin dalla progettazione per fronteggiare la stringente necessità di rendere più vivibili le nostre città.

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 possono essere acquisite sfruttando le tecniche di *Remote Sensing*, attraverso sensori che operano nella banda dell'infrarosso termico (*TIR*), installati sia su piattaforma aerotrasportata che su piattaforma 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.

I dati di telerilevamento sono stati ampiamente utilizzati per analizzare l'effetto isola di calore in molti studi, oltre ai dati ottenuti dalle misurazioni al suolo. La prima osservazione di misura della *LST* utilizzando i dati dei sensori satellitari è stata riportata da [45], che ha esplorato la possibilità di distinguere tra aree urbane sulla base dei dati dell'infrarosso termico (*TIR*) acquisiti da un sensore. Da allora, varie combinazioni di sensori e piattaforme satellitari sono state utilizzate per le osservazioni remote dell'andamento della *LST* [46]; [47]; [48].

Alberi e piante come elementi importanti del sistema terra, aiutano 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. Carbonio, minimizzando e intercettando i raggi solari, generando ombra e assorbendo flussi di radiazione [49], [50], [51]. 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 [52]. 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 [53].

Diversi studi hanno valutato l'impatto di parchi e spazi verdi sul microclima, hanno scoperto che la riduzione della temperatura in un ambiente urbano con alberi può arrivare fino a 4°C. Lo studio di Bernatzky a Frankfurt (Germania) ha mostrato che un luogo urbano riduce 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 [54]. 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 [55], [56]. Ciò suffraga l'ipotesi che le superfici verdi siano efficaci nel ridurre la temperatura ambiente circostante.

L'obiettivo di questa ricerca è valutare l'impatto delle infrastrutture verdi (vegetali) sul clima urbano (anche per mitigare l'isola di calore urbana (ICU), analizzando i loro effetti sulla temperatura superficiale del suolo (LST) utilizzando la tecnica del telerilevamento.

Saranno sperimentati diversi approcci legati alle diverse fonti di dati satellitari, diversificate per risoluzione spettrale, geometrica, radiometrica e temporale; per disponibilità, *free* o commerciali.

Va notato comunque che non ci sono stati finora studi condotti su questo argomento utilizzando il telerilevamento: unico riferimento recentissimo di Gherraz e Alkama del 2020 [57].

5.2 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*) e rappresenta una branca complementare al telerilevamento nel campo del visibile e a quello delle microonde. I dati ricavati dallo studio delle particolari lunghezze d'onda del *TIR* sono fortemente correlati con gli aspetti termici propri del corpo rilevato.

Nel telerilevamento ottico si misura la radiazione elettromagnetica *riflessa* dalla superficie terrestre nelle lunghezze d'onda del visibile, mentre nel *TRS* viene misurata la quantità di radiazione elettromagnetica *emessa* dalla superficie terrestre nelle lunghezze che appaiono invisibili all'occhio umano e che appartengono alla regione dell'infrarosso termico dello spettro elettromagnetico.

Le immagini ottenute in questa finestra spettrale consentono di caratterizzare univocamente i materiali e le caratteristiche della superficie investigata, come ad esempio la composizione minerale, l'umidità del terreno, anomalie geotermiche ecc. [58].

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. Una maggior temperatura superficiale significa una maggior vibrazione delle molecole che compongono l'oggetto, il che a sua volta equivale ad una maggiore intensità radiativa a lunghezze d'onda minori (temperatura di radianza).

5.3 Lo spettro elettromagnetico nel telerilevamento termico

La radiazione infrarossa (*IR*) è la radiazione elettromagnetica con lunghezza d'onda maggiore rispetto a quella del visibile e minore rispetto a quella di microonde ed onde radio.

Ogni oggetto con temperatura superiore allo zero assoluto (in pratica qualsiasi oggetto reale) emette spontaneamente radiazione in questa banda; se aumenta la temperatura, la lunghezza d'onda diminuisce e si sposta sempre più verso il visibile finché l'oggetto non diviene incandescente, con lunghezze d'onda nel rosso visibile, Figura 72.

La regione del visibile, compresa tra 0,38 e 0,75 μm , è seguita da quella dell'infrarosso, a sua volta suddivisa in porzioni più piccole.

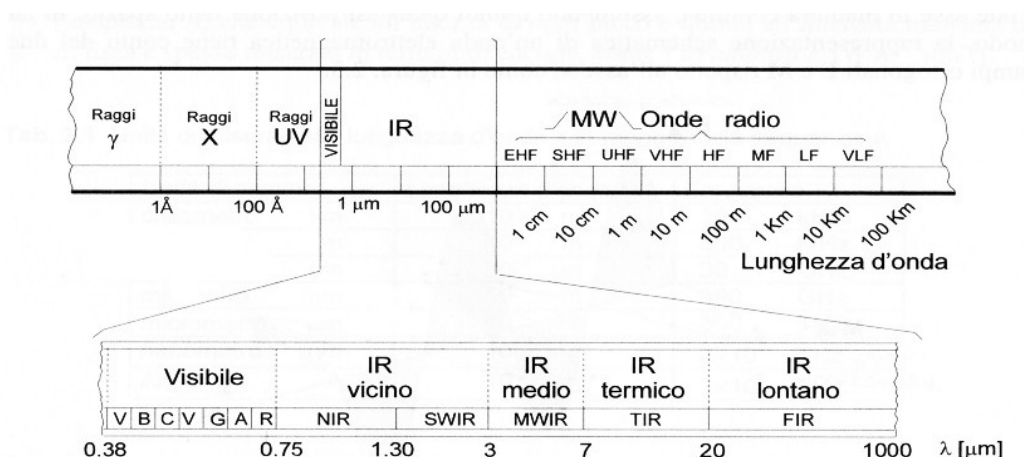


Figura 72 Spettro elettromagnetico, in dettaglio il range del visibile e dell'infrarosso

Comunemente, lo studio delle caratteristiche termiche del suolo, delle acque e delle nuvole si basa su dati raccolti nella regione dello spettro elettromagnetico compresa tra i 3 μm ed i 35 μm riferendosi a questa come la regione dell'infrarosso termico [58].

Sono illustrate nel seguito alcune nomenclature delle bande dell'IR di più frequente utilizzo dalla comunità mondiale di *Remote Sensing*, Tabella 18:

Autori	Banda	Intervallo λ [μm]
Brivio, Lechi, Zilioli, 2006	IR vicino - NIR	0,75 - 1,3
	IR onde corte - SWIR	1,5 - 2,5
	IR onde medie - MWIR	3,5 - 5,2
	IR termico - TIR	7,0 - 20
	IR lontano - FIR	20 - 1000
Quattrochi et al., 2009 (1)	IR vicino - NIR	0,7 - 1,1
	IR medio - MIR	5,0 - (25÷40)
	IR lontano - FIR	(25÷40) - (200÷350)
Quattrochi et al., 2009 (2)	IR vicino - NIR	0,7 - 1,1
	IR onde corte - SWIR	1,1 - 3,0
	IR termico - TIR	3(o 8) - 14
	IR lontano - FIR	14(o 35) - 103

Tabella 18. Principali bande nell'IR utilizzate nel Telerilevamento Termico, denominate da differenti autori

5.4 Finestre atmosferiche

Ozono (O_3), biossido d'azoto (NO_2), anidride solforosa (SO_2), vapore acqueo (H_2O), oltre che i fumi, lo smog, e la polvere assorbono e diffondono differientemente la radiazione solare diretta e riflessa dalla superficie del suolo, con il risultato di ridurre complessivamente la trasparenza atmosferica e quindi il contrasto tra gli oggetti osservati. Alcuni gas come l'ossigeno (O_2), l'anidride carbonica (CO_2), l'ossido di carbonio (CO), il metano (CH_4) e l'ossido di azoto (N_2O) mostrano evidenti assorbimenti nelle bande nell'infrarosso. La terza finestra (Figura 73), nell'intervallo spettrale 17 – 25 μm , non è ancora ben investigata, pertanto non è molto utilizzata nelle ricerche scientifiche. Per la prima finestra, che va dai 3,5 - 5,2 μm all'interno dell'infrarosso medio, nelle riprese diurne l'energia raggiante emessa dalle superfici terrestri è confrontabile con quella riflessa dalle medesime proveniente dal Sole, e risulta più complesso separare i due contributi.

Prima Finestra	Seconda Finestra	Terza finestra
3,0 – 5,0 μm	8,0 – 14 μm	17 – 25 μm

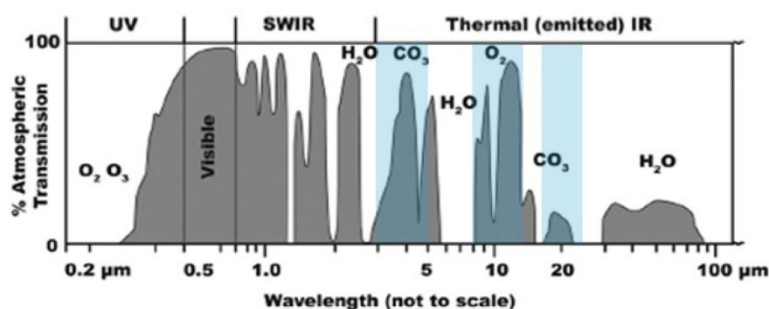


Figura 73. Finestre atmosferiche

La finestra di maggior uso per il telerilevamento termico è quella compresa tra 8 – 14 μm . Il picco di radiazione emessa dalla superficie terrestre si trova in questo *range* di lunghezze d'onda, rendendo questa finestra una scelta eccellente per studiare le caratteristiche termiche della superficie terrestre e dell'atmosfera. Unico inconveniente di questa regione spettrale 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 finestre 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. Questo permette anche di meglio comprendere quanto sia importante la risoluzione spettrale e la disponibilità di sensori iperspettrali.

5.5 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 [58]. La temperatura radiante può essere misurata con termoradiometri o con spettroradiometri.

Ciò che "misura" quanta parte della radiazione elettromagnetica è emessa e quanta è "affetta" da componenti riflessive 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 [59] o, più precisamente, come l'effetto complessivo e direzionale della temperatura radiometrica superficiale [60]. Con il concetto di "effetto complessivo" si vuol intendere il contributo casuale fornito da *pixel* non omogenei. Per una determinata direzione di visualizzazione del sensore si ha che la *LST* dipende dalla distribuzione di temperatura e di emissività all'interno di un singolo *pixel* e dal canale spettrale di misurazione [60].

La *Land Surface Temperature* è la temperatura termodinamica (o assoluta) misurata sulla superficie terrestre ed è considerata come una sorta di temperatura di "pelle" [61]. 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 [62].

5.6 Dati satellitari disponibili

La disponibilità di immagini satellitari *free* e *open* è in costante aumento da quando l'*USGS (United States Geological Survey)*, il servizio geologico americano che da quarant'anni porta avanti le missioni *Landsat*, nel 2008 decise di liberare l'accesso al suo sterminato archivio di immagini satellitari. Oggi il satellite *Landsat 8* acquisisce costantemente immagini di altissima qualità sull'intero globo terrestre, e la data policy free & open è confermata anche per i dati della missione *Landsat 9* che dovrebbe essere lanciato entro il 2021 compatibilmente ai rallentamenti causati dalla pandemia da *Covid 19*.

Sono state già illustrate le principali caratteristiche dei satelliti del programma americano *Landsat* nel paragrafo specifico del *Report RdS/PTR2019* [63].

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 74), 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.

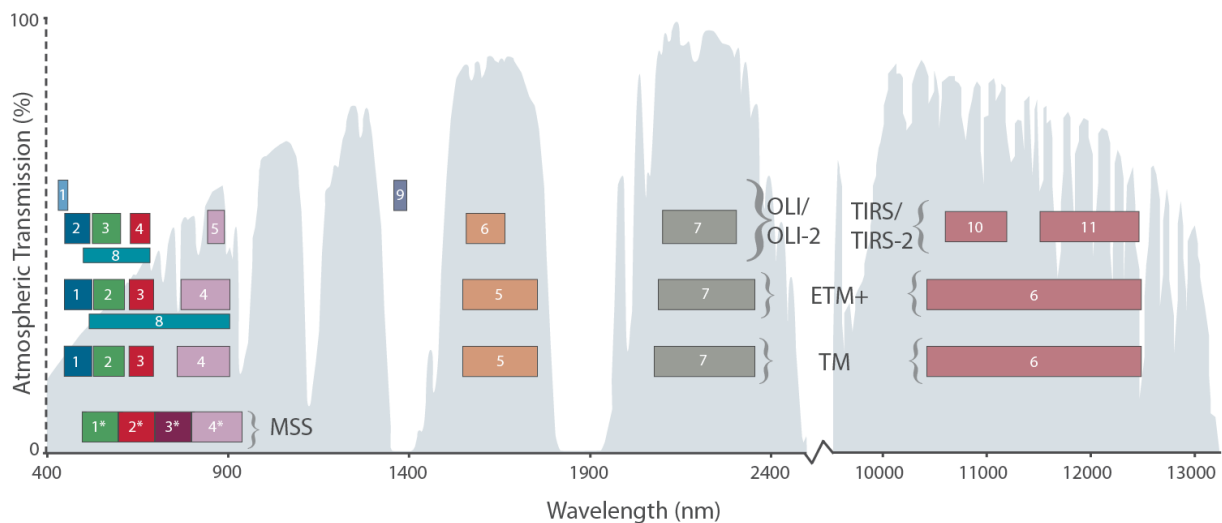


Figura 74. Risoluzione spettrale dei satelliti *Landsat*

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*

Riportiamo sinteticamente le caratteristiche di acquisizione dei primi due: *Sentinel 1* e 2, Figura 75 e Tabella 19.

Sentinel 1 :

- Centro di frequenza: 5.405 GHz (corrisponde a una lunghezza d'onda di ~5.5465763 cm)
- Larghezza della banda 0-100 MHz (programmabile)
- Polarizzazione HH+HV, VV+VH, VV, HH
- Modalità di acquisizione: SM, IW, EW, WV

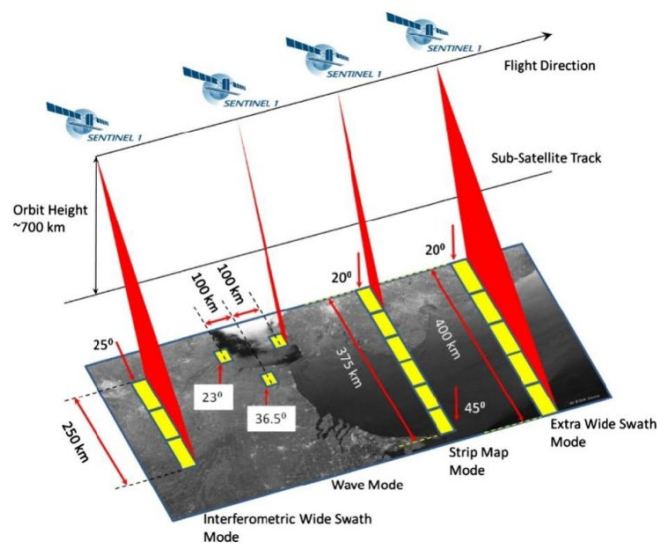


Figura 75 Modalità di acquisizione di *Sentinel 1*

Modalità	Angolo incidenza	Risoluzione spaziale	Swath	Polarizzazione
<i>Stripmode</i>	20°-45°	5x5 m	80 km	HH+HV, VH+VV, HH, VV
<i>Interferometric Wide swath</i>	29°-46°	5x20 m	250 km	HH+HV, VH+VV, HH, VV
<i>Extra Wide swath</i>	19°-47°	20x40 m	400 km	HH+HV, VH+VV, HH, VV
<i>Wave</i>	22°-35° 35°-38°	5x5 m	20x20 km	HH, VV

Tabella 19 Modalità di acquisizione di Sentinel 1

Le modalità di acquisizione principali sono la *Interferometric Wide swath* (IW) e la *Wave mode* (WV), la prima è la modalità di *default* per l'acquisizione su terra e soddisfa quasi tutte le necessità di servizio, la seconda invece viene utilizzata in mare aperto (*ESA, Copernicus*).

La modalità WV, invece, fornisce una serie di immagini (a singola polarizzazione VV o HH) ad angoli di incidenza alternati e ad una distanza di 100km.

Ciascuna immagine copre 20x20km di superficie terrestre con una risoluzione di 5x5 m. Esistono altre due modalità di acquisizione come riportato in Tabella 19, la modalità *Stripmode* (SM) ed *Extra Wide Swath* (EW) che sono di supporto alle normali operazioni, la prima genera una serie di sei immagini con risoluzione di 5x5 m e uno *swath* di 80 km, la seconda lavora in maniera simile alla IW mode utilizzando 5 *subswath* ottenendo una risoluzione spaziale di 20x40m.

Le informazioni relative alla copertura del suolo (*land cover*), con un intervallo temporale così ristretto (3 giorni) permette una valutazione eccellente specialmente grazie all'integrazione di dati multispettrali acquisiti da *Sentinel-2*.

Ogni modalità di acquisizione dati può generare prodotti a diversi livelli:

- Livello 0, sono i *raw data*, non compressi e non calibrati, i dati di base da cui tutti gli altri prodotti provengono, in IW mode sono circa 1GB.
- Livello 1 Single *Look Complex*, sono dati calibrati e geo-referenziati usando dati di orbita e assetto provenienti dal satellite, sono dati da 8GB (IW mode polarizzazione doppia, o 4GB se in polarizzazione singola).
- Livello 1 Ground *Range Detected*, dati calibrati, georeferenziati e proiettati al suolo usando un modello di ellissoide. Sono disponibili a più livelli di risoluzione.
- Livello 2, sono prodotti di interesse geofisico ottenuti da dati SAR e vengono utilizzati per applicazioni in ambito oceanico, legate a vento, onde e correnti.

In Figura 76 si visualizza attraverso il *software SNAP* un *subset* focalizzato sul lago di Bracciano per inquadrare la zona oggetto di studio: il raggio di polarizzazione scelto è il VH perché più consono e intenso al tipo di acquisizione.

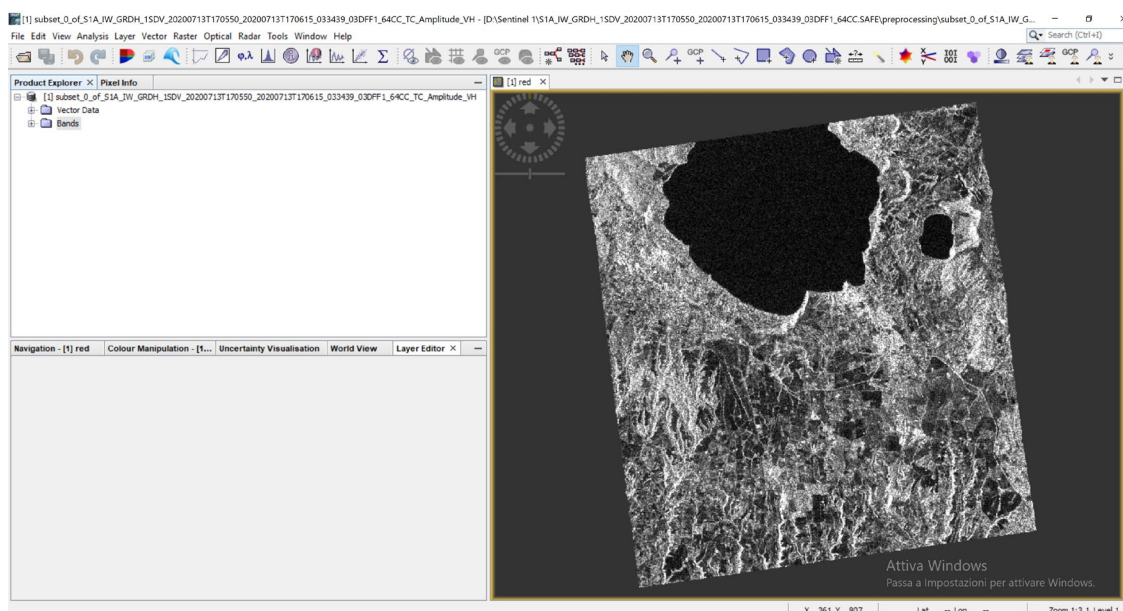


Figura 76. Subset_0_of_S1A_IW_GRDH_1SDV_20200713T170550_20200713T170615_033439_03DFF1_

Sentinel 2

La missione *Sentinel-2* consiste in due piattaforme multispettrali (la prima nel 2015, il secondo lancio nel 2016) con 13 bande ad alta e media risoluzione spaziale a seconda della specifica banda (Figura 77).

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 78).

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.

I dati sono forniti in un formato apposito (*SENTINEL-SAFE*) (Figura 79) che include oltre all'immagine *JPEG*, indicatori di qualità, dati ausiliari e metadati. Al livello 2A si trovano prodotti ortorettificati con informazioni sulla riflettanza *Bottom-Of-Atmosphere* (*BOT*) e una classificazione di base (incluse le classi di nubi). Questo genere di prodotti sono generati dagli utenti dei prodotti 1C. Ai livelli 1C e 2° si trovano "granuli" (chiamati anche *tiles*) di 100 kmq. Al livello 1B si trovano invece immagini che coprono aree di circa 25 kmq, questo è il livello minimo di dati fornito e contiene informazioni di tutte le bande spettrali.

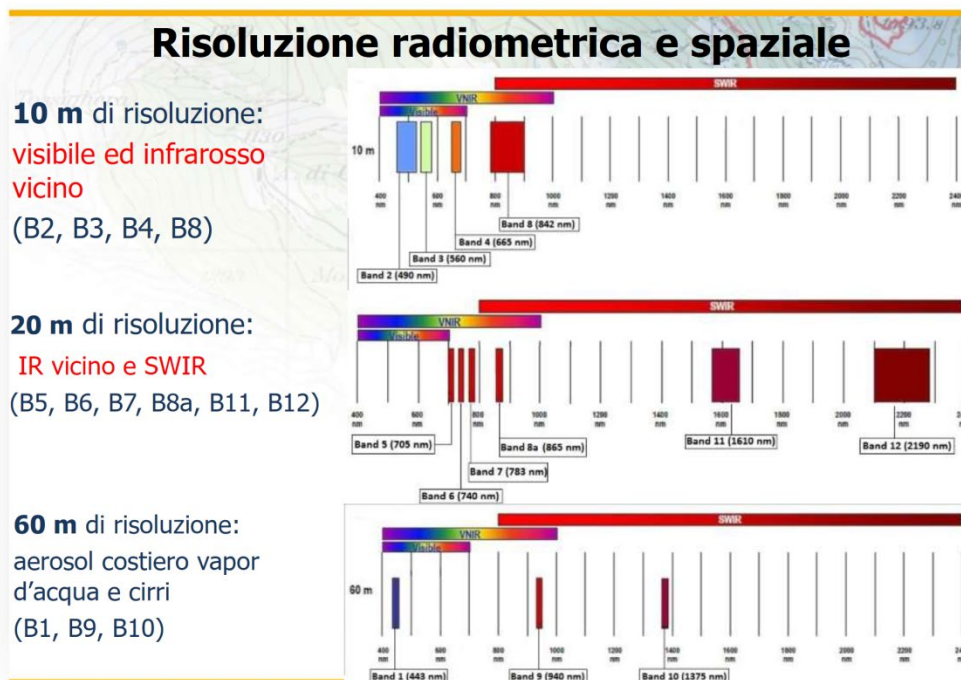


Figura 77. Bande spettrali e risoluzione geometriche di Sentinel 2

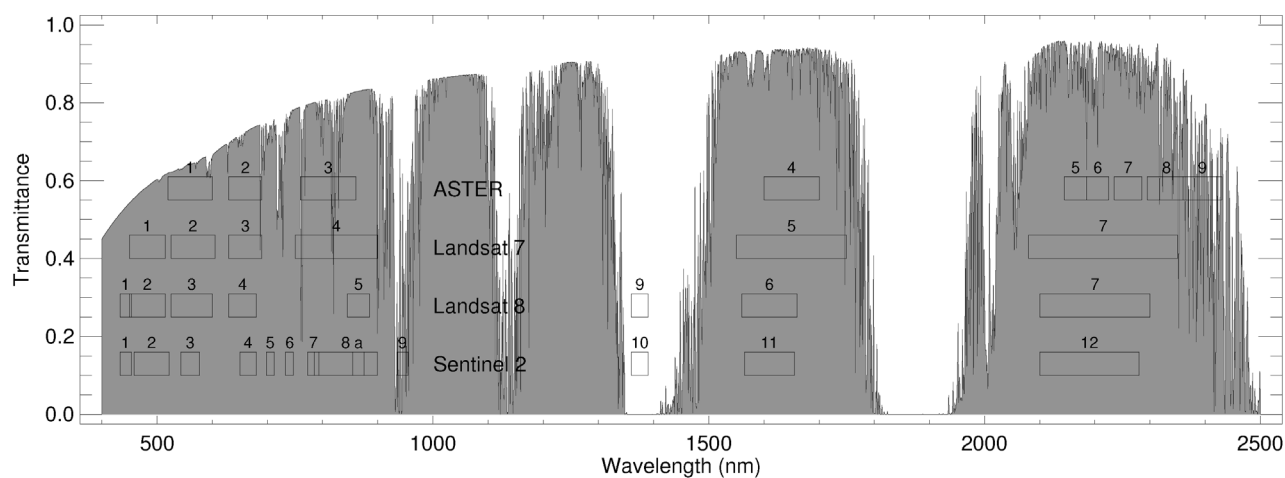


Figura 78. Raffronto tra risoluzioni spettrali di Landsat's, ASTER e Sentinel 2

Name	High-level Description	Production & Distribution	Data Volume
Level-1B *	Top-of-atmosphere radiances in sensor geometry	Systematic generation and on-line distribution	27 MB (each 25x23km ²)
Level-1C	Top-of-atmosphere reflectances in cartographic geometry	Systematic generation and on-line distribution	500 MB (each 100x100km ²)
Level-2A	Bottom-of-atmosphere reflectances in cartographic geometry (prototype product)	Generation on user side (using Sentinel-2 Toolbox)	600 MB (each 100x100km ²)

Figura 79. Formato dati Sentinel 2

Dobbiamo accedere alla sottocartella "*IMG_DATA*" per trovare finalmente le bande suddivise in diversi con estensione *.jp2*, ovvero in formato compresso *JPEG 2000*, a 16 *bit*. Ogni tassello copre un'area di 110 Km x 110 Km che si sovrappone per 10 km con quelli adiacenti, Figura 80.



Figura 80. Struttura dei dati di 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 81.

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.

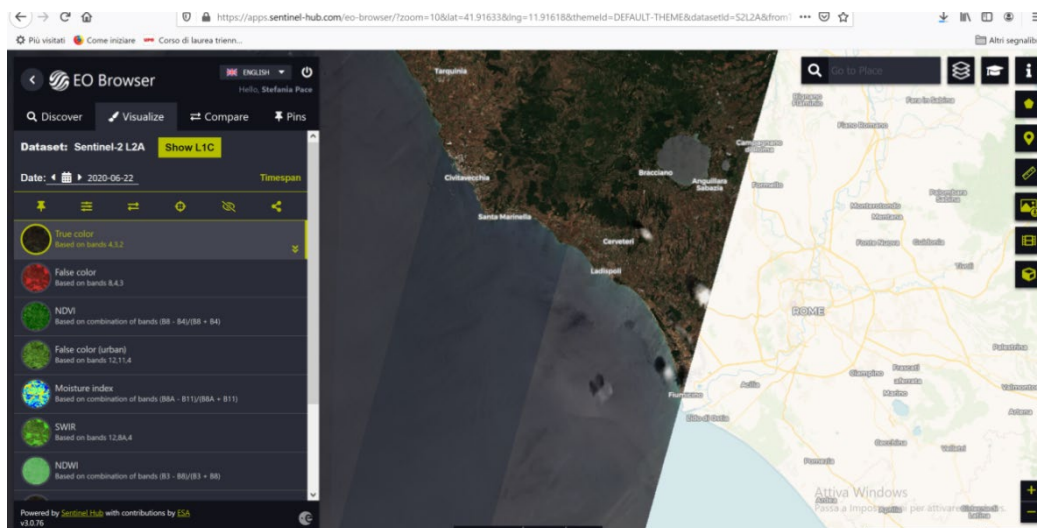


Figura 81. Visualizzazione di un tassello di *Sentinel 2* in *True color*

Una volta scelto il tassello possiamo visualizzare e scaricare alcune immagini ridotte prodotte con parametri standard (utili come anteprime per valutare la scena), Figura 81, oppure scaricare i dati originali per lavori più avanzati.

Nel primo caso clicchiamo su "*Visualize*" e ci viene data la possibilità di scegliere tra diversi tipi di immagini, Figura 82 che vengono create istantaneamente e mostrate sul *browser* per una prima analisi.

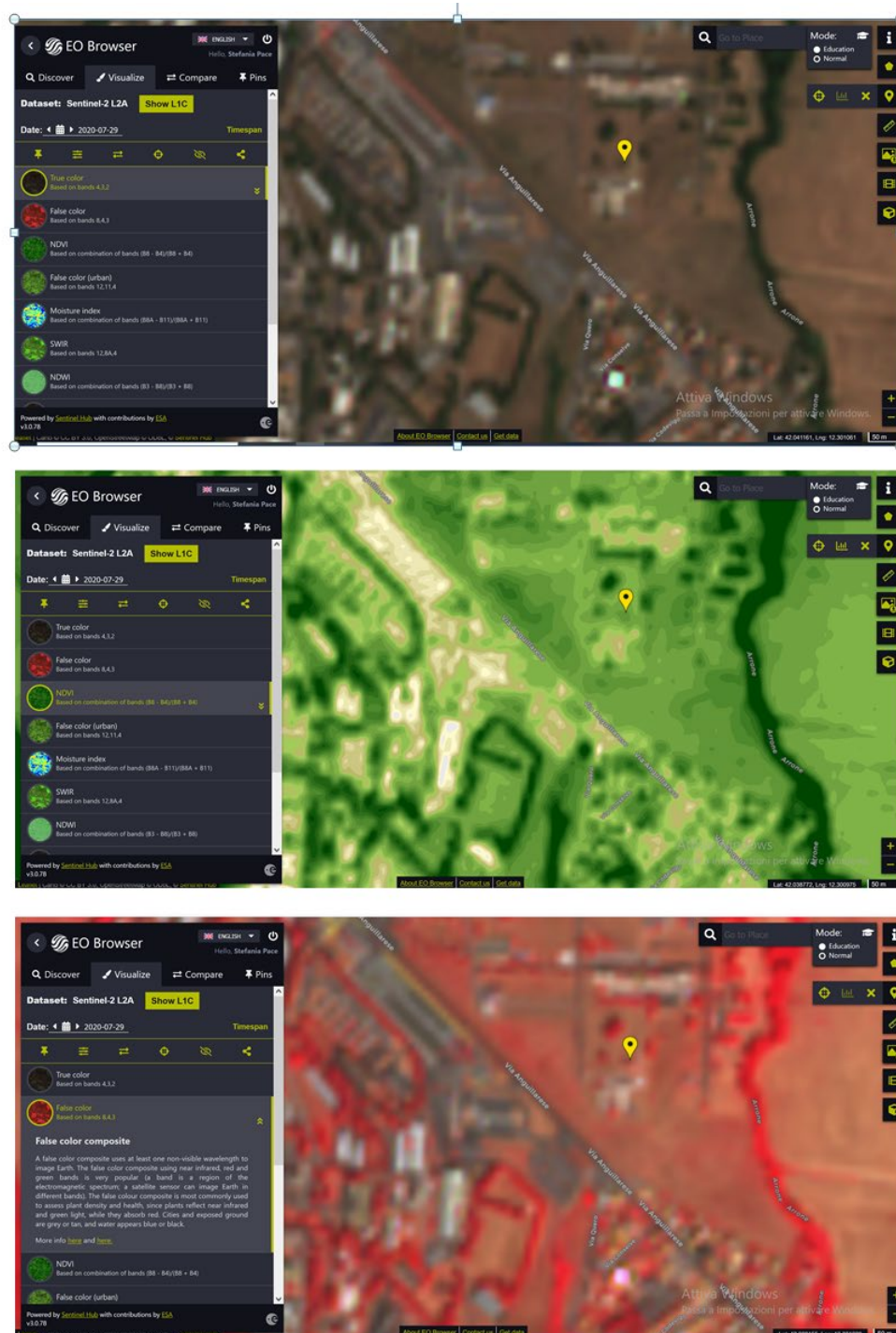


Figura 82. Visualizzazione di un tassello di Sentinel 2: zoom in su ENEA Casaccia visualizzazione in False colour e NDVI

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*

1. Prisma

PRISMA (PRecursores 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. Lanciato per contribuire al raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDG) delle Nazioni Unite, grazie al sensore iperspettrale, primo del suo tipo mai lanciato in Europa e realizzato da Leonardo, PRISMA dimostra, così, di essere un sistema di sorveglianza versatile per proteggere l'ambiente.

In questo modo il satellite è in grado di distinguere non solo le caratteristiche geometriche degli oggetti osservati, ma anche la composizione chimico-fisica della superficie terrestre. Ogni materiale, infatti, ha una propria firma spettrale, una vera impronta digitale: una combinazione unica di colori, detti bande spettrali. La strumentazione elettro-ottica di PRISMA è in grado di analizzare questa firma dalla sua orbita a 615 km di altezza, effettuando un monitoraggio di ultima generazione che sarà in grado di identificare un oggetto o risalire alle caratteristiche di un'area sotto osservazione. 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

Ad oggi sono state completate con successo tutte le fasi di messa in orbita, verifiche del corretto funzionamento del satellite in volo, calibrazione del sensore, test delle procedure operative e dei sistemi di terra che consentono di mantenere il sistema in condizioni di funzionamento operativo nominale. 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 degli utenti di PRISMA. Per accedere alle 27000 riprese già oggi disponibili nell'archivio di PRISMA o richiedere nuove acquisizioni iperspettrali della superficie terrestre l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) ha deciso di adottare una politica di accesso ai dati con bassissime restrizioni: saranno forniti gratuitamente e a chiunque, tutti possono registrarsi come utenti.

5.7 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 una bassa risoluzione geometrica, spesso non inferiore ai 50-60 m, poco compatibile con dimensioni sperimentali di ricerca come quella oggetto del presente studio: le pareti verdi, il tetto del prototipo di edificio hanno dimensioni dell'ordine delle decine di metri per lato di estensione (Figura 83); situazione analoga si riscontra nelle pareti verdi, *living wall*, *green facades* sparse sul territorio nazionale per motivi sperimentali e/o architettonici-ingegneristici: in Figura 84 il liceo Scientifico Keplero di Roma, in via Silvestro Gherardi in zona Marconi a un passo dalla Basilica di San Paolo e dalla famosa spiaggia sul Tevere, è un esempio. La prima scuola d'Italia con il giardino sul tetto, fra i vincitori del Premio Internazionale *EcotechGreen*, promosso tra gli altri dal Consiglio nazionale degli architetti, pianificatori, paesaggisti e conservatori.



Figura 83. Edificio Prototipo sperimentale ENEA di pareti e tetto verde



Figura 84. 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 raggiante 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) [64] 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.

Tra i numerosi proposti in letteratura, consideriamo il "metodo delle soglie $NDVI$ " [65] che prevede la stima dell'emissività dei *pixel* in base ai valori del *Normalized Difference Vegetation Index* ($NDVI$) [66]; ciò consente di ricavare un'immagine di *Land Surface Temperature* alla stessa risoluzione delle bande $VNIR$.

Il metodo proposto ottiene i valori di emissività dai valori dell'indice $NDVI$, considerando range diversi:

a. $NDVI < 0,2$

in questo caso il pixel è considerato come suolo nudo e l'emissività è ottenuta dai valori di riflettività nella regione del rosso.

b. $NDVI < 0,5$

i pixel che presentano valori di $NDVI$ superiori a 0,5 sono considerati come densa vegetazione, e quindi per essi si assume un valore costante di emissività in genere pari a 0,99.

c. $0,2 \leq NDVI \leq 0,5$

in questo caso, il pixel è composto da una miscela di suolo nudo e vegetazione, e l'emissività è calcolata secondo la seguente equazione:

$$\varepsilon = \varepsilon_V P_V + \varepsilon_S (1 - P_V) + d\varepsilon$$

dove ε_V ed ε_S sono rispettivamente l'emissività di vegetazione e terreno; P_V è la *vegetation cover fraction*, ovvero la frazione di copertura vegetale di ogni pixel dell'immagine, ottenuta in accordo a [67].

Il valore dell'indice $NDVI$ viene calcolato dai valori di riflettanza delle bande $VNIR$ secondo l'equazione:

$$NDVI = \frac{(b1 - b2)}{(b1 + b2)}$$

dove:

$b1$ = banda 3 (NIR)

$b2$ = banda 2 (Red)

Si procede quindi all'attribuzione ad ognuna delle 2 immagini, tramite la definizione di regioni di interesse e l'analisi degli istogrammi di frequenza dell'indice di vegetazione all'interno delle stesse, dei valori caratteristici $NDVI_V$ e $NDVI_S$ per aree rispettivamente densamente vegetate e coperte da suolo nudo; tramite questi si possono poi calcolare i corrispondenti valori di emissività ε_V ed ε_S secondo la seguente relazione *Van der Griend* (1993) [68] :

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \cdot \ln(NDVI)$$

La fase successiva è poi il calcolo della *vegetation cover fraction* P_V , ovvero della frazione di copertura vegetale di ogni *pixel* dell'immagine; essa è correlata ai valori della relazione precedente:

$$P_V = \left(\frac{NDVI - NDVI_S}{NDVI_V - NDVI_S} \right)^2$$

Una volta noto il valore di P_V , applicando il modello operativo proposto da Valor & Caselles (1996) [69], è quindi possibile attribuire un valore di emissività ad ogni pixel secondo la relazione:

$$\varepsilon = \varepsilon_V * P_V + \varepsilon_S * (1 - P_V)$$

consentendo infine di ricavare il valore della temperatura superficiale degli oggetti a terra dai valori di radianza *Top of Atmosphere* ottenuti dall'applicazione del metodo di correzione atmosferica *In - Scene Atmospheric Compensation* ai valori di radianza al sensore del prodotto L1B [70].

5.8 Software per l'elaborazione delle immagini

Per analizzare le immagini sono necessari differenti *softwares*:

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 85: 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.

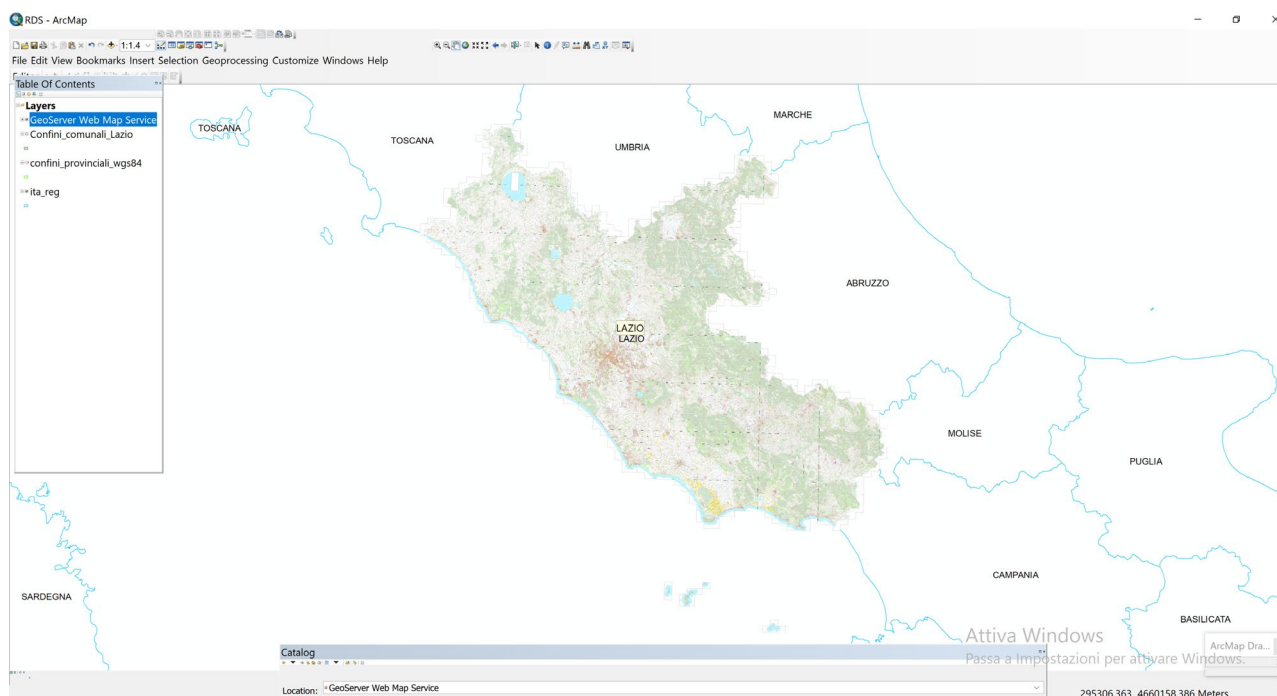


Figura 85. Interfaccia del Software ENVI 5.6 . Visualizzazione in *wms (world map service)* della CTRN 2014 *raster* a colori della Regione Lazio

E' 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 sara' utilizzato *Arcgis* 10.0 di *Esri* (Figura 86).

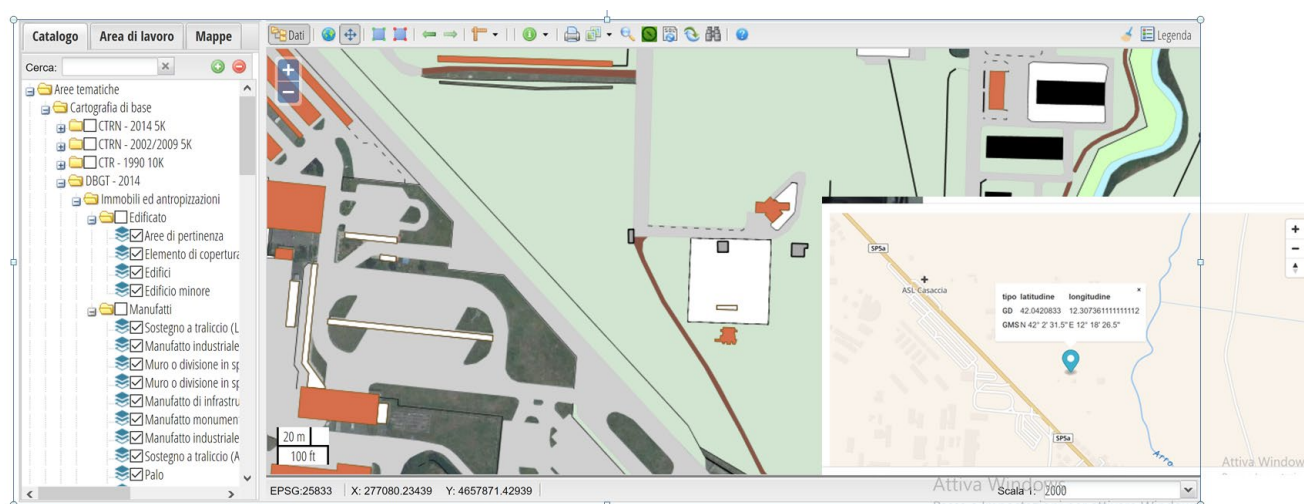


Figura 86 Geolocalizzazione dell'edificio prototipo di parete e tetto verde dell'ENEA

5.9 Materiale selezionato

In questa prima fase dello studio si stanno utilizzando immagini *Radar Sentinel-1A* e immagini multispettrale *Sentinel-2°*, *free data*, che ricoprono la principale area di analisi cioè dell'edificio prototipo di tetto e pareti verdi dell'ENEA.

I dati sono stati scaricati gratuitamente dagli appositi server di ESA e Sentinel hub EO Browser, disponibili agli indirizzi web <https://scihub.copernicus.eu> e <https://apps.sentinel-hub.com> che si presentano con la seguente interfaccia (Figura 87 e Figura 88).

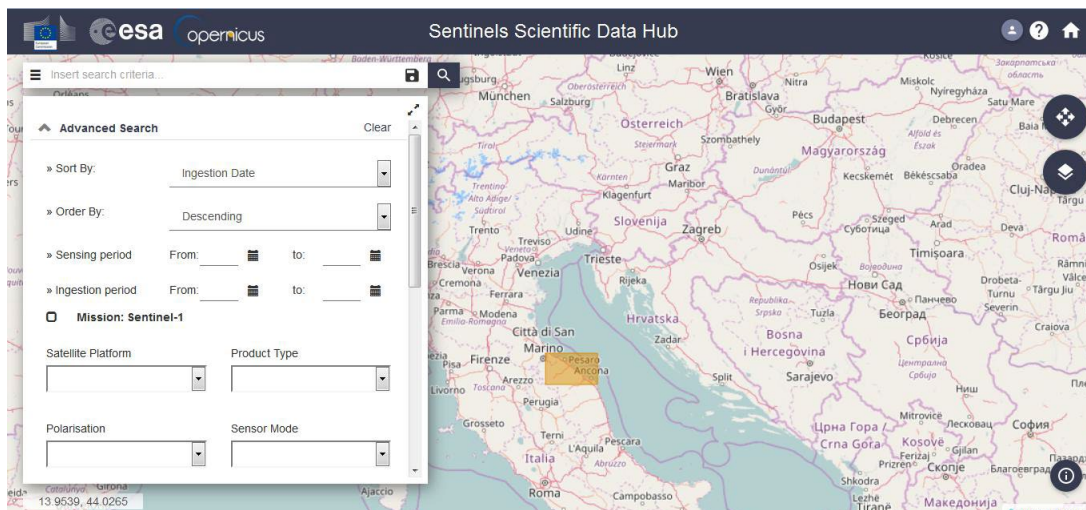


Figura 87. Interfaccia grafica SciHub (scihub.copernicus.eu)

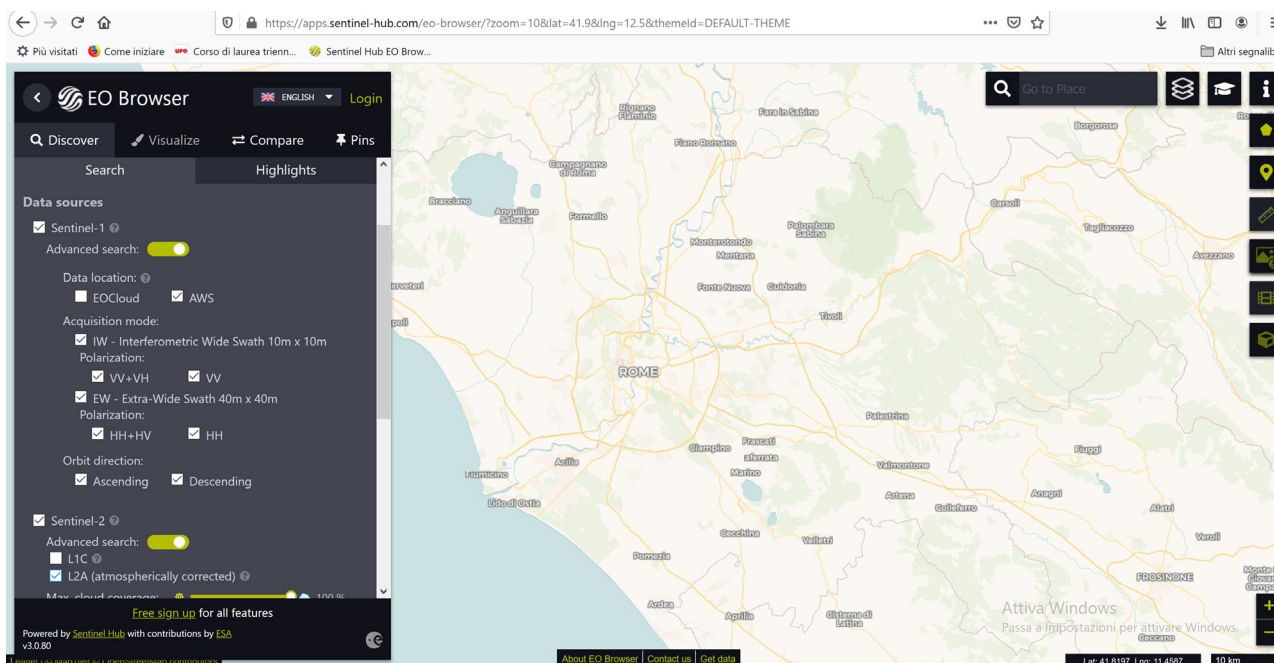


Figura 88. Interfaccia grafica Sentinel hub EO Browser

In entrambi è possibile selezionare l'area di interesse (rettangolo giallo al centro dello schermo) e svolgere una ricerca avanzata grazie alla finestra sulla sinistra dello schermo dalla quale è possibile scegliere la missione, il livello di pre-trattamento del dato, modalità e periodo di acquisizione, polarizzazione (S1) e copertura nuvolosa

5.10 Pre-elaborazione dei dati di Sentinel 1 e 2 acquisiti

Le immagini scaricate dai server di ESA, soprattutto l'immagine SAR, non sono utilizzabili direttamente per la classificazione in ENVI. Per questo è necessario che vengano eseguite alcune operazioni di *pre-processing*.

I dati radar utilizzati per raggiungere gli obiettivi prefissati dallo studio sono immagini acquisite in modalità *Interferometric Wide Swath Mode (IW)* con una risoluzione di 5x20 m e in doppia polarizzazione VV e VH.

Il *pre-processing* dell'immagine Radar è stato svolto tramite il software SNAP 4.0 per poter apportare correzioni radiometriche e geometriche.

L'immagine Radar Sentinel-1 di livello 1-GRD non comprende le correzioni radiometriche che si rendono necessarie al fine di poter effettuare valutazioni quantitative, per il confronto con immagini radar del medesimo sensore acquisite in tempi diversi o con modalità differenti e per il confronto con immagini acquisite da altri sensori.

Il valore dei DN dei pixel dell'immagine di livello 1-GRD rappresenta la magnitudine misurata (il valore di ciascun pixel è scalato in proporzione alla radice quadrata della potenza), l'obiettivo della calibrazione dell'immagine SAR è quello di assegnare a ciascun pixel un valore che possa essere direttamente collegato al *backscatter* della zona illuminata (earth.esa.it).

Per la correzione radiometrica delle immagini S1 tutte le informazioni sono già contenute all'interno del prodotto sotto forma di vettore contenuto nella cartella delle annotazioni, questo permette di passare dai valori di intensità ai valori di σ^0 .

Le correzioni geometriche si rendono necessarie in quanto le variazioni della topografia della zona rappresentata causano una distorsione delle distanze nell'immagine SAR per tutti i punti che non sono acquisiti in posizione nadirale rispetto al sensore.

L'operatore "Range Doppler Terrain Correction" è stato impiegato proprio per compensare queste distorsioni in modo tale che l'immagine utilizzata rappresenti il più fedelmente possibile la morfologia della zona.

Nella seguente Figura 91 è rappresentata la geometria delle distorsioni in una immagine SAR.

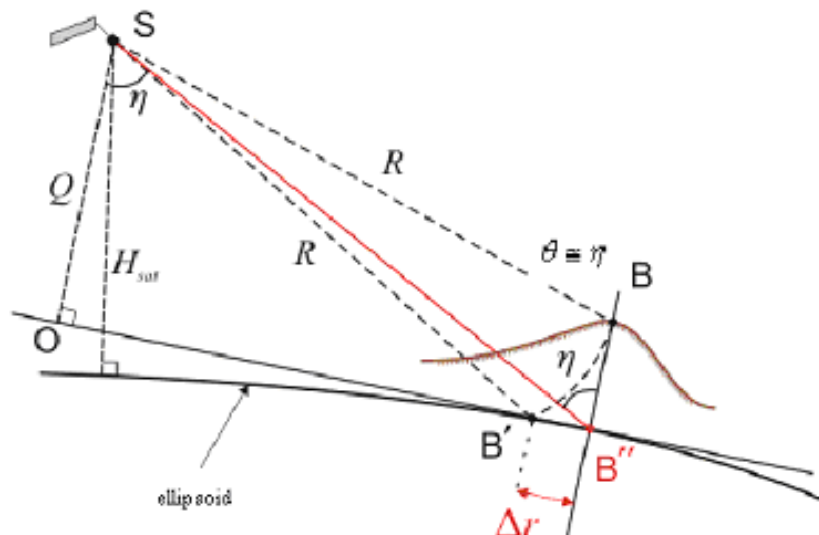


Figura 91. Geometria delle distorsioni in una immagine SAR (<http://earth.esa.it>)

Nella figura si vede come il punto B con elevazione h rispetto all'ellissoide di riferimento venga riportato sull'immagine nella posizione B' quando la sua reale posizione sarebbe B''. Lo scarto Δr tra B' e B'' rappresenta l'effetto di distorsione dovuto alla topografia dell'immagine.

L'algoritmo scelto genera un'immagine ortorettificata utilizzando un'immagine SAR simulata e un modello digitale di elevazione (DEM) tramite i seguenti passaggi:

- Simulazione SAR: viene generata un'immagine SAR simulata utilizzando un *DEM*, i vettori di geocodifica e delle orbite dell'immagine originale e una modellazione matematica della geometria delle immagini SAR. Si ottiene una immagine simulata con la stessa dimensione e risoluzione dell'immagine originale.
- Co-registrazione: l'immagine simulata e originale vengono co-registrate e viene prodotta una funzione *WARP* che fa corrispondere a ciascun pixel dell'immagine simulata la posizione nell'immagine originale.
- Correzione topografica: l'algoritmo associa a ciascuna cella del *DEM* la posizione del corrispettivo pixel nell'immagine simulata, dopodiché tramite la funzione *WARP* risale alla posizione all'interno dell'immagine originale. Infine il valore del *pixel* nell'immagine ortorettificata viene ottenuto dall'immagine originale per interpolazione.

Questo tipo di correzione permette di utilizzare dati di diversa provenienza e acquisiti con diverse geometrie di presa.

Eseguite le due operazioni descritte l'immagine ha una risoluzione di 10x10 metri, è stata tagliata creando il subset di dati necessario all'analisi ed esportata in formato *TIFF* (Figura 92 e Figura 93).

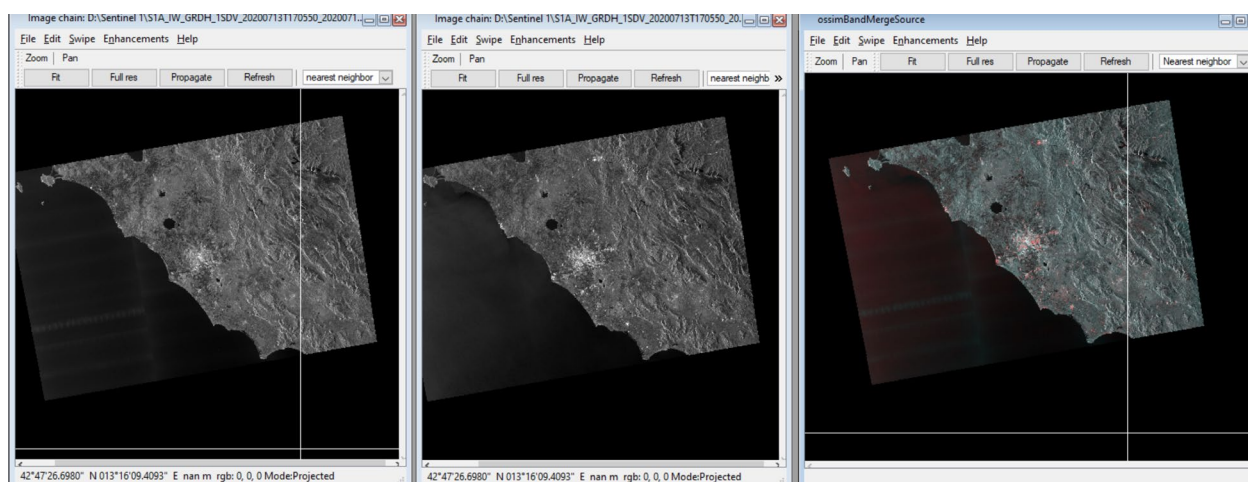


Figura 92. Visualizzazione banda VH (sinistra), Banda VV (centro) di Sentinel 1 loro fusione in unica banda, ossim band merge, destra; con terza immagine in visualizzazione RGB

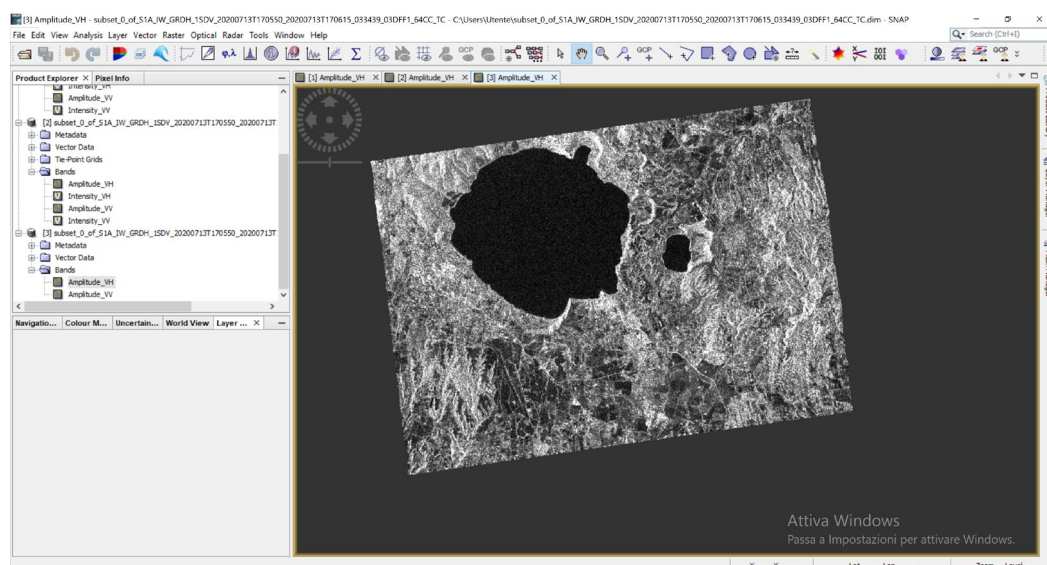


Figura 93. Subset dell'area di studio; amplitude VH

L'immagine multispettrale (13 bande) *Sentinel-2* viene fornita sia intera, sia scomposta sia in "granuli", per via di problemi di visualizzazione e gestione dell'immagine complessiva di diversi GB.

Si è scelto di utilizzare soltanto il solo granulo che ricopre l'area di interesse.

Nei prodotti di livello 1C i valori di *DN* dei *pixel* rappresentano la riflettanza *Top-Of-Atmosphere* pertanto non necessitano di ulteriori calibrazioni; inoltre le immagini sono georeferenziate e riferite all'ellissoide *WGS84*. Quindi non sono necessarie ulteriori procedure di calibrazione o correzione geometrica.

Il *preprocessing* del dato ottico, eseguito su *software SNAP 4.0*, si riduce ad una operazione di *resampling* per ottenere la risoluzione di 10x10 metri (la stessa dell'immagine SAR) in tutte le bande, quindi anche quelle con risoluzione di acquisizione più bassa.

Per eseguire il ricampionamento è stato scelto l'algoritmo *Nearest Neighbor* il quale associa ad ogni *pixel* dell'immagine in *output* il valore di *DN* del *pixel* più vicino nell'immagine in *input*. Successivamente è stato poi ottenuto il *subset* che ricopre soltanto l'area di interesse. Infine il *subset* ottenuto è stato esportato in formato *GeoTIFF*. Occorre tenere in considerazione che il ricampionamento aumenta considerevolmente la dimensione dell'immagine, esportata in formato *GeoTIFF*, mentre in origine le immagini sono fornite in formato *jpeg2000*.

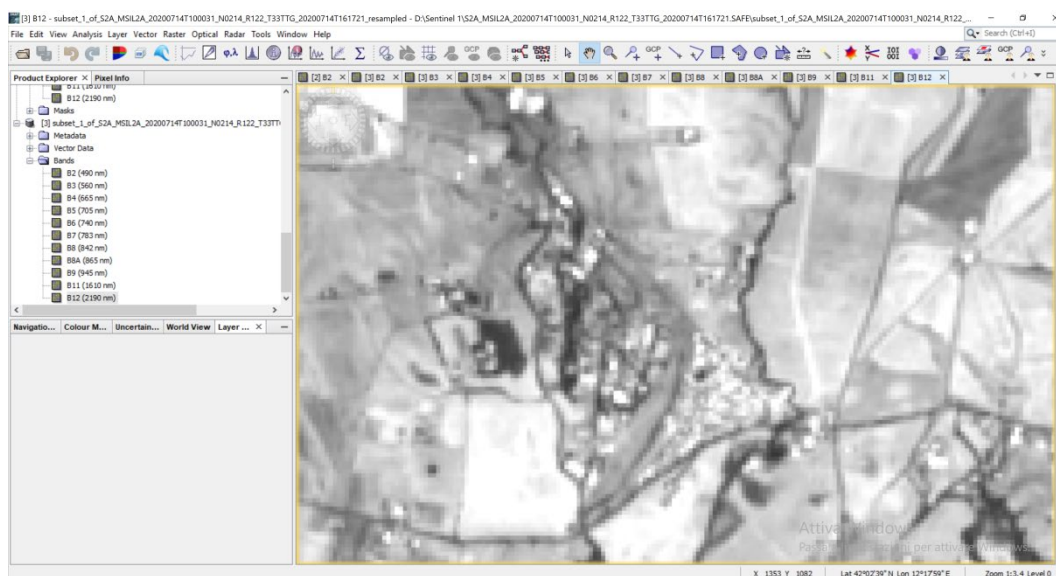


Figura 94. Subset zona di interesse in banda B12 (2190 nm) con risoluzione spaziale di 20 m

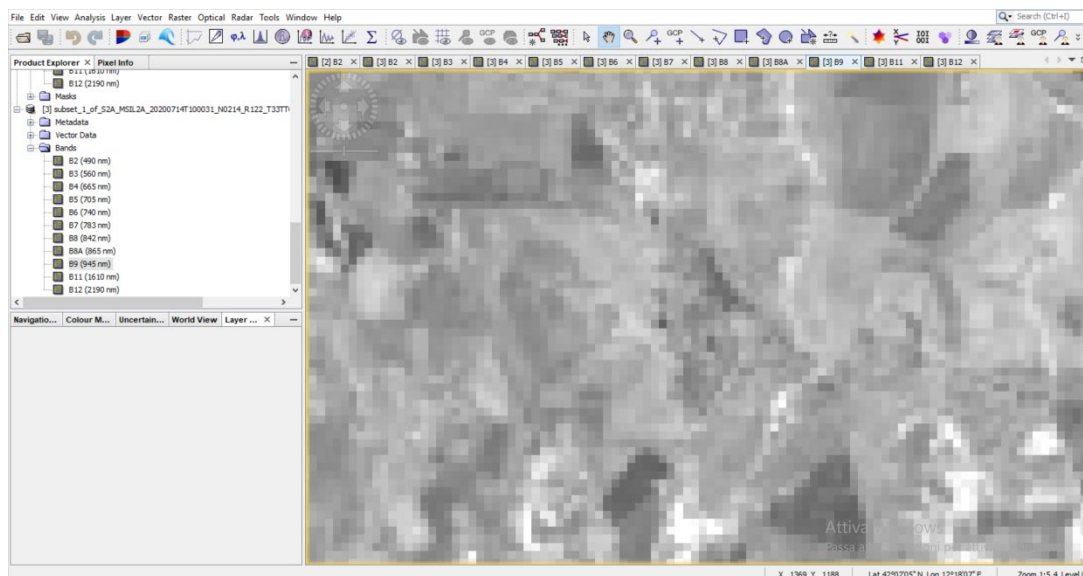


Figura 95. Subset zona di interesse in banda B9 (945 nm) con risoluzione spaziale di 60 m

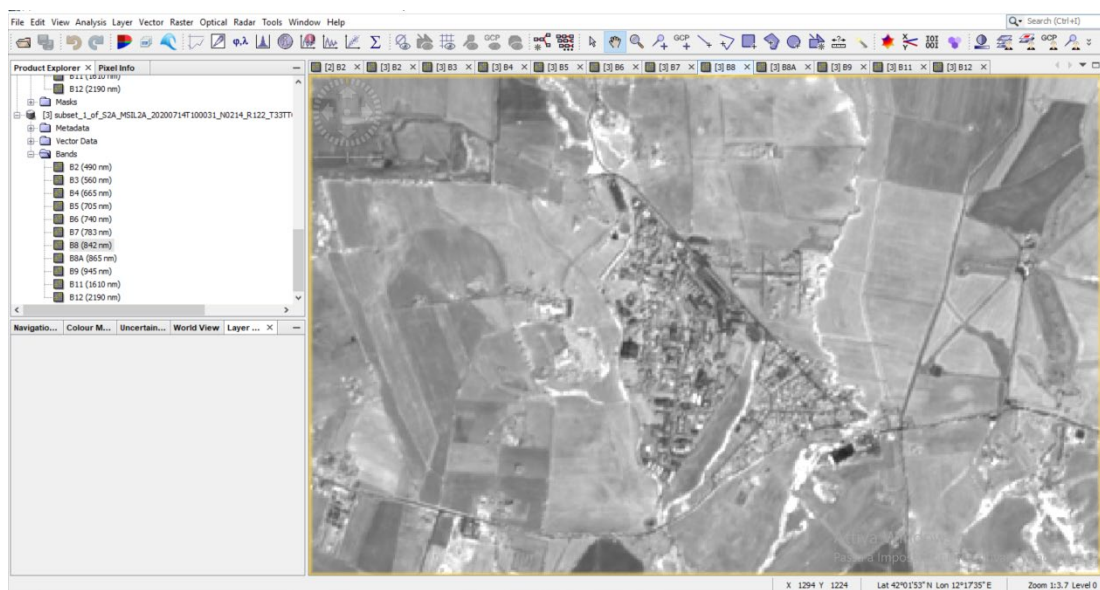


Figura 96. Subset zona di interesse in banda B8 (842 nm) con risoluzione spaziale di 10 m

6 Conclusioni

Le realizzazioni di coltri vegetali sugli edifici vengono considerate dei veri e propri componenti edilizi che mitigano il microclima delle aree urbane e il comfort interno degli edifici e risultano particolarmente efficaci durante i periodi di caldo intenso poiché le coperture verdi agiscono da strato isolante per le superfici dell'edificio. La ricerca sviluppata presso il CR ENEA Casaccia dal Lab DUEE-SIST-NORD (LA2.2) ha considerato le infrastrutture verdi (tetto verde e parete verde) ai fini del miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio prototipo rispetto alla diminuzione di energia elettrica per il condizionamento estivo, del microclima a livello ambiente (*outdoor* e *indoor*) e del clima/microclima a livello di area urbana. I principali risultati ottenuti attraverso le attività del secondo anno di sperimentazione RdS inerente la LA 2.2 sono stati i seguenti:

- l'analisi del monitoraggio della CO₂ sull'edificio a livello della parete verde durante l'anno 2020, ha evidenziato che le pareti verdi hanno esercitato la funzione fisiologica di assimilazione diurna della CO₂ come previsto;
- tale effetto è influenzato dalla posizione dell'edificio sperimentale localizzato in un'area verde, probabilmente sarebbe stato più evidente in un ambiente urbano dove è presente un maggior livello di inquinamento veicolare e industriale;
- un accumulo di CO₂ è stato rilevato nell'intercapedine, spazio tra la parete perimetrale e la copertura vegetale, in particolare sul versante Sud-Est probabilmente dovuto alla direzione dei venti incidenti;

Il prossimo anno proseguiranno le attività di monitoraggio al fine di ottimizzare le prestazioni energetiche ed ambientali di queste infrastrutture verdi, dove i numerosi diversi fattori contribuiscono ad un quadro molto complesso.

La sperimentazione per la quantificazione dei composti organici volatili appartenenti al gruppo dei BTEX a livello della parete proseguirà anche nel 2021 ed i primi risultati mostrano un effetto positivo della vegetazione disposta verticalmente sulla parete nella riduzione della CO₂ a livello delle foglie, rispetto ad una parete priva di vegetazione.

I dati relativi all'inverdimento delle pareti hanno messo in evidenza differenze in termini di radiazione solare incidente tra le due pareti verdi posizionate rispettivamente a Sud-Est e Sud-Ovest. L'effetto della schermatura della radiazione solare da parte dell'elemento vegetale sulla parete di Sud-Ovest risulta superiore rispetto alla parete di Sud-Est con differenze di temperatura superficiale delle facciate dell'edificio superiori ai 10 °C. Questa differenza si evidenzia con una maggiore riduzione del flusso termico incidente al quale si associa una stima maggiore del risparmio di energia elettrica per il condizionamento dell'ambiente interno corrispondente alla parete invertita. Per quanto riguarda il tetto, i dati mostrano differenze di temperatura superiori a 20 °C tra la superficie invertita e la superficie priva di verde, con forte accentuazione nei mesi più caldi. Tali differenze si riflettono sui flussi termici e sulle stime dei consumi di energia elettrica. I dati della sperimentazione sottolineano l'importanza di impiegare l'elemento vegetale come integrazione sostenibile nella riqualificazione e/o nella realizzazione di edifici ai fini sia di un maggiore comfort e sia per diminuire i consumi di energia elettrica per il condizionamento estivo nelle aree geografiche mediterranee caratterizzate da forte insolazione. L'inverdimento degli edifici, infatti, consente di produrre uno sfasamento dell'onda termica sull'edificio che ha come risultato la riduzione di elettricità per la climatizzazione tenuto conto che il picco di temperatura si verrebbe a spostare su temperature dell'aria meno elevate. In questo, la climatizzazione si potrebbe attivare in ore meno calde con benefici per il condensatore (macchina esterna) che lavorerebbe a temperature più favorevoli allo scambio termico. A livello del tetto verde è stata implementata la sensoristica climatico-ambientale ed è stata pianificata l'attività sperimentale per la stima dell'evapotraspirazione e della fotosintesi sulle piante del tetto, anche grazie ai risultati ottenuti dalle attività condotte in serra bioclimatica, che si svolgerà nel 2021. La valutazione in

contemporanea di due processi fisiologici fondamentali per le piante quali l'evapotraspirazione e la fotosintesi nelle condizioni del tetto verde in ambiente mediterraneo fornirà ulteriore conoscenza da mettere a disposizione degli operatori e delle imprese del settore. È stato evidenziato che differenti coperture vegetali possono esercitare effetti diversi sul livello d'isolamento termico del tetto; in particolare in estate si è visto come un prato a *Sedum* mantenga temperature superficiali inferiori rispetto a un prato a graminacee, oltre all'osservazione più generale rappresentata dalla riduzione delle temperature superficiali del tetto inverdito fino a 25°C nelle ore più calde.

Il monitoraggio dell'albedo del tetto verde, in relazione allo spessore della vegetazione, ha mostrato la necessità di sviluppare ulteriori monitoraggi e approfondimenti nel 2021, ai fini di comparare l'efficienza in termini di variazioni dell'albedo rispetto a differenti coperture vegetali.

Con l'introduzione di una serie di piante opportunamente scelte, la serra bioclimatica dell'edificio è stata convertita in "serra bioclimatica verde". La sperimentazione ha consentito di stimare la quantità di acqua evapotraspirata dalle piante, per vaso, per specie e per sistema complessivo verde in serra; ha dimostrato che l'uso degli ombreggianti, l'inserimento del "sistema verde" e la parziale apertura delle finestre permette di ridurre la temperatura dell'aria interna alla serra durante la stagione più calda (estate) grazie al fatto che parte dell'energia solare non viene assorbita dalle strutture ma passa come carico latente (evaporazione).

Si è proceduto alla raccolta ed analisi di scene satellitari dell'area in cui è collocato l'edificio prototipo, attingendo in prima battuta ai database free ed open di raccolte satellitari più recente costituzione. Si è avviata anche la procedura di nuove acquisizioni per il satellite iperspettrale italiano PRISMA. Le valutazioni della Temperatura di superficie (LST) sono in corso e secondo differenti approcci metodologici in funzione della risoluzione spettrale, geometrica e temporale delle scene satellitari che si vanno collezionando. Il limite maggiore è rappresentato dalla risoluzione geometrica che contrasta con le dimensioni dell'area sperimentale oggetto di studio e di aree tipo analoghe diffuse sul territorio nazionale: potrebbe pertanto prospettarsi la necessità di ricorrere a database satellitari commerciali notoriamente a risoluzione geometrica più spinta come *RapidEye*, *SPOT* e *Quickbird*.

In ultima analisi, la ricerca ed i risultati ottenuti sull'edificio dimostrativo hanno fornito risultati utili alla comprensione degli effetti della vegetazione sugli edifici in termini di risparmio di energia per la climatizzazione estiva oltre che sui possibili benefici rispetto al benessere e alla salute cittadini in termini di qualità ambientale. La ricerca su queste tematiche è ancora in corso e si ritiene che esistano ancora dei gap importanti da colmare prima di apprezzare in modo più realistico gli impatti della vegetazione e, più in generale, i benefici delle soluzioni naturali per gli edifici su una scala più ampia di distretto urbano, i.e.: quartiere, area urbana limitata, condominio.

7 Bibliografia

- [1] «Le infrastrutture verdi e i servizi ecosistemici in Italia come strumento per le politiche ambientali e la green economy: potenzialità, criticità, proposte. La natura dell'Italia. Biodiversità e aree protette: la green economy per il rilancio del paese,» Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2013.
- [2] C. Campiotti , . P. De Rossi, G. Giagnacovo e A. Latini , «Efficienza energetica eco-sostenibile per la rigenerazione delle città.,» *Energia, Ambiente e Innovazione*, 3/2020. DOI: 10.12910/EAI2020-076.
- [3] L. Sturiale e A. Scuderi, «The role of green infrastructures in urban planning for climate change adaptation.,» *Climate* 7:119, 2019.
- [4] J. S. Amthor, «Respiration and Carbon Assimilate Use,» n. In book: *Physiology and Determination of Crop Yield Chapter: Publisher: American Society of Agronomy*. DOI:10.2134/1994.physiologyanddetermination., 1994.
- [5] X. Liukang e D. D. Baldocchi, «Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California.,» 2004.
- [6] W. L. Bauerle, R. Oren e Q. Way Danielle A., «Photoperiodic regulation of the seasonal pattern of photosynthetic capacity and the implications for carbon cycling.,» Vol. %1 di %2PNAS May 29, 2012 109 (22) 8612-8617; <https://doi.org/10.1073/pnas.1119131109>, 2012.
- [7] Atkin Owen K., Q. Zhang e . J. Wiskic T., «Effect of Temperature on Rates of Alternative and Cytochrome Pathway Respiration and Their Relationship with the Redox Poise of the Quinone Pool,» vol. *Plant Physiol*, 2002.
- [8] S. Lee, M. Chiu , K. Ho , S. Zou e . X. Wang, «Volatile organic compounds (VOCs) in urban atmosphere of Hong Kong. *Chemosphere*,» Vol. %1 di %248: 375–82. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00040-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00040-1), 2002.
- [9] A. Bolden, C. Kwiatkowski e T. Colborn, «New look at BTEX: Are ambient levels a problem? *Environ Sci Technol*. 2015;», vol. 49(9): 5261–76. <https://doi.org/10.1021/es505316f>, 2015.
- [10] R. Montero-Montoya, R. López-Vargas e Arellano-Aguila, «Volatile Organic Compounds in Air: Sources, Distribution, Exposure and Associated Illnesses in Children. *Ann Glob Health*,» Vol. %1 di %284(2):225-238. <https://doi.org/10.29024/aogh.910>, 2018.
- [11] P. Romagnoli , C. Balducci , M. Perilli e A. Cecinato , «Idrocarburi aromatici volatili in ambienti indoor e outdoor a Roma. Poster CNR,», vol. *Istituto sull'Inquinamento Atmosferico*.
- [12] A. AA e S. Shah , «Association between personal exposure to volatile organic compounds and asthma among US adult population. *Int Arch Occup Environ Health*,» Vol. %1 di %280: 711–19. <https://doi.org/10.1007/s00420-007-0183-2>, 2007.
- [13] B. M. Aynul , W. Kindzierski e D. Spink, «Twelve-year trends in ambient concentrations of volatile organic compounds in a community of the Alberta Oil Sands Region, Canada. *Environ Int*,» vol. 91: 40–50. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.015>, 2016.
- [14] . S. Batterman, . F.-C. Su, S. Li, B. Mukherjee e . C. Jia, «Personal Exposure to Mixtures of Volatile Organic Compounds: Modeling and Further Analysis of the RIOPA Data. *Resp Rep Health Eff Inst.*,» vol. 181:3–63., 2014.
- [15] P. Serrano-Trespalacios , L. Ryan e J. Spengler , «Ambient, indoor and personal exposure relationships of volatile organic compounds in Mexico City Metropolitan Area. *J Exposure Anal Environ Epidemiol*,» vol. 14: S118–S132. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500366>, 2004.
- [16] «Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale Veneto (ARPAV). Relazione sulla qualità dell'aria,» vol. *Provincia di Verona. Relazione tecnica 01/2016.*, Anno 2015.
- [17] R. Grote, R. Samson, R. Alonso, J. Amorin, P. Carinanos, G. Churkina, S. Fares, D. Le Thiec, U. Nlinemets, T. Mikkelsen, E. Paoletti, A. Tiwary e C. Calfapietra, « Functional traits of urban trees: air pollution mitigation potential. *Front Ecol Environ*,» *Front Ecol Environ*, vol. 14, pp. 543-550, 2016.

- [18] S. N. Singh e A. Verma, «Phytoremediation of Air Pollutants: A Review,» *Environmental Bioremediation Technologies*, pp. 293-314, 2007.
- [19] K. Omasa, H. Saji, S. Youssefian e N. Kondo, *Air pollution and plant Biotechnology érspects for Phytomonitoring and Phytoremediation*, Springer, 2012.
- [20] L. Chen , C. Liu, Z. Rui , Y. Mao e Z. Zhang, «Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filterof particulate matters in the urban environment,» *Environmental Pollution*, vol. 208, pp. 198-208, 2016.
- [21] R. Baraldi, F. Rapparini, S. Tosi e S. Ottoni, «NEW ASPECTS ON THE IMPACT OF VEGETATION IN URBAN ENVIRONMENT Acta Horticulturae 881 10.17660/ActaHortic.2010.881.88,» *Acta Horticultura*, vol. 881, n. 10.17660/ActaHortic.2010.881.88, 2010.
- [22] A. Sæbøa , R. Popek, B. Nawrot, H. M. Hanslim, H. Gawronska e S. W. Gawronska, «Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces,» *Science of the Total Environmen*, vol. 15, pp. 347-354, 2012.
- [23] J. Whittinghill, D. B. Rowe, R. Schutzki e B. M. Gregg, «Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems,» *Landscape and Urban Planning*, vol. 123, pp. 41-48, 2014.
- [24] T. Blanusa, F. Fantozzi, F. Monaci e R. Bargagli, « Leaf trapping and retention of particles by holm oak and other common tree species in Mediterranean urban environments. Urban For. Urban Green., 14:1095-1101, 10.1016/j.ufug.2015.10.004,» *Urban For. Urban Green.*, vol. 14, n. 10.1016/j.ufug.2015.10.004, pp. 1095-110, 2015.
- [25] R. Baraldi, L. Neri, F. Costa, O. Facini, F. Rapparini e G. Carriero, «Ecophysiological and micromorphological characterization of green roof vegetation for urban mitigation.,» *Urban For. Urban Green.*, vol. 37, n. doi: 10.1016/j.ufug.2018.03.002, p. 24–32, 2018.
- [26] Y. Barwise e P. Kumar, «Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: a practical review for appropriate species selection,» *Clim. Atmos. Sci.*, vol. 3, pp. 12-, 2020.
- [27] L. Sillar-Powell, M. J. Tallis e M. Fowler, «Road Verge Vegetation and the Capture of Particulate Matter Air Pollution.,» *Environments*, vol. 7, n. <https://doi.org/10.3390/environments7100093>, p. 93, 2020.
- [28] P. H. Freer-Smith, K. P. Beckett e G. Taylor, «. Deposition velocities to Sorbus aria, Acer campestre, populus deltoides Trichocarpa "Beaupre", Pinus nigra an- Cupressocyparis leylandii-for-coarse, fine and ultra fine partycles in the urban environment.,» *Environ.Pollut*, vol. 133, pp. 157-167, 2005.
- [29] J. Mazur, « Plants as natural anti-dust filters–preliminary research.,» *Technical Transactions,,* n. doi.org/10.4467/2353737XCT.18.045.8340, 2018.
- [30] K. Perini, M. Ottele, S. Giulini, A. Magliocco e E. Roccotiello, «Quantification of fine dust deposition on different plant species in a vertical greening system,» *Ecological Engineering*, vol. 100, pp. 268-276, 2017.
- [31] C. N. Hewitt, K. Ashworth, A. Boynard, B. Guenther, B. Langford, A. R. MacKenzie, P. K. Misztal, E. Nemitz, S. M. Owen, M. Possell, T. M. Pugh, A. C. Ryan e O. Wild, «Ground-level ozone influenced by circadian control of isoprene emissions,» *Nature Geoscience*, vol. 4, pp. 671-674, 2011.
- [32] C. Calfapietra, S. Fares, F. Manes, A. Morani, G. Sgrigna e F. Loreto, «Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: A review,» *Environmental Pollution*, vol. 183, pp. 71-80, 2013.
- [33] C. 2. final, « “Infrastrutture verdi – Rafforzare il capitale naturale in Europa”».
- [34] final}, {SWD(2019) 184, «Riesame dei progressi compiuti nell'attuazione della strategia dell'UE per le infrastrutture verdi.».
- [35] C. Campiotti , . L. Consorti, G. Giagnacovo e A. Latini , «Caratterizzazione di tipologie di sistemi vegetali per migliorare l'efficienza energetica degli edifici nella città metropolitana.,» Report RdS/PAR2015/141.
- [36] C. Campiotti , A. Cancellara , L. Consorti L., G. Giagacovo, S. Marani, . L. Nencini, L. Pazzola , G. Puglisi e M. Scoccianti , «L'uso della vegetazione per aumentare l'efficienza energetica degli edifici e l'impiego di sistemi di climatizzazione rinno,» Report RdS/PAR2017/08..

- [37] G. Parolini , A. Del Monaco e D. Fontana , «“Fondamenti di Fisica Tecnica” – Ed. Utet 1983».
- [38] H. E. Beck, N. Zimmermann, T. R. McVicar, N. Vergopolan , A. Berg e E. Wood , «Data Descriptor: Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolutionSCIENTIFIC DATA,» 5:180214 DOI: 10.1038/sdata.2018.214, 2018.
- [39] S. Krayenhoff e J. A. Voogt, « Impacts of Urban Albedo Increase on Local Air Temperature at Daily–Annual Time Scales: Model Results and Synthesis of Previous Work,» 2010.
- [40] Santamouris, «Cooling the cities – A review of reflective and green roofmitigation technologies to fight heat island and improvecomfort in urban environments,» *Santamouris (2012). Cooling the cities – A review of reflective and green roofmitigation technologies to fight heat island and im Elsevier*, 2012.
- [41] T. R. Oke, «The energetic basis of the urban heat island.,» *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982.
- [42] K. Y. Kondratiev , Z. F. Mironova e A. N. Otto, « Spectral Albedo of Natural Surfaces.,» 1964.
- [43] J. Hulf, R. Hock e B. Holmgren, «Spatial and temporal variations in albedo on Storglaciären.,» 2017.
- [44] G. Allen, L. Pereira, D. Raes e M. Smith, «Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements),» vol. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998.
- [45] P. K. Rao, «Remote sensing of urban heat islands from an enviromental satellite,» *Bullettin of the American Metereological Society*, vol. 53, n. 7, p. 647, 1972.
- [46] B. Dousset 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.
- [47] C. Aniello, 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.
- [48] A. Mathew, 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.
- [49] F. Kong, 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.
- [50] H. Taha, 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.
- [51] S. Oliveira, 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] Hung, Tran, Uchiham, 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.
- [56] M. Tiangco, 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.

- [57] Gherraz e Alkama, «L'estimation de l'impact des espaces verts et des surfaces d'eau sur le climat urbain et la tempeprature de surface du sol (MILA, ALGÉRIE),» *Rev. Roum. Géogr./Rom. Journ. Geogr.*, vol. 2, n. 64, pp. 155-174, 2020.
- [58] Q. D., A. Prakash, M. Eneva, R. Wright, D. Hall, M. Anderson, W. Kustas, R. G. Allen R. G., T. Pagano e M. F. Coolbaugh, *Manual of Remote Sensing*, CRC Press, 2009.
- [59] J. A. Prata, 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.
- [60] F. Becker 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.
- [61] D. 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.
- [62] J. A. Voogt e T. R. Oke, «Effects of urban surface geometry on remotely-sensed surface temperature,» *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, 1998.
- [63] Campiotti C.A, P. De Rossi, G. Giagnacovo, A. Latini , S. Mariani, S. Pace, L. Nencini e M. Sperandei, «Infrastrutture “verdi” per migliorare l’efficienza energetica degli edifici e la qualità del microclima nelle aree urbane,» *Ricerca di Sistema*, Ministero dello Sviluppo Economico, 2019.
- [64] A. R. Gillespie, S. Rokugawa, T. Matsunaga, J. Cothorn , S. Hook e A. B. Kahle , «A Temperature and Emissivity Separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer ASTER images,» *EEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, p. 1113–1126, 1998.
- [65] S. J.A., J. C. Jiménez-Muñoz e L. Paolini, «Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 90, pp. 434-440, 2004.
- [66] 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.
- [67] C. T.N. e D. A. Ripley, «On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 62, p. 241– 252, 1997.
- [68] V. d. G. A.A. e M. Owe, «On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces,» *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, n. 6, 1993.
- [69] V. E. e Caselles V., «Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African and South American areas,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 57, pp. 167-184, 1996.
- [70] B. G. e Conte P., «Utilizzo del dato satellitare termico in ambito urbano: un caso di studio,» in *Atti 14a Conferenza Nazionale ASITA*, 2010.
- [71] ESA, « <https://www.copernicus.eu/it>,» [Online].
- [72] C. (. 5. final, «Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni. Una strategia dell'UE in materia di riscaldamento e raffreddamento».