



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., Gatti L., Giagnacovo G., Latini A., Mariani S., 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., Gatti L., Giagnacovo G., Latini A., Mariani S., Pace S., Sperandei M. (ENEA)

Con il contributo di: L. Colasuonno, E. Ferretti, F. Hugony, A. Marone, L. Nencini, P. Pistochini, F. Zanghirella (ENEA), L. Consorti (CIRPS-Centro Interuniversitario di Ricerca per lo Sviluppo Sostenibile)

Dicembre 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 - III 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: *LA2.3 - Infrastrutture “verdi” per migliorare l'efficienza energetica degli edifici e la qualità del microclima delle aree urbane – Anno 3*

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

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE	6
2 PARETE VERDE	8
2.1 VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEI SISTEMI VERDI NEL MITIGARE LA CONCENTRAZIONE DI CO ₂ NELL'ARIA CIRCOSTANTE	10
2.1.1 PARAMETRI CLIMATICI MEDI MENSILI DEL SITO SPERIMENTALE	11
2.1.2 PARAMETRI MICROCLIMATICI MEDI MENSILI NELL'AMBIENTE CIRCOSTANTE LE PARETI.....	12
2.1.3 PARAMETRI MICROCLIMATICI MEDI GIORNALIERI DELL'AMBIENTE CIRCOSTANTE LE PARETI.....	14
2.1.4 MONITORAGGIO DELLA CO ₂	15
2.1.5 CONCENTRAZIONE MEDIA MENSILE DELLA CO ₂	16
2.1.6 TENDENZA GIORNALIERA DELLA CONCENTRAZIONE DI CO ₂	16
2.2 LE INFRASTRUTTURE VERDI PER LA RIDUZIONE DELL'INQUINAMENTO DELL'ARIA: EFFETTO SUI COMPOSTI ORGANICI VOLATILI (COV)	19
2.2.1 EFFETTO DELLA PARETE VERDE	20
2.2.2 EFFETTO DEL TETTO VERDE	24
2.3 RELAZIONE DELLE COPERTURE VERDI SUI FLUSSI TERMICI ENTRANTI NELL'EDIFICIO PROTOTIPO.....	27
2.3.1 FLUSSO TERMICO.....	27
2.3.1.1 FLUSSI TERMICI: FACCIA VERDE SPERIMENTALE (ENEA)	31
2.3.2 MODELLIZZAZIONE DELL'EFFETTO DI UNA PARETE VERDE SULL'ABBATTIMENTO DEI FLUSSI TERMICI ENTRANTI IN UN EDIFICIO, DEFINIZIONE DEL KV*	33
2.3.2.1 CALCOLO DEL KV* PER LA SPECIE PARTHENOCISSUS QUINQUEIFOLIA	35
2.3.3 APPLICAZIONE DEL KV* PER STIMARE IL FLUSSO TERMICO ENTRANTE CON LA SCHERMATURA DI UNA PARETE VERDE.....	35
3 TETTO VERDE	39
3.1 EVOLUZIONE DEL TETTO VERDE NEL CORSO DEL 2021.....	39
3.2 MISURA DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE DELLE PIANTE SUL TETTO (SPERIMENTAZIONE VASI SUL TETTO).....	40
3.2.1 ALLESTIMENTO DEL SISTEMA "VERDE" SUL TETTO VERDE	40
3.2.2 MISURA DELL'EVAPOTRASPIRAZIONE SUL TETTO VERDE	42
3.2.3 EFFICIENZA DI ASSORBIMENTO DELLA RADIAZIONE LUMINOSA DA PARTE DEL SISTEMA VEGETALE SUL TETTO VERDE.....	44
3.2.4 CAPACITÀ PRODUTTIVA SUL TETTO VERDE E NELLA SERRA BIOCLIMATICA	45
3.3 SPERIMENTAZIONE SULL'ALBEDO	48
3.3.1 L'ALBEDO DELLE SUPERFICI	48
3.3.2 CASO STUDIO ENEA: ALBEDO E INFLUENZA DEI DATI BIOMETRICI DEL TETTO VERDE	50
3.4 PIANTE SPONTANEE SUI TETTI VERDI PER L'EFFICIENZA ENERGETICA DEGLI EDIFICI CON SALVAGUARDIA DELLA BIODIVERSITÀ DI FLORA E FAUNA	57
3.4.1 I TETTI VERDI FAVORISCONO LA BIODIVERSITÀ E LA SALVAGUARDIA DEGLI IMPOLLINATORI.....	57
3.4.3 ANALISI COMPARATIVA DELLE DUE SPECIE DI ECHIUM SUL TETTO VERDE ENEA	60
3.4.4 VANTAGGIO DELLE FORME ANNUALI NELL'AFFRONTARE LE AVVERSITÀ DELLA STAGIONE ESTIVA	62
3.4.5 RUOLO DELLA MANUTENZIONE DEL VERDE TRAMITE SFALCIO NEL DECLINO DI BIODIVERSITÀ.....	62
3.4.6 PROTEZIONE DELLA BIODIVERSITÀ VEGETALE E SALVAGUARDIA DELLE API	63
3.4.7 L'OPZIONE PER UN TETTO VERDE SPONTANEO E SECCO	64
3.5 MONITORAGGIO MENSILE DEL TETTO VERDE: CONFRONTO TRA LE TEMPERATURE SUPERFICIALI RILEVATE SOTTO DUE DIVERSE TIPOLOGIE DI COPERTURE VEGETALI E SUL TETTO PRIVO DI VEGETAZIONE (ANNO 2021) E CONFRONTO 2020-2021	65
3.5.1 CONFRONTO TRA I RISULTATI DEL MONITORAGGIO DELLE TEMPERATURE SUPERFICIALI SUL TETTO VERDE NEL 2020 E NEL 2021.....	88
3.6 FLUSSI TERMICI: TETTO VERDE SPERIMENTALE (ENEA)	94
4 SERRA BIOCLIMATICA.....	96
4.1 ALLESTIMENTO DEL SISTEMA "VERDE" ALL'INTERNO DELLA SERRA BIOCLIMATICA.....	96
4.2 IMPLEMENTAZIONE NELLA SERRA DEL SISTEMA DI ILLUMINAZIONE A LED	102
4.3 IMPLEMENTAZIONE DI PANNELLI FOTOVOLTAICI E DI UN INVERTER NELL'EDIFICIO F92	103
4.4 MISURA DELLA EVAPOTRASPIRAZIONE (ET) DELLE PIANTE	105
4.5 INFLUENZA DEL PROCESSO BIOLOGICO DI ET DEL SISTEMA VERDE NEI CONFRONTI DEL MICROCLIMA DELLA SERRA.....	108

4.6	EFFICIENZA DI ASSORBIMENTO DELLA RADIAZIONE LUMINOSA DA PARTE DEL SISTEMA VEGETALE.....	110
4.7	VALUTAZIONE DEI PARAMETRI MICROCLIMATICI IN RELAZIONE AI PERIODI DI CHIUSURA/APERTURA DEI SERRAMENTI E DEL SISTEMA DI OMBREGGIAMENTO NEL PERIODO ESTIVO, CON E SENZA VEGETAZIONE.....	114
4.8	STUDIO DELLO SCAMBIO CONVETTIVO TRA L'AMBIENTE SERRA E L'AMBIENTE INTERNO DELLA STANZA ADIACENTE, DOVUTI ALLA PRESENZA DEL SISTEMA VERDE, NEL PERIODO ESTIVO	118
5	VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA AMBIENTALE DI INFRASTRUTTURE VERDI ATTRAVERSO TECNICHE DI <i>REMOTE SENSING & GIS</i>	120
5.1	PREMESSA	120
5.2	NDVI	124
5.3	MATERIALI SELEZIONATI E REALIZZAZIONE DI MAPPE DI NDVI E DI LST.....	125
5.3.1	DATI PRISMA.....	126
5.3.2	DATI LANDSAT 8	133
5.3.3	DATI SENTINEL 2.....	137
5.3.4	MAPPE DI NDVI	141
5.3.5	MAPPE DI LST	146
6	CONCLUSIONI.....	151
7	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	154

Sommario

Nell'ambito dell'Accordo di Programma MISE-ENEA “*Ricerca di Sistema Elettrico*” (RdS), triennio 2019-2021, il Team ENEA del Laboratorio DUEE-SIST-NORD è stato impegnato sul tema delle soluzioni basate sulla natura (*nature-based solution*, NBS) per edifici, quali tetti e pareti verdi, al fine di valorizzarne l'impiego come elementi innovativi per migliorare la sostenibilità energetica ed ambientale delle città.

In questo report si riportano le attività di ricerca affrontate nel 2021, riguardanti la Linea di Attività LA2.3. Gli studi sulla **parete verde** hanno focalizzato sui dati di concentrazione della CO₂ registrati nei diversi punti di campionamento. È stato valutato, nel prototipo di parete verde in ENEA ed in una parete verde realizzata in un'area maggiormente urbanizzata, che la vegetazione contribuisce al miglioramento della qualità dell'aria, riducendo la quantità di sostanze volatili inquinanti come i BTEX. L'analisi dei flussi termici ha evidenziato il potenziale vantaggio di una superficie vegetata come schermatura naturale del flusso termico; inoltre, è stato formulato un modello sull'abbattimento dei flussi termici entranti in un edificio, attraverso una coltre vegetale verticale, che si basa su un indice “K_v”, specifico della vegetazione.

L'analisi dei flussi di calore tra **tetto verde** e stanza sottostante ha messo in evidenza che il verde riduce la trasmissione del calore verso il sottotetto, concedendo un risparmio energetico per la climatizzazione dell'ambiente *indoor* al di sotto. Sul tetto è stata eseguita una sperimentazione, in parallelo con la serra bioclimatica, per determinare la capacità evapotraspirativa di alcune piante orticole, producendo dati utili di crescita delle piante e *performance* agronomica per lo sviluppo e diffusione di tipologie di agricoltura urbana in città, su edifici, incluso il “Km zero”. L'albedo è stato analizzato sul tetto in funzione di differenti spessori del prato, diverse specie vegetali e diverse stagioni. È stato confermato un effetto differente di schermatura della radiazione solare e quindi di calore entrante attraverso il tetto dovuto alla specie vegetale. Lo studio parallelo triennale sull'utilizzo di alcune specie autoctone, adatte ai climi mediterranei, ha dimostrato con successo il loro impiego nei tetti verdi, favorendo la protezione della biodiversità vegetale e degli insetti impollinatori attualmente a rischio di estinzione.

In **serra bioclimatica “verde”** è stato installato un sistema di illuminazione a LED che ha stimolato una crescita ottimale delle piante. L'illuminazione artificiale, oltre all'effetto benefico sulle piante, ha consentito in estate la chiusura delle tende portando, anche nei momenti di maggiore irradiazione, ad un riscaldamento inferiore della serra bioclimatica rispetto a quanto registrato durante la scorsa sperimentazione del 2020.

È proseguita l'indagine delle principali piattaforme di immagini telerilevate per individuare i set di dati più adatti in termini di risoluzione spaziale, spettrale, radiometrica e temporale ad evidenziare come le infrastrutture verdi influenzino le dinamiche della radiazione termica e quanto siano correlate le caratteristiche delle superfici verdi e la temperatura nelle vicinanze. Sono state realizzate mappe *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) su base dati *PRISMA*, *Landsat 8* e *Sentinel 2* per l'area oggetto di studio e mappe *LST* (*Land Surface Temperature*) pre- e post- installazione dei prototipi ENEA di tetto e parete verde.

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 di pianificazione e 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 [4].

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 stati: *i*) parete verde, *ii*) tetto verde e *iii*) serra bioclimatica “verde”.

Le attività della linea LA2.2, riportate nel precedente Report RdS [5], hanno riguardato la raccolta e l’analisi dei dati microclimatici rispetto ai tre prototipi “verdi” in seguito all’implementazione dei sensori avvenuta per lo più durante il primo anno (Linea di Attività LA2.1, anno 2019). In questo report, relativo alla Linea di Attività LA2.3 del 2021, si riportano i risultati del monitoraggio dei diversi parametri microclimatici ed ambientali misurati e, a seguito della comparazione dell’andamento nei due precedenti anni registrati, si è tentato di estrapolarne delle conclusioni più significative, sostenute dalla lunga osservazione dei numerosi parametri.

Sulla **parete verde** si è proseguito col monitoraggio della CO₂ e l’analisi dei dati in relazione ai principali parametri microclimatici, irrobustendo i risultati ottenuti nel 2020 per la valutazione della capacità di sequestro della CO₂ da parte della copertura vegetale. Inoltre, è proseguito lo studio sull’effetto della vegetazione parietale sulla riduzione dei BTEX tra i più diffusi composti organici volatili (COV), effettuando dei campionamenti oltre che a livello del CR ENEA Casaccia, anche a livello di infrastrutture verdi in un’area maggiormente urbanizzata a Roma. Non ultimo, sono stati ulteriormente valutati e definiti i flussi di calore entranti nell’edificio attraverso la parete verde, consentendo di quantificare il livello di energia termica risparmiata per la climatizzazione di una stanza chiusa adiacente alla parete.

Anche sul tetto verde sono stati ulteriormente riesaminati i flussi di calore tra il tetto e la stanza sottostante, permettendo una valutazione più accurata del livello di isolamento termico fornito dalla stratigrafia di un tetto verde e il risparmio energetico associato per la climatizzazione dell'ambiente indoor al di sotto. Nel terzo anno, è proseguito il monitoraggio microclimatico e delle temperature superficiali di contatto a livello della copertura di Sedum e della copertura a prato di Graminaceae. Non ultimo, sono stati perfezionati anche gli studi inerenti l'albedo, i BTEX e l'evapotraspirazione delle piante.

La sperimentazione condotta in **serra bioclimatica** "verde", a seguito dell'introduzione di un sistema vegetale già dallo scorso anno, ha avuto l'obiettivo principale di constatare se la quantità di acqua evapotraspirata dal sistema vegetale scelto fosse in grado di produrre un livello di raffrescamento misurabile, tanto all'interno della serra bioclimatica stessa che a livello della stanza adiacente. Nel corso della sperimentazione la serra è stata implementata con un sistema di illuminazione a LED per consentire uno sviluppo ottimale delle piante e proseguire la misura dell'evapotraspirazione, da parte della coltre vegetale, come fattore influenzante positivamente il microclima all'interno della serra e nella stanza adiacente.

Lo studio di *remote sensing* ha avuto l'obiettivo principale di verificare se l'indice di vegetazione *NDVI* (*Normalized difference vegetation index*) evidenzia il tetto e le pareti verdi dell'edificio prototipo nonostante le dimensioni contenute, stante le risoluzioni spaziali disponibili attualmente; in un secondo momento sono state realizzate le mappe di *LST* (*Land Surface Temperature*).

2 Parete Verde

L'evoluzione della copertura vegetale nel corso del 2021 sulla parete verde presente nel CR ENEA Casaccia viene mostrata attraverso alcune immagini scattate in vari mesi (Figura 1).

a. Parete esposta a Sud-Ovest



b. Parete esposta a Sud-Est



febbraio 2021

Maggio 2021



Luglio 2021



Ottobre 2021



Dicembre 2021



Figura 1. Evoluzione della copertura vegetale della parete verde presente nel CR ENEA Casaccia nel corso del 2021

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

La CO₂ contribuisce al fenomeno “isola di calore” nelle aree urbane assorbendo la radiazione infrarossa a onde lunghe e purtroppo la sua concentrazione nell'atmosfera è in costante aumento dall'epoca preindustriale, il valore medio a gennaio 2022 ha raggiunto i 418.19 ppm come riportato nel sito di riferimento di Mauna Loa, Hawaii [6]. Le pareti verdi non possono sicuramente risolvere i problemi dovuti all'urbanizzazione e alla diminuzione delle aree verdi nelle città, tuttavia possono contribuire ad una strategia più ampia volta alla mitigazione del cambiamento climatico nell'ambiente edificato [7]. Le piante infatti agiscono in modo diretto sulla concentrazione della CO₂ attraverso i due processi di fotosintesi e di respirazione. La fotosintesi avviene solo durante il giorno, porta al sequestro di CO₂ e utilizza la radiazione luminosa, in particolare la frazione PAR (*photosynthetic active radiation*) (400 -700 nm), 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 sia di giorno che di notte, in condizioni adeguate di umidità e temperatura [8]. A seguito di ciò nel 2021 è proseguito il progetto di monitoraggio della CO₂ presso la piattaforma sperimentale del centro ENEA-Casaccia volto a determinare l'effetto delle pareti verdi sulla concentrazione di questo gas serra nell'ambiente circostante l'edificio. Il sistema di raccolta dati è lo stesso ampiamente illustrato nel rapporto RdS relativo al 2020 [5]. In Figura 1 viene riportata un'immagine delle due pareti verdi e la loro precisa collocazione geografica. Le piante presenti sulle pareti sono le stesse del 2020. L'infrastruttura di supporto della vegetazione è ancorata a circa 60 cm dalle pareti strutturali dell'edificio determinando in questo modo una ventilazione naturale tra la parete verde e la parete dell'edificio ed è dotata di un sistema di irrigazione automatico per limitare l'uso dell'acqua.

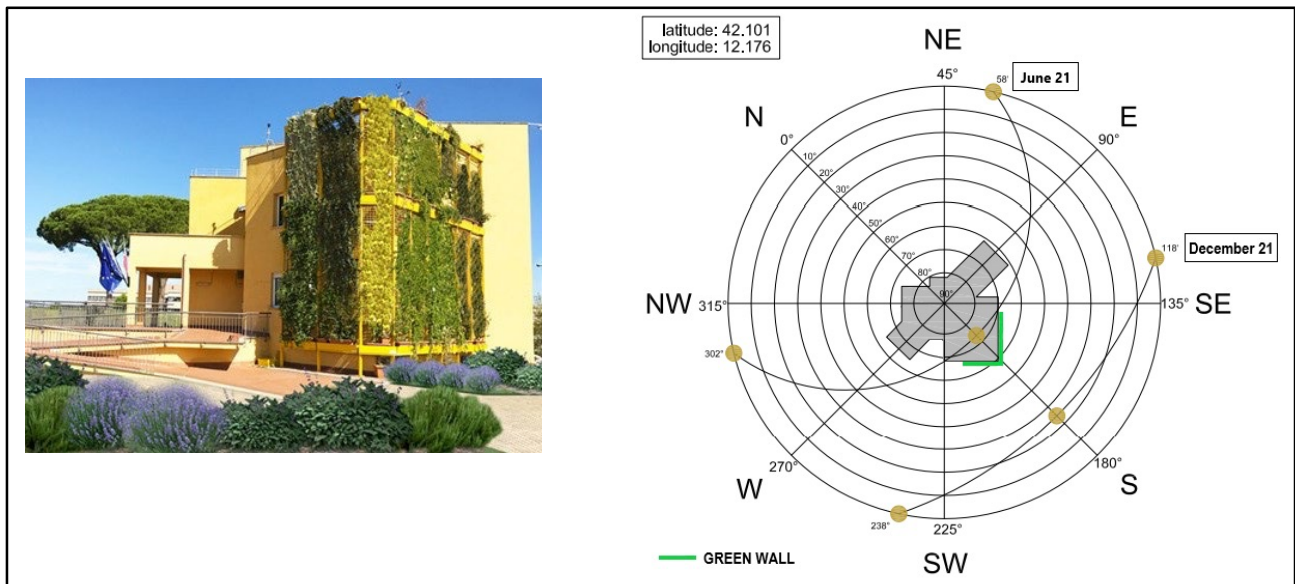


Figura 1. Le due pareti verdi a Sud-Ovest (sinistra) e Sud- Est(destra).

L'andamento della concentrazione di CO₂ è stato analizzato su scala temporale stagionale e giornaliera considerando anche in particolare i parametri climatici che influenzano la miscelazione atmosferica (velocità e direzione del vento) [9]. L'analisi relativa alla variazione stagionale si focalizza sui due mesi centrali delle stagioni prese in esame, per evitare i periodi di transizione da una stagione all'altra. L'analisi della variazione giornaliera prende in esame un giorno per ogni mese. L'insieme dei dati ottenuti nel 2021 viene messo a confronto con i dati del 2020 nel tentativo di evidenziare delle analogie per l'ottimizzazione dell'uso delle pareti verdi.

2.1.1 Parametri climatici medi mensili del sito sperimentale

L'assorbimento della CO₂ varia con le caratteristiche della specie vegetale ma anche con il variare delle condizioni ambientali. Ne segue che è quindi necessario tenere ben presenti le condizioni ambientali del luogo in cui la struttura è inserita.

I sensori per monitorare le variabili ambientali del sito sperimentale (radiazione globale, GR; temperatura dell'aria, AT; umidità relativa, RH; velocità e direzione del vento, WS e WD) sono posizionati sul tetto dell'edificio, le loro caratteristiche sono riportate nel rapporto tecnico RdS relativo al 2020 [5]. Osservando Figura 2 e Figura 3, anno 2021 e 2020 rispettivamente, che riportano i valori medi mensili dei parametri climatici delle stagioni prese in esame, si notano dei valori simili per quanto riguarda la radiazione globale, la temperatura e l'umidità relativa. Diversamente la velocità del vento risulta in media abbastanza più elevata nel 2021, solo in febbraio si nota un valore più alto nel 2020. Interessante notare che nel sito sperimentale, sia nel 2020 che nel 2021 la direzione del vento in media è compresa tra Sud-Ovest e Ovest (225° e 270°).

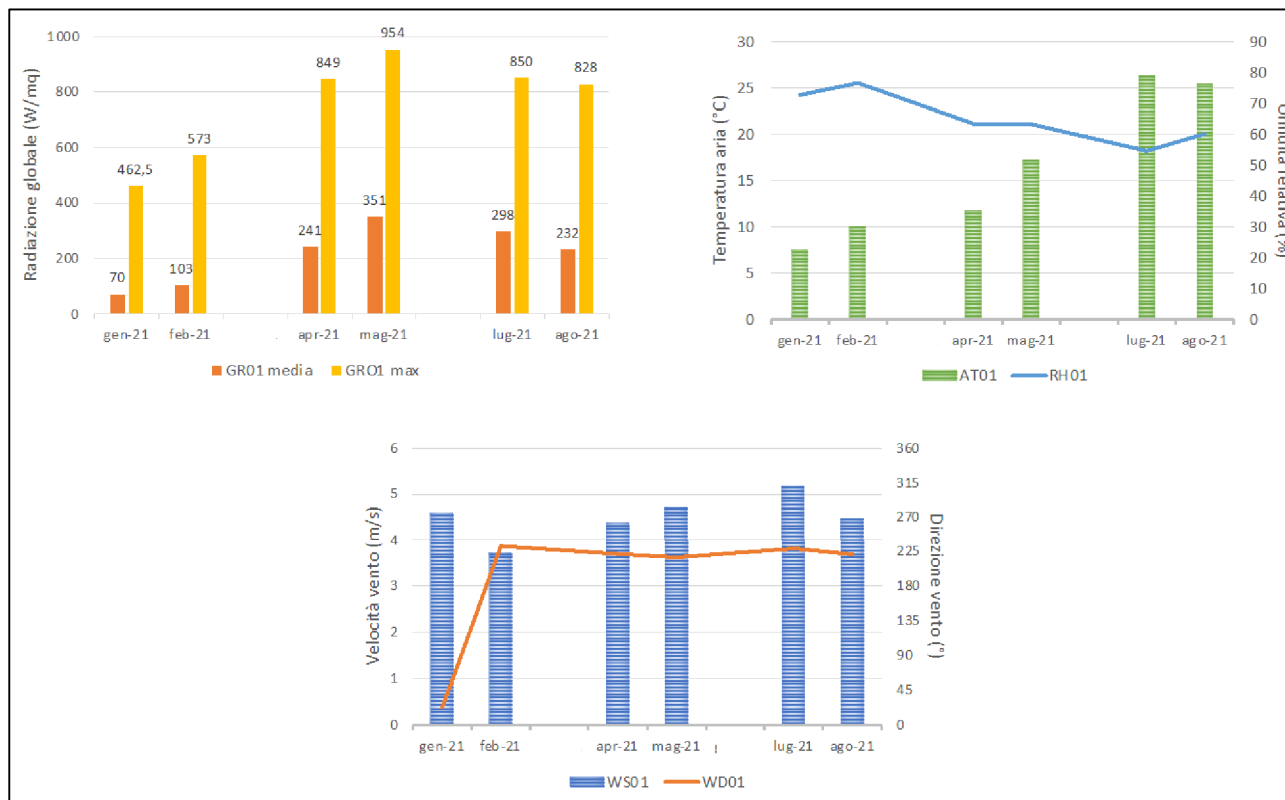


Figura 2. Dinamica delle variabili meteorologiche nel sito sperimentale per l'anno 2021.

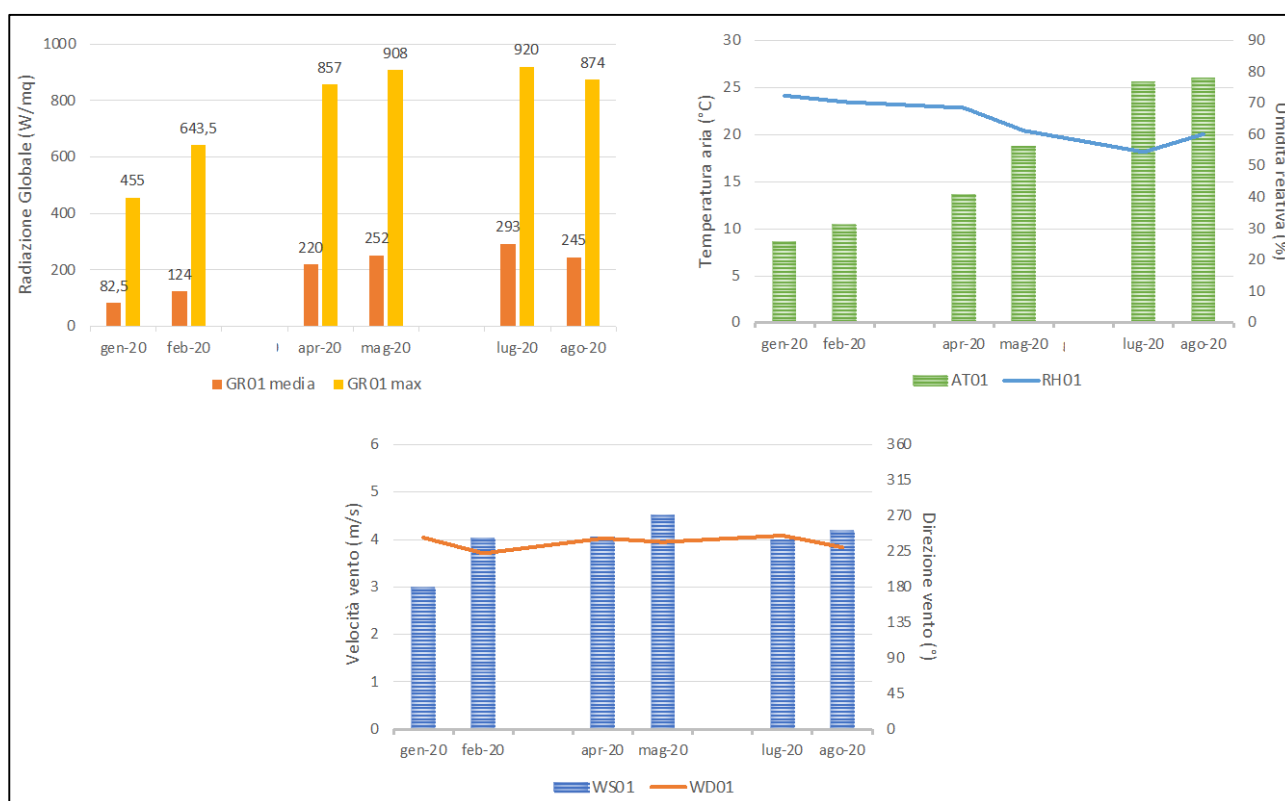


Figura 3. Dinamica delle variabili meteorologiche nel sito sperimentale per l'anno 2020.

2.1.2 Parametri microclimatici medi mensili nell'ambiente circostante le pareti

Considerato che lo scopo di questo studio era valutare l'influenza delle pareti verdi sulla concentrazione della CO₂ nell'ambiente circostante sono stati monitorati i parametri microclimatici che principalmente possono incidere sul valore di questa grandezza: la radiazione solare e la ventilazione (velocità e direzione). In Tabella 1 sono riportati i sensori e la loro collocazione

Tabella 1	
Sensori climatici	Collocazione
Radiazione globale (GR02)	Esterno parete Sud-Ovest
Radiazione globale (GR04)	Esterno parete Sud-Est
Velocità vento (WS02)	Intercapedine parete Sud-Ovest 1° piano
Velocità vento (WS04)	Intercapedine parete Sud-Est 1° piano
Direzione vento (WD02)	Intercapedine parete Sud-Ovest 1° piano
Direzione vento (WD04)	Intercapedine parete Sud-Est 1° piano

Nella Figura 4 e Figura 5 sono riportati i valori medi mensili monitorati durante i due anni presi in esame. In entrambi i casi la radiazione globale è maggiore sulla parete a Sud-Est. Diversamente la velocità del vento è maggiore nell'intercapedine della parete a Sud-Ovest, questo può essere in accordo con la direzione del vento nel sito sperimentale che generalmente soffia tra Sud-ovest e Ovest. Per quanto riguarda la direzione del vento all'interno dell'intercapedine la maggiore variazione si nota, per entrambi gli anni all'interno dell'intercapedine della parete a Sud-Est. In questa area si passa da una direzione tra Sud-Est e Sud (135°-180°) fino ad aprile ad un cambiamento netto tra Sud-Ovest e Nord-ovest nei mesi successivi. Considerato che il periodo primavera-estate è quello di maggiore inverdimento, questo comportamento potrebbe dipendere dall'aumento del fogliame che offre una diversa resistenza al flusso del vento.

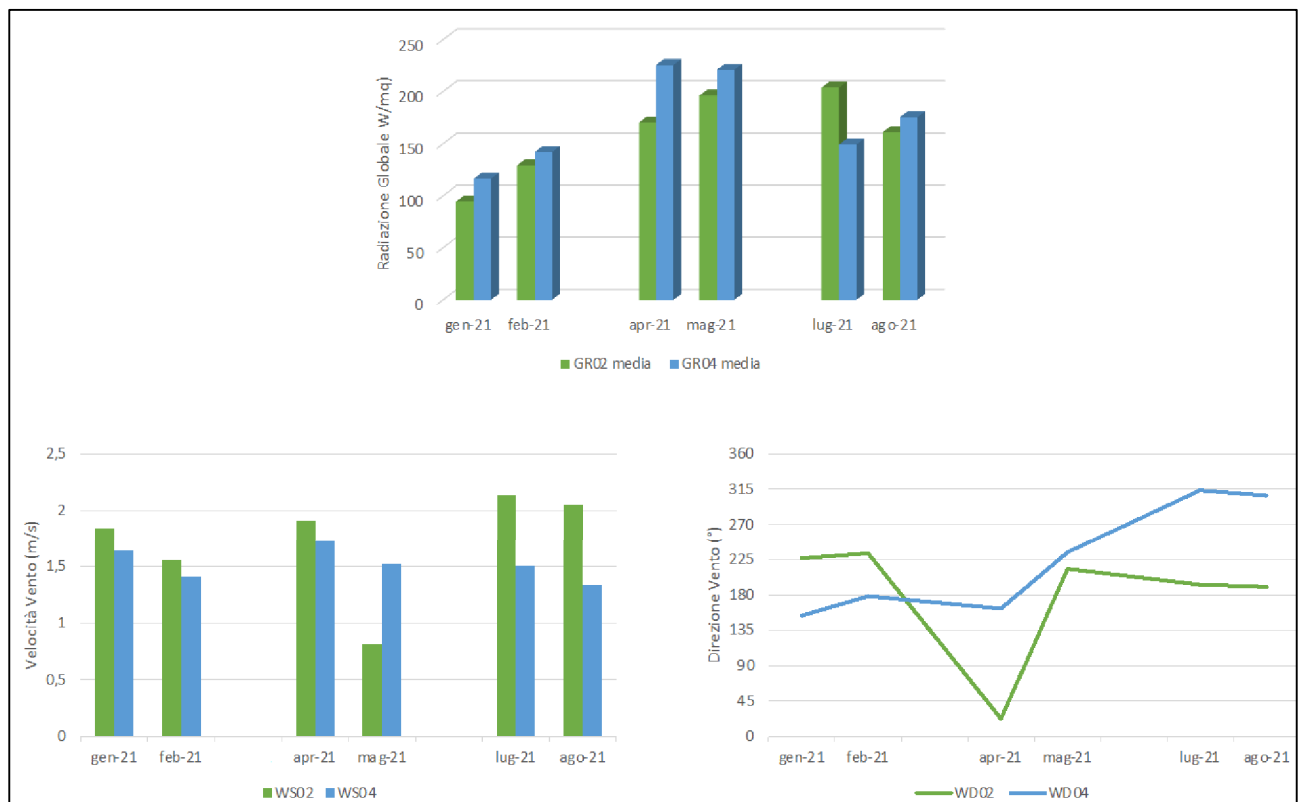


Figura 4. Dinamica dei parametri microclimatici medi mensili durante l'anno 2021.

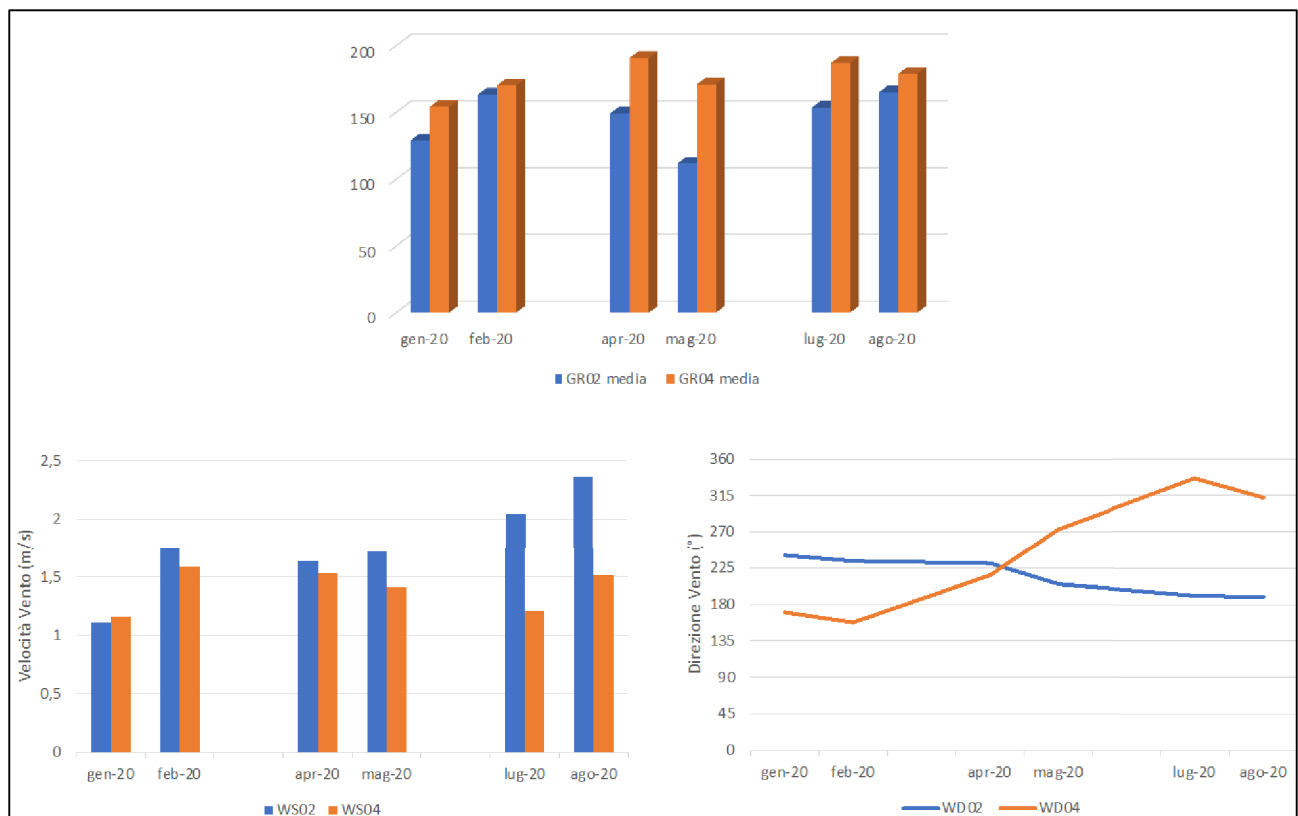


Figura 5. Dinamica dei parametri microclimatici medi mensili per l'anno 2020.

2.1.3 Parametri microclimatici medi giornalieri dell'ambiente circostante le pareti

I grafici riportati nella Figura 6 e Figura 7 permettono di evidenziare con un maggior dettaglio l'andamento delle grandezze fisiche prese in esame, confermando comunque le considerazioni fatte per i dati mensili. In generale radiazione globale più elevata sulla parete a Sud-Est e, dato interessante, valore più alto in inverno, potrebbe dipendere dalla traiettoria più bassa del sole. Inoltre viene illustrato con maggior chiarezza il cambiamento della direzione del vento nell'intercapedine a Sud-Est passando dal periodo invernale al primaverile e all'estivo.

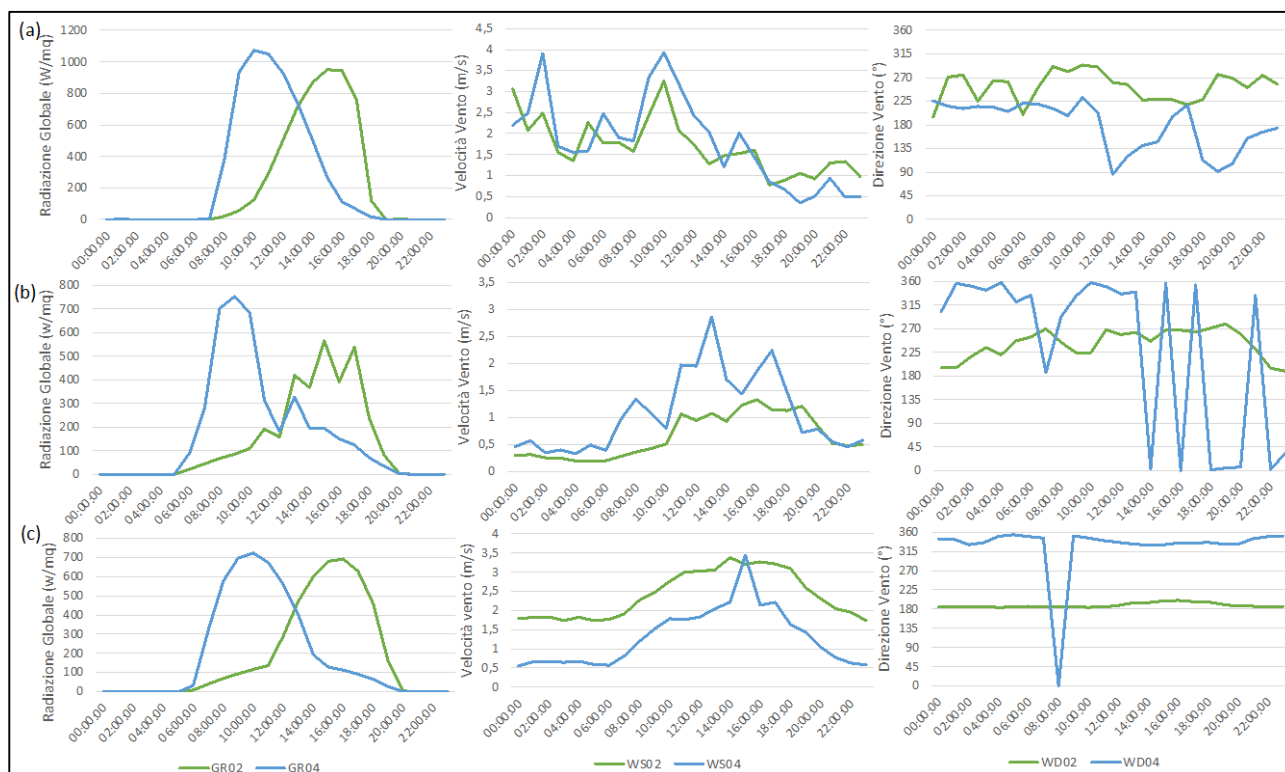


Figura 6. Dinamica dei parametri microclimatici monitorati il giorno 15 di alcuni mesi dell'anno 2021. (a) 15 febbraio 2021; (b) 15 maggio 2021; (c) 15 agosto 2021.

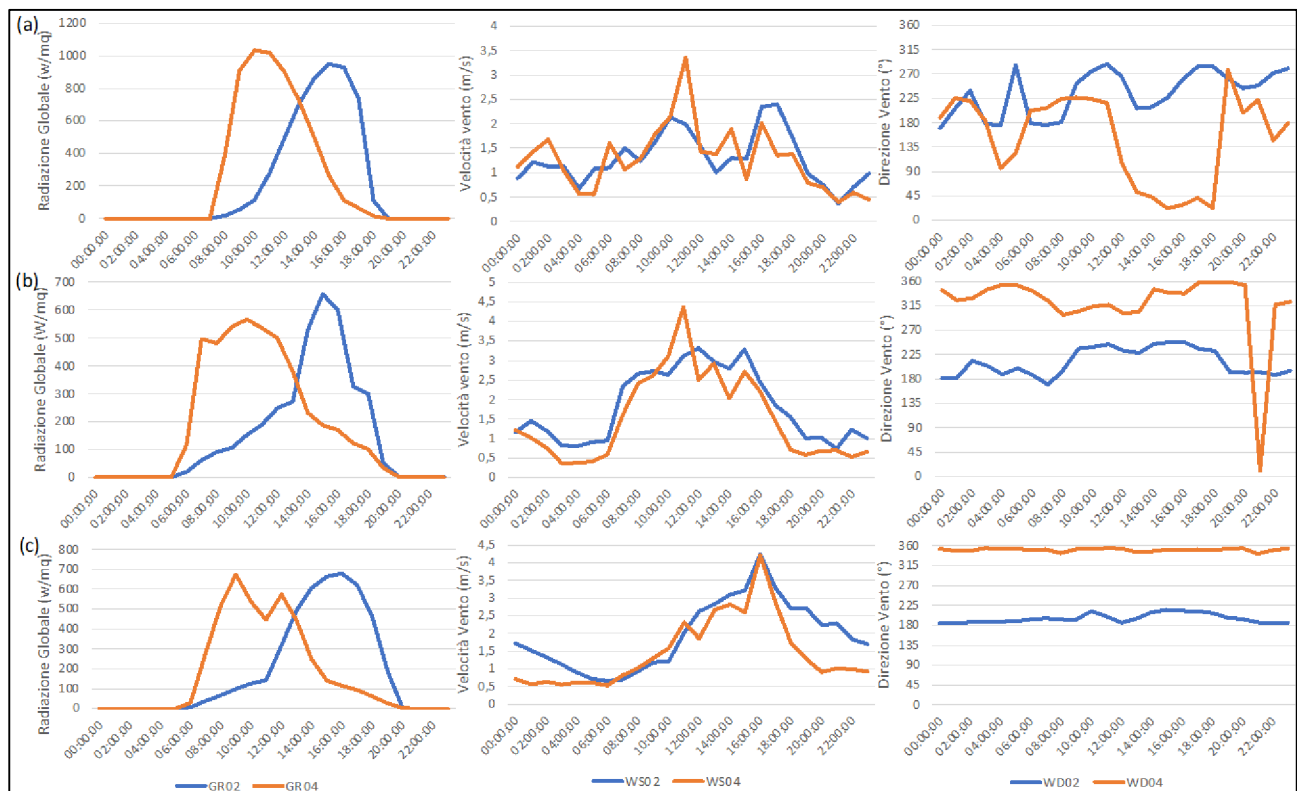


Figura 7. Dinamica dei parametri microclimatici monitorati il giorno 15 di alcuni mesi dell'anno 2020. (a) 15 febbraio 2020; (b) 15 maggio 2020; (c) 15 agosto 2020.

2.1.4 Monitoraggio della CO₂

Per monitorare la concentrazione della CO₂ nelle immediate vicinanze delle pareti verdi sono stati collocati dei sensori specifici nelle intercapedini. Inoltre, un sensore di CO₂ è stato posizionato sulla parete a Sud dell'edificio ed uno sulla parete a Nord. Questi due sensori collocati in modo da non avere barriere e vegetazione nelle vicinanze tranne quella presente nel sito, grazie alla buona miscelazione atmosferica funzionano come riferimento, misurando in pratica la concentrazione di CO₂ nel sito sperimentale. In Tabella 2 sono riportati i sensori e la loro collocazione. Le specifiche della parte strumentale e del sistema di rilevamento sono state anche in questo caso ampiamente illustrate nel rapporto tecnico Rds del 2020 [5].

Tabella 2. Punti di campionamento per la misurazione della CO₂

Punti di campionamento	Sensore
Intercapedine tra parete verde ed edificio, 1° piano sud-est	CO2-02
Intercapedine tra parete verde ed edificio, 1° piano sud-ovest	CO2-06
Intercapedine tra parete verde ed edificio, 2° piano sud-ovest	CO2-08
Parete sud senza vegetazione	CO2-09
Parete nord senza vegetazione	CO2-10

2.1.5 Concentrazione media mensile della CO₂

In questo caso vengono riportati i valori medi mensili stagionali ottenuti in inverno e in estate per amplificare le differenze legate sia alla radiazione globale che alla vegetazione presente sulla parete. In Figura 8 sono riportati i valori relativi ai due anni in esame. Come aspettato i valori di concentrazione della CO₂ sono più elevati in inverno che in estate. Tuttavia occorre notare una certa differenza tra i dati misurati nei due anni a confronto, infatti i valori di concentrazione di CO₂ misurati dai diversi sensori differiscono in media di circa 10 ppm, con i valori più alti ottenuti nel 2020. Considerato che questo scarto si nota anche tra i sensori di riferimento, questa differenza potrebbe essere legata a due fattori che si presentano diversi nei due anni. Il primo è la velocità del vento [10], dai parametri ambientali del sito sperimentale, Figura 2 e Figura 3, come già detto risulta una velocità del vento più elevata nel 2021. Il secondo fattore potrebbe essere la presenza di una maggiore quantità di vegetazione nel sito sperimentale. Nel 2020, a causa della pandemia e delle restrizioni collegate, non c'è stata una manutenzione della vegetazione presente nel sito come invece è stata nuovamente attuata nel 2021. Come già detto le piante durante la respirazione immettono CO₂ nell'atmosfera, questo fatto risulta più evidente nelle ore notturne quando non avviene l'assorbimento per via fotosintetica, nel 2020 la maggiore presenza della vegetazione nel sito ha prodotto più CO₂.

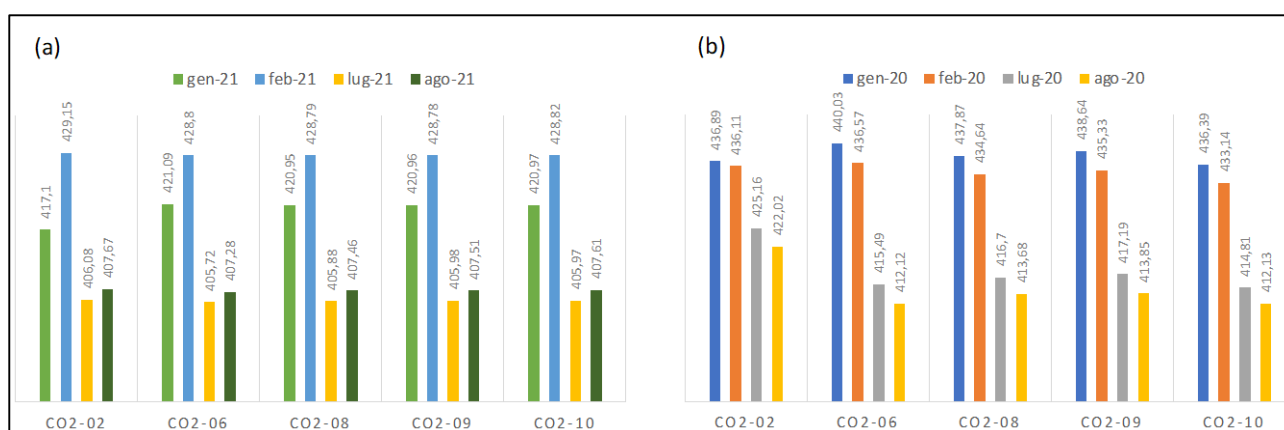


Figura 8. Valori medi mensili della concentrazione di CO₂ (ppm) calcolati sull'intera giornata. (a) anno 2021; (b) anno 2020.

2.1.6 Tendenza giornaliera della concentrazione di CO₂

Nelle figure sottostanti viene confrontato il *trend* giornaliero della concentrazione di CO₂ (ppm) nell'arco temporale che va da febbraio (inverno) fino ad agosto (estate). Questi grafici mettono in evidenza con maggiore chiarezza il valore più elevato di CO₂ nel 2020 e in qualche modo confermano l'ipotesi della maggiore incidenza della vegetazione locale considerato che i due sensori di riferimento CO₂-09 e CO₂-10 presentano in generale valori più elevati nelle ore del mattino o della sera quando non si ha assorbimento ma solo immissione di CO₂ per respirazione.

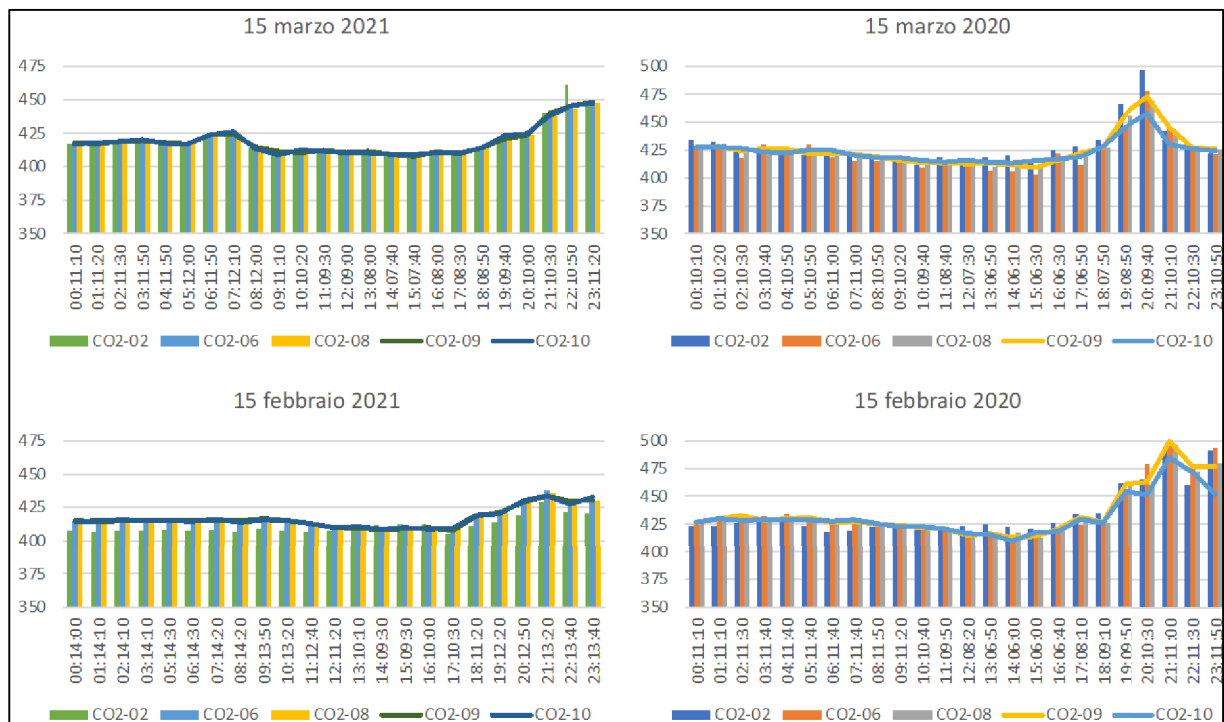


Figura 9. Trend giornaliero della concentrazione di CO₂ (ppm) nel periodo invernale, a febbraio e marzo del 2020, a destra, e del 2021, a sinistra.

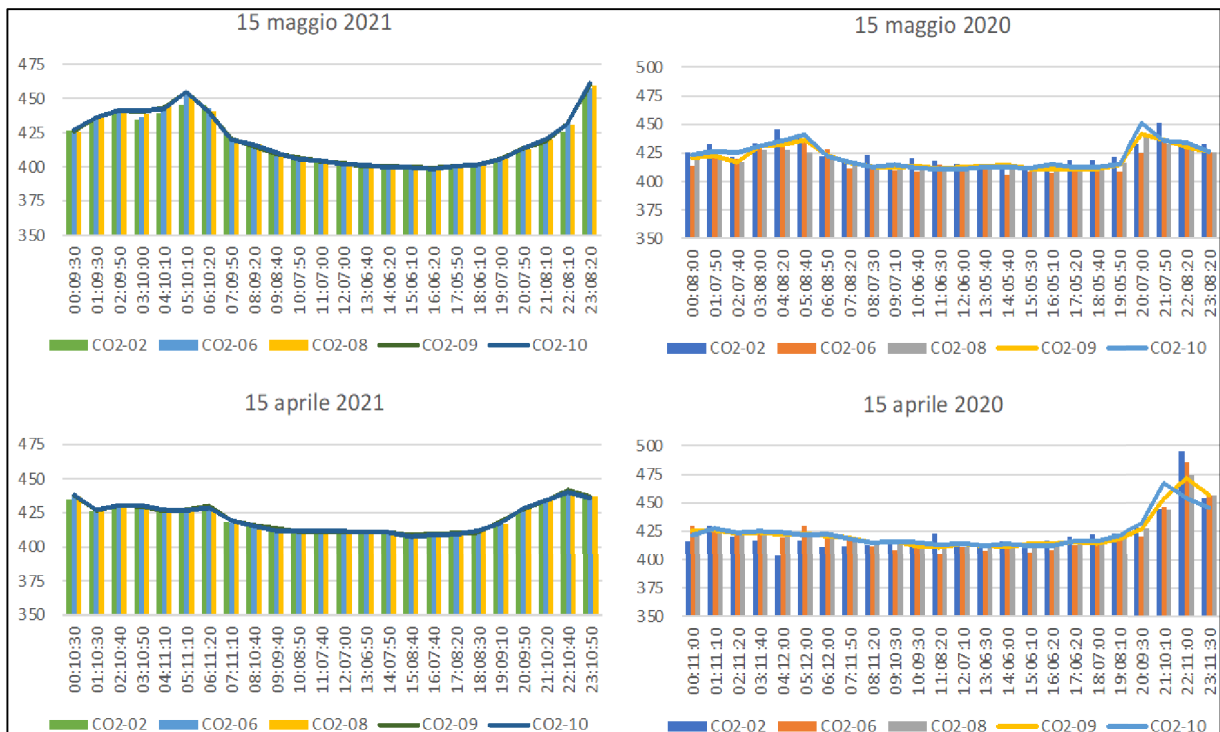


Figura 10. Trend giornaliero della concentrazione di CO₂ (ppm) nel periodo primaverile, ad aprile e maggio del 2020, a destra, e del 2021, a sinistra.

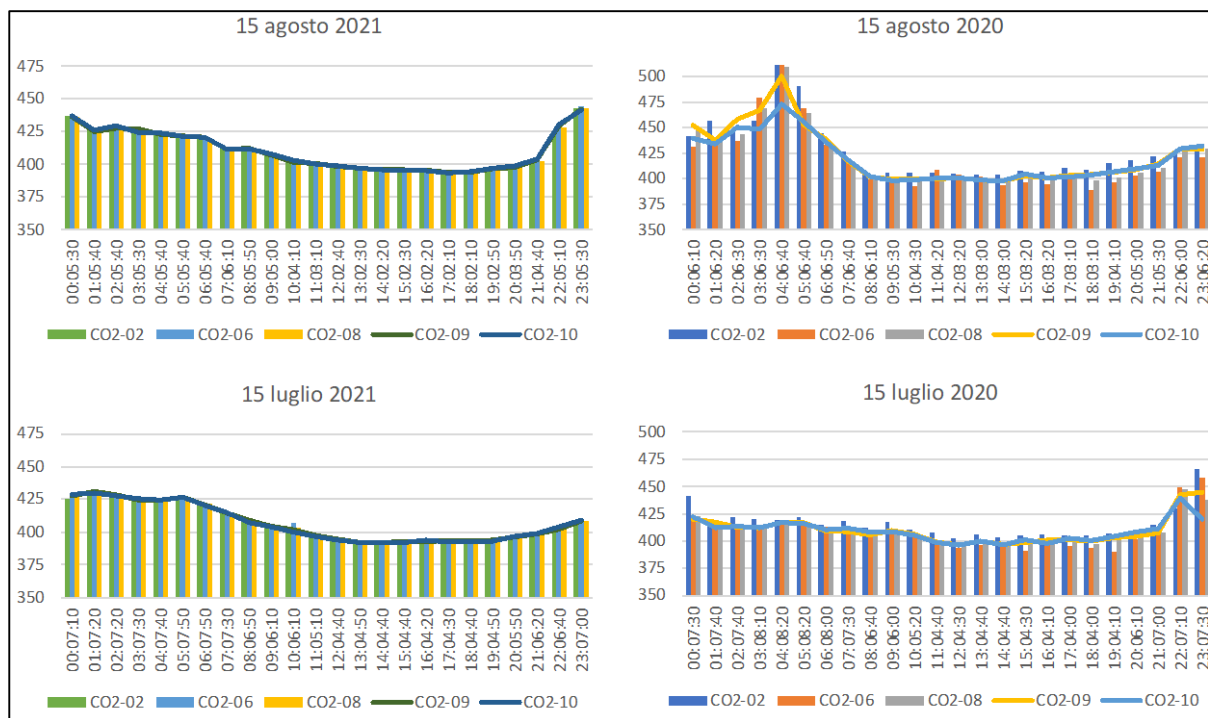


Figura 11. Trend giornaliero della concentrazione di CO₂ (ppm) nel periodo estivo, a luglio ed agosto del 2020, a destra, e del 2021, a sinistra.

In conclusione, il sistema di monitoraggio presente sull'edificio dell'ENEA ha permesso di monitorare l'andamento della concentrazione della CO₂ e nello stesso tempo raccogliere informazioni sui parametri ambientali nei due anni 2020/2021. Questo ha consentito di confermare l'azione positiva delle pareti verdi sul controllo della concentrazione della CO₂ nell'ambiente circostante l'edificio ma anche l'influenza delle caratteristiche ambientali locali sulla concentrazione del gas in oggetto, in particolare l'importanza della velocità del vento e della vegetazione circostante.

La velocità del vento locale potrebbe essere anche il motivo della similitudine delle concentrazioni di CO₂ nel 2021 nelle due intercapedini diversamente orientate. Nel 2020 nell'intercapedine a Sud-Est risultavano concentrazioni di CO₂ in genere leggermente superiori, in alcuni casi anche rispetto ai sensori di riferimento. Questa è una ulteriore dimostrazione che per ottenere le migliori prestazioni possibili da una parete verde è necessario uno studio approfondito sul clima e le proprietà geografiche, del luogo in cui va inserita.

2.2 Le infrastrutture verdi per la riduzione dell'inquinamento dell'aria: effetto sui composti organici volatili (COV)

I Composti Organici Volatili (COV) costituiscono una classe particolarmente eterogenea di sostanze inquinanti dell'aria e l'inquinamento ambientale che inducono, oltre ad avere un impatto drammatico sugli ecosistemi naturali, inclusa la perdita di biodiversità, è ritenuto essere all'origine di diversi disturbi fisiologici e malattie nell'uomo [11]. L'ampia variabilità di queste sostanze, ciascuna infatti con delle caratteristiche intrinseche proprie, si manifesta anche a livello della capacità d'impatto che hanno nei confronti dell'uomo, che può andare da un leggero disagio sensoriale fino a determinare gravi effetti di salute. Oltre che dalla loro tossicità, gli effetti negativi dei COV sulla salute dell'uomo dipendono fortemente dalla loro concentrazione e dalla loro persistenza nell'aria ambiente respirata. I COV possono avere origine antropogenica quando si sviluppano a partire da attività umane (solventi, vernici, ecc.), ma vi sono anche COV di origine biogenica come quelli emessi naturalmente dalle piante (es. terpeni, ecc.). I COV sono le principali sostanze inquinanti dell'aria ambiente (inquinamento *outdoor*), ma non sono meno critici negli ambienti interni confinati (inquinamento *indoor*) ove possono accumularsi e ritrovarsi a concentrazioni maggiori più facilmente.

Nell'ambito del triennio RdS 2019-2021, la ricerca condotta sui COV, al fine di rilevare la capacità della vegetazione nei sistemi verdi su edificio di mitigare le concentrazioni dei COV, è stata focalizzata sugli idrocarburi aromatici volatili tossici: Benzene, Toluene, Etilbenzene e Xilene (BTEX). Elevati livelli di BTEX vengono rilevati soprattutto nelle aree industriali, ma anche nelle aree urbane, in particolare nelle grandi città, dovuto 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 [12]. I BTEX si trovano in genere nei prodotti derivati dal petrolio come la benzina. Lo scopo della sperimentazione è stato quello di valutare l'effetto di una coltre vegetale, disposta verticalmente (vedi paragrafo 2.2.1) oppure orizzontalmente (vedi paragrafo 2.2.2) sulla riduzione dei BTEX presenti nell'aria.

L'edificio prototipo ENEA rappresenta un caso di "*background*", trovandosi in un'area sufficientemente aperta e ventilata, in una zona con poco traffico e non in diretta prossimità di sorgenti locali d'emissione, per cui ci si aspetta una bassa concentrazione di questi BTEX. La sperimentazione è stata, pertanto, effettuata anche in un altro contesto individuato in area urbana e più in prossimità di sorgenti d'emissione, come la parete verde (giardino verticale) del Liceo Scientifico di Roma Keplero, premiato da EcotechGreen nel 2018.

I campionamenti passivi effettuati come già descritto nel Report RdS 2020 [5] attraverso i dispositivi Radiello (Figura 12), in grado di rilevare anche livelli bassi di concentrazione di queste sostanze, hanno avuto durata di una settimana. La concentrazione delle quattro sostanze da rilevare sui campioni ottenuti è stata determinata dal laboratorio Istituto Clinico Scientifico (ICS) Maugeri di Pavia, tramite desorbimento ed analisi gascromatografica, come previsto dalla UNI EN ISO 9001:2015.



Figura 12. Preparazione dei campionatori di aria a diffusione passiva RADIELLO. Tali dispositivi sono costituiti da una cartuccia adsorbente collocata all'interno del cilindretto giallo, che rappresenta il corpo di diffusione chiuso, supportato da un piatto. Le cartucce sono specifiche per i composti BTEX.

2.2.1 Effetto della parete verde

I campionamenti sulla parete verde ENEA, a livello dell'esposizione Sud-Ovest, sono stati condotti tre volte, in diverse stagioni durante l'anno 2021, posizionando le cartucce adsorbenti in diversi siti di interesse. Ogni campione è stato condotto in duplicato. In particolare, le settimane di campionamento sono state: 1) ad inizio primavera, dal 23 al 30 marzo 2021, 2) in estate, da 20 al 27 luglio e 3) ad inizio autunno, dal 30 settembre al 7 ottobre. I risultati delle analisi sono riportati in Tabella 3. Risultati analisi BTEX sulla parete verde ENEA (esposizione Sud-Ovest); le repliche hanno dato risultati equivalenti, a meno di piccole variazioni solo in alcuni casi a livello della seconda cifra decimale.

Tabella 3. Risultati analisi BTEX sulla parete verde ENEA (esposizione Sud-Ovest)

Settimana di campionamento	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 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Inizio primavera 23-30 marzo 2021	2° piano parete verde Sud-Ovest tra le foglie (edera)	0,85	0,55	0,12	0,27	0,12
	2° piano parete nuda a Sud (posizione equivalente al sensore CO2-9)	0,92	0,61	0,16	0,31	0,12
	via Anguillare all'entrata ENEA Area Capanna	1,20	0,89	0,20	0,50	0,21
Estate 20-27 luglio 2021	1° piano parete verde Sud-Ovest tra le foglie (partenocisso)	0,18	0,72	0,16	0,38	0,17
	1° piano parete nuda Sud-Ovest	0,18	0,75	0,16	0,38	0,17
	2° piano parete verde Sud-Ovest tra le foglie (edera)	0,18	0,72	0,16	0,38	0,17
	2° piano parete nuda a Sud (posizione equivalente al sensore CO2-9)	0,18	0,75	0,16	0,38	0,17
	via Anguillare all'entrata ENEA Area Capanna	0,18	0,89	0,20	0,50	0,21
Inizio autunno 30 settembre-7 ottobre 2021	1° piano parete verde Sud-Ovest tra le foglie (partenocisso)	0,52	0,30	0,07	0,13	0,073
	1° piano parete nuda Sud-Ovest	0,55	0,33	0,07	0,13	0,073
	2° piano parete verde Sud-Ovest tra le foglie (edera)	0,52	0,30	0,07	0,13	0,073
	2° piano parete nuda a Sud (posizione equivalente al sensore CO2-9)	0,55	0,45	0,07	0,13	0,073
	via Anguillare all'entrata ENEA Area Capanna	0,55	0,42	0,07	0,20	0,073

I primi campioni analizzati a inizio primavera sono stati effettuati sulla parete vegetata tra le foglie di edera e sulla parete priva di vegetazione, in entrambi i casi al 2° piano, e in una localizzazione nelle prossimità dell'edificio prototipo dove ci si attendeva la massima esposizione ai BTEX, precisamente lungo la via Anguillarese, all'entrata ENEA dell'Area Capanna, dove il traffico automobilistico è continuo anche se non intenso (Figura 13 e Figura 14). Quest'ultima localizzazione è servita come riferimento del livello massimo di COV nell'area del CR Casaccia. 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 (ad eccezione dello xilene nell'isoforma -o). Come atteso, inoltre, a livello della strada in presenza di traffico, seppur molto limitato, le concentrazioni di tutte le sostanze in esame risultano più elevate.

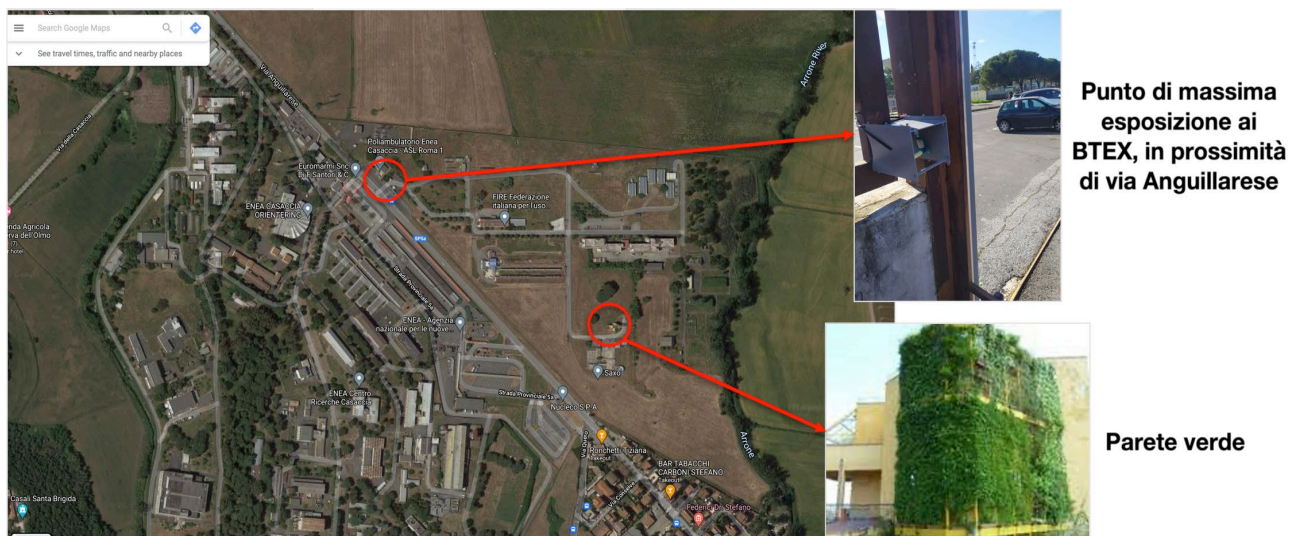


Figura 13. Immagine di *Google Maps* in cui vengono co-localizzati i primi campionamenti BTEX presso il CR ENEA Casaccia.



Figura 14. Campionamenti BTEX sulla parete nuda e sulla parete verde tra le foglie presso il CR ENEA Casaccia (inizio primavera 2021).

Durante l'estate, abbiamo campionato sia a livello del 1° piano che del 2° piano, per verificare ipotetici effetti dovuti all'altezza e alle diverse specie vegetali (edera e partenocisso). Purtroppo, in questo secondo campionamento, non sono state rilevate differenze significative dovute alla presenza/assenza della copertura vegetale. Infatti, è stato appurato che i campionamenti effettuati in primavera, con una temperatura media giornaliera dell'aria di circa 25 °C, consentono di rilevare sia maggiori concentrazioni di tali BTEX che differenze più significative nelle concentrazioni di questi tra la parete vegetata e la parete

“nuda”. Inoltre, sempre in primavera è stata appurata una maggiore riproducibilità dei risultati, in accordo con quanto suggerito dai protocolli di lavoro e con quanto teoricamente atteso, visto che la temperatura si suppone che incida sulla volatilità e sull’assorbimento delle sostanze da parte della cartuccia adsorbente del dispositivo campionario. Durante la settimana di campionamento, la presenza di giornate con picchi di temperatura molto elevati, nonostante la temperatura media fosse intorno ai 25 °C, hanno dato risultati meno riproducibili. Come ci aspettavamo, in estate, è stato comunque possibile rilevare una maggiore concentrazione dei BTEX (ad esclusione del benzene) sull’Anguillarese rispetto ai campionamenti sull’edificio, più distanti dal traffico veicolare.

Sempre a livello di esposizione Sud-Ovest, i campioni analizzati ad inizio autunno, equivalenti alle localizzazioni analizzate in estate, mostrano delle riduzioni di concentrazione tra le foglie soprattutto a carico del benzene e del toluene, rispetto alle corrispondenti pareti nude. Nelle condizioni sperimentali utilizzate, non sono stati riscontrati valori diversi di concentrazione dovuti alla presenza del partenocisso o all’edera. Tuttavia, l’effetto della specie vegetale dovrà essere ulteriormente indagato in futuro, possibilmente in situazioni di maggior esposizione ai BTEX. Insieme all’effetto della specie bisognerà considerare ovviamente la densità di copertura, la fase fenologica delle piante e il LAI, parametri chiave che teoricamente dovrebbero influire direttamente sulla riduzione della concentrazione dei BTEX.

Ad inizio autunno, ulteriori campionamenti sono stati effettuati a livello di un’altra parete verde e corrispondente parete nuda in un’area urbana in cui si prevede una maggiore concentrazione dei composti ricercati. In particolare, le misure sono state condotte sulla parete vegetale presso il Liceo Scientifico Keplero a Roma (<https://www.facebook.com/Keplerogarden/?rf=494641874234943>), localizzato in città (Figura 15).



Figura 15. Campionamenti BTEX sulla parete verde del Liceo Keplero di Roma (30 settembre 2021).

I risultati delle analisi BTEX dei campionamenti sulla parete del Liceo Scientifico Keplero di Roma sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4. Risultati analisi BTEX sulla parete verde del Liceo Keplero

Settimana di campionamento	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 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Inizio autunno 30 settembre-7 ottobre 2021	parete verde tra le foglie	1,0	2,00	0,44	1,4	0,59
	parete nuda	0,92	2,8	0,67	2,2	0,91

La vegetazione della parete del Liceo Keplero ha un effetto di mitigazione dell'inquinamento dell'aria su tutti i BTEX analizzati ad esclusione del benzene. È stata rilevata una riduzione del toluene pari al 29%, dell'etilbenzene pari al 34%, dell'mp-xilene pari al 36% e dell'o-xilene pari al 35%. Il risultato è ottimo considerando che al momento del campionamento la parete non raggiungeva una copertura ottimale in quanto durante l'estate vi erano stati dei problemi con l'impianto di irrigazione che ha seccato la maggior parte della vegetazione.

2.2.2 Effetto del tetto verde

La determinazione dei COV BTEX è stata effettuata anche a livello di tetto verde, comparando il tetto verde ENEA a livello del settore con mix di *Sedum* e il tetto verde presso il Liceo Scientifico Keplero di Roma (Figura 16).



Figura 16. Tetto verde del Liceo Keplero di Roma il giorno del campionamento dei BTEX (30 settembre 2021).

I campionamenti sono stati effettuati sempre ad inizio autunno ed i risultati delle analisi quantitative sono riportati in Tabella 5.

Tabella 5. Risultati analisi BTEX sul tetto verde dell'ENEA e del Liceo Keplero

Settimana di campionamento	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 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Inizio autunno 30 settembre-7 ottobre 2021	Tetto verde ENEA (settore a <i>Sedum</i>)	0,45	0,33	0,07	0,13	0,036
	Controllo negativo tetto verde ENEA (su mattonella)	0,92	2,80	0,67	2,20	0,91
	Tetto verde Liceo Keplero (settore a <i>Sedum</i>)	0,73	2,30	0,51	1,80	0,74
	Tetto verde Liceo Keplero (settore più esterno e vicino alla strada)	0,84	1,80	0,36	1,20	0,54
	Controllo negativo tetto verde Liceo Keplero (su mattonella, settore esterno e vicino alla strada)	0,92	2,80	0,67	2,20	0,91

In entrambi i casi la copertura vegetale consente una riduzione di tutte le sostanze analizzate. In particolare, il *Sedum* nel tetto verde dell'ENEA ha un effetto fortissimo nella riduzione del toluene e dell'mp-xilene. Anche presso il liceo Keplero, la vegetazione ha un effetto benefico sulla riduzione delle sostanze esaminate.

In definitiva, la sperimentazione condotta sui BTEX dimostra che sia le pareti che i tetti verdi, attraverso l'assorbimento da parte della vegetazione, possono fornire un importante beneficio ambientale ai cittadini, quale quello della riduzione di inquinanti nell'aria. In futuro, bisognerà focalizzare sulle specie vegetali più adatte a questo scopo e bisognerà anche valutare la possibilità di riduzione dei COV negli ambienti interni. La ricerca, possibilmente, dovrebbe poter focalizzare anche su altri COV.

2.3 Relazione delle coperture verdi sui flussi termici entranti nell'edificio prototipo

2.3.1 Flusso termico

La termodinamica ci ricorda che “il flusso di calore può avvenire spontaneamente in una sola direzione: dal corpo più caldo al corpo più freddo”. È noto che esistono tre modi principali con cui avviene la propagazione del calore: conduzione, convezione ed irraggiamento. Per un involucro edilizio immerso in un ambiente reale, tutti e tre i suddetti meccanismi intervengono nel fenomeno di scambio termico che, per semplicità si suppone avvenga in condizioni stazionarie [13] [14]. Di seguito si riportano le formule sugli scambi termici tra l'edificio, la radiazione solare e l'ambiente circostante.

Conduzione

La conduzione avviene all'interno di un corpo o tra corpi tra loro in contatto per l'energia cinetica posseduta dalle molecole. Essa può avvenire tra due sistemi o tra le varie parti di uno stesso sistema, attraverso superfici di separazione che possono essere reali o, nel caso di conduzione interna, immaginarie. Da un punto di vista macroscopico, esiste una legge termodinamica valida per tutti i materiali che quantifica il flusso di calore trasmesso per conduzione nell'unità di tempo attraverso una superficie. In particolare:

$$\Delta Q / \Delta t = C \cdot A \cdot \Delta T / \Delta l$$

dove:

$\Delta Q / \Delta t$ è la potenza termica trasmessa per conduzione, espressa in (W);

C è la conducibilità o conduttività termica, tabulata, del materiale, espressa in (W/mK);

$\Delta T / \Delta l$ è il gradiente di temperatura, espresso in (K/m).

A: l'ampiezza di area attraverso cui si scambia calore (m²);

Al primo membro compare la quantità di calore trasmessa nell'unità di tempo attraverso la superficie A che separa le due regioni poste a temperature diverse (e uniformi) la cui differenza è ΔT . Inoltre, Δl è lo spessore, in direzione perpendicolare alla superficie, lungo la quale la temperatura si modifica per passare da un valore all'altro e c è una costante di proporzionalità.

Convezione

La convezione avviene tra un corpo solido e uno fluido, liquido o gassoso, che dipende dall'area di contatto, dalla differenza di temperatura e dal coefficiente di convezione. Per descrivere il fenomeno della convezione, si impiega la formula:

$$\Delta Q / \Delta t = h_c \cdot A \cdot \Delta T$$

dove:

$\Delta Q / \Delta t$ è la potenza termica trasmessa per convezione (W);

h_c è il coefficiente di scambio termico medio per convezione (W/m²K);

A: l'ampiezza di area attraverso cui si scambia calore (m²);

ΔT è la differenza di temperatura $T_s - T_f$ (K);

T_s è la temperatura della superficie (K);

T_f è la temperatura del fluido misurata in un punto distante dalla superficie (K).

Irraggiamento

Al contrario della conduzione e della convezione, l'*irraggiamento* non prevede contatto diretto tra i corpi soggetti allo scambio di calore, e non necessita di un mezzo per propagarsi. Un sistema che si trova ad una temperatura maggiore rispetto al mezzo circostante, con il tempo tende a raffreddarsi, perché si instaura un flusso di energia dal sistema al mezzo. Il trasferimento del calore per irraggiamento avviene, quindi, sotto forma di onde elettromagnetiche. Il fenomeno si basa sulla seguente legge:

$$\Delta Q / \Delta t = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (t_s)^4$$

dove:

$\Delta Q / \Delta t$ è la potenza termica trasmessa per irraggiamento (W);

ε è l'emissività, numero adimensionale compreso tra 0 e 1, che indica quanto un materiale ha comportamenti affini al corpo nero ($\varepsilon=1$);

σ è la costante di Boltzman, pari a $5,67 \times 10^{-8}$ (W/m²K⁴);

T_s è la temperatura della superficie (K).

Trasmittanza

La trasmittanza misura il flusso di calore che nell'unità di tempo attraversa un elemento strutturale della superficie di 1 m² in presenza di differenza di una temperatura di 1 K tra l'interno e l'esterno. È definita come:

$$Q = U \cdot A \cdot (T_i - T_e) = (1/R) \cdot A \cdot (T_i - T_e)$$

dove:

Q è la quantità di calore che attraversa la struttura nell'unità di tempo (W);

T_i è la temperatura interna dell'aria (K);

T_e è la temperatura esterna dell'aria (K);

U è la trasmittanza (W/m²K), uguale all'inverso di R.

A : l'ampiezza di area attraverso cui si scambia calore (m²);

R è la resistenza termica (di uno o più strati di materiale omogeneo), proprietà del materiale di opporsi al passaggio di calore, espressa in m² K/W, definita dalla formula:

$$R = s/\lambda$$

dove:

s è lo spessore dello strato misurato (m);

λ è la conducibilità termica del materiale (W/mK).

La conducibilità o conduttività termica (λ) è la quantità di calore trasferito in direzione perpendicolare a una superficie di area unitaria, a causa di un gradiente di temperatura, nell'unità di tempo e in condizioni stazionarie. In altri termini è l'attitudine di una sostanza a trasmettere calore, bassi valori di λ definiscono materiali dalle elevate capacità isolanti. Più basso è il valore della trasmittanza termica U , migliore è l'isolamento e il *comfort* interno.

La superficie esterna di un edificio si riscalderà (o si raffredderà) come risultato di scambio di calore di tipo convettivo (con l'aria circostante) e per irraggiamento (con le superfici dei corpi circostanti e col sole nelle ore diurne), mentre l'ambiente interno risentirà del trasferimento di calore per effetto conduttivo (dalla

superficie esterna a quella interna o viceversa) e per convezione e irraggiamento (dalla superficie interna all'ambiente interno). La fonte degli scambi termici è la radiazione solare, che a causa delle variazioni nel tempo (stagioni, giornata) e nello spazio determina il clima nelle diverse aree geografiche. L'apporto solare assorbito e non riemesso verso l'atmosfera per convezione e per irraggiamento nell'infrarosso, va a riscaldare l'edificio (Figura 17).

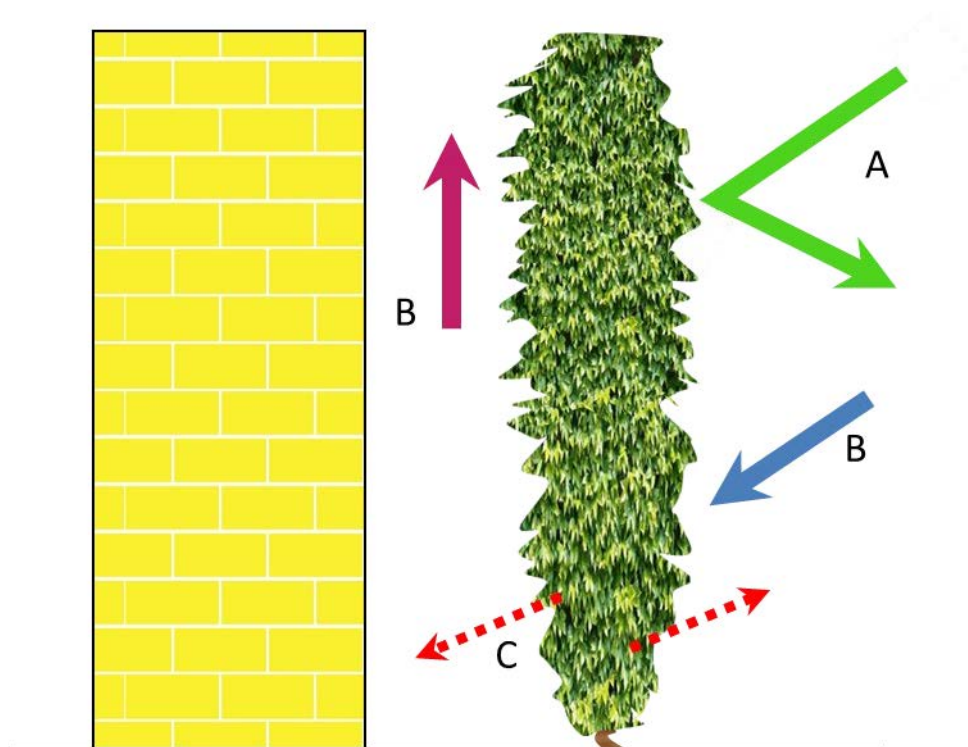


Figura 17. Schema rappresentativo di un edificio schermato da una coltre vegetale. La radiazione solare incidente viene riflessa ed assorbita dalla vegetazione comportando una riduzione della radiazione riemessa sotto forma di onda lunga (calore) dalla vegetazione. A) Riflessione della radiazione visibile nella banda del verde, B) Assorbimento della radiazione solare nella banda blu-violetto e in quella del rosso impiegata nei processi di evapotraspirazione, C) Radiazione infrarossa riemessa. La radiazione infrarossa riemessa è inferiore poiché parte dell'energia luminosa.

Riflettanza solare (albedo): è la frazione riemessa dall'irradiazione solare ($<2.5\mu\text{m}$) rispetto a quella incidente. Il suo valore è dato dal rapporto tra la quantità di energia riflessa da una superficie e l'energia totale incidente. Maggiore è l'albedo, minore la quantità di energia immagazzinata dal corpo e quindi minore la sua temperatura superficiale.

Emissività termica: è il rapporto tra l'emissione di calore della superficie mediante irraggiamento termico nell'infrarosso ($>2.5\mu\text{m}$) e la massima emissione teorica (corpo nero). Maggiore è l'emissività, maggiore la quantità di energia che il corpo è in grado di rilasciare sotto forma di calore (radiazione infrarossa). Valori di emissività elevati riducono la quantità di calore trasmesso all'edificio. L'emissività è un parametro compreso fra 0 e 1 (0 = 100%).

Indice di Riflessione Solare (SRI-Solar Reflectance Index): è il parametro che esprime la capacità di un materiale di respingere il calore solare coniugando i valori di Riflettanza ed Emissanza. È definito in modo tale da risultare 0 per il nero standard e 100 per il bianco. I materiali con più elevato valore di SRI riducono le temperature superficiali delle coperture.

Per ridurre il riscaldamento estivo di un edificio è necessario che la sua superficie esterna possieda elevata capacità di riflettere l'irradiazione solare e di cedere energia all'atmosfera per irraggiamento termico nell'infrarosso. Un flusso minore di calore nelle pareti esterne significa che le temperature superficiali delle pareti esterne risultano ridotte. In generale, il flusso di calore attraverso le pareti dell'edificio dall'esterno verso l'interno viene influenzato dalla differenza di temperatura tra l'aria interna e la temperatura superficiale delle facciate esterne, verticali e orizzontali dell'edificio. Pertanto, la temperatura superficiale delle pareti esterne rappresenta un indice del calore che può fluire negli ambienti dell'edificio e per aumentarne la temperatura. Le coltri vegetali e, più in generale, la vegetazione, nei periodi estivi contribuiscono a mantenere temperature meno elevate del tetto e delle facciate esterne e quindi favoriscono la riduzione del flusso di calore verso l'interno. Tra i benefici dei sistemi vegetali sugli edifici abbiamo:

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

Trasmittanza termica (U) e flusso termico

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

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

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

dove:

R_{si}: resistenza superficiale interna
R₁.....R_n: resistenza termica di ciascun strato costituente la parete
R_{se}: resistenza superficiale esterna

Il **flusso termico Q** trasmesso tra i due fluidi in cui è immersa la parete, pertanto, è esprimibile tenendo conto della trasmittanza che, in definitiva, rappresenta il **coefficiente globale di scambio termico**. Per una generica parete (orizzontale oppure verticale) avente una superficie S ed un salto termico tra i due fluidi (aria) che essa separa pari a (T₁ – T₂), possiamo pertanto scrivere:

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

Il flusso termico è stato misurato in kWh_t (sistema S.I.).

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

- Regime stazionario,
- Superficie piana ad estensione infinita,
- Materiale componente perfettamente omogeneo isotropo,
- Facce esterne isoterme (temperatura costante).

Il suggerimento del CTI (Comitato Termotecnico Italiano) per il calcolo della trasmittanza termica è quello di utilizzare la classica UNI EN ISO 6946: 2018 “Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo” ipotizzando che il terreno sia uno strato facente parte della stratigrafia della struttura (solaio/parete). Per i valori di trasmittanza termica il riferimento normativo si deve riferire alla stratigrafia che sostiene la copertura verde. In generale, il riferimento normativo è la UNI EN 13370: 2018 “Prestazione termica degli edifici - Trasferimento di calore attraverso il terreno - Metodi di calcolo”. Le considerazioni energetiche sull’impiego della vegetazione negli edifici si possono sintetizzare in un maggiore isolamento termico dell’edificio e alle caratteristiche fisiologiche delle piante.

Più in dettaglio:

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

La stima dei flussi termici che caratterizzano l’edificio prototipo e la vegetazione (verde parietale e tetto verde), sviluppata nei capitoli seguenti è stata operata fissando a 26 °C la temperatura di “comfort” interna all’edificio, in accordo con la UNI/TS 11300-1.

2.3.1.1 Flussi termici: Facciata verde sperimentale (ENEA)

Il sistema di verde verticale sull’edificio prototipo ENEA è stato realizzato sulla base di un impianto costituito da una struttura d’acciaio auto-sostenibile, ancorata a terra sulle facciate di Sud-Est e di Sud-Ovest, dotata di una grata metallica disposta a 60 cm dalle pareti dell’edificio. Per consentire l’operatività e i rilievi scientifici, la struttura è stata dotata di passaggi metallici orizzontali su tre altezze. La trasmittanza della parete è stata definita come in Figura 18 e non c’è distinzione tra la trasmittanza della parete verde e quella della parete nuda essendo la vegetazione distaccata dall’edificio. Per il calcolo relativo alla stima dei flussi termici si è utilizzata la relazione seguente:

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

Sono stati considerati i seguenti dati di *input*:

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

		Descrizione	Spessore	Conduttività [λ]	Resistenza termica [R]	Trasmittanza termica (U)
			(m)	W/mK	m^2K/W	W/m^2 K
Rsi	Parete	Resistenza termica interna			0,100	
1		Intonaco interno	0,020	0,650	0,031	
2		Mattoni forati	0,080	0,230	0,348	
3		Intercapedine aria	0,055	0,260	0,212	
		Malta di calce e cemento	0,005			
4		Mattoni forati	0,120	0,230	0,522	
		Intonaco esterno	0,020	0,650	0,031	
5		Resistenza termica esterna			0.04	
		RESISTENZA TERMICA STRUTTURA [Rstruttura]				
	TRASMITTANZA TERMICA STRUTTURA [Ustruttura]					0,80

Figura 18. Stratigrafia della parete dell'edificio prototipo, la facciata verde non rientra nel calcolo poiché distaccata dalla parete.

Appare evidente la validità dell'uso della coltre vegetale come schermatura naturale del flusso termico come si evince dai dati riportati per l'esposizione Sud-Ovest (Tabella 6). La riduzione di flusso termico totale nei mesi da Maggio ad Agosto raggiunge $6,26 \text{ kWh}_t/m^2$ a fronte di una trasmissione totale di $9,83 \text{ kWh}_t/m^2$ misurati sulla parete priva di copertura verde. Le differenze in termini di flusso termico trasmesso tra la facciata nuda e la facciata coperta tendono ad aumentare raggiungendo i valori più elevati nel mese di Agosto ($1,87 \text{ kWh}_t/m^2$).

Tabella 6. Esposizione Sud-Ovest, sommatoria dei flussi termici entranti calcolati per la superficie schermata dalla facciata verde (parete vegetata) e per la parete scoperta con il muro direttamente esposto alla radiazione luminosa (parete non vegetata), nei mesi da maggio ad agosto del 2021. Nella colonna di destra è stata riportata la differenza (Δ) tra i due flussi termici entranti attraverso la parte nuda e attraverso la parete vegetata.

Flusso termico specifico entrante (kWh_t/m^2) attraverso la superficie della parete verde, anno 2021			
Mesi	Parete vegetata	Parete non vegetata	Δ (Parete non vegetata-vegetata)
maggio	0,06	1,05	0,98
giugno	0,44	2,08	1,64
luglio	1,45	3,21	1,76
agosto	1,62	3,49	1,87
Totale	3,57	9,83	6,26

2.3.2 Modellizzazione dell'effetto di una parete verde sull'abbattimento dei flussi termici entranti in un edificio, definizione del K_v^*

Quantificare l'effetto di un'infrastruttura verde sul sistema edificio può avere innumerevoli risvolti pratici, utili in fase progettuale e necessari per poter operare stime riguardanti i vantaggi dell'applicazione di una copertura verde, infatti una delle barriere che ostacolano la diffusione di queste NBS è sicuramente la difficoltà di quantificarne e prevederne i guadagni e gli effetti, mentre risulta invece immediata, la diversità di gestione e manutenzione di una facciata verde rispetto ad una parete intonacata.

Per questo l'attività RDS si è indirizzata verso l'individuazione di un parametro che potesse permettere di stimare il miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio, dal punto di vista del condizionamento, apportato dall'adozione di una facciata verde grazie alla sua funzione di raffrescamento.

Un tentativo analogo è stato già svolto da Ariaudo et al 2009 [15], che ha portato alla definizione di un indice, che esprime l'influenza di una coltre vegetale adiacente all'edificio, chiamato K_v . Per le diverse problematiche di gestione di una parete adiacente, che risulta essere di più complessa manutenzione, oltre al rischio di introdurre nell'edificio insetti e animali attratti dalla vegetazione, il caso sperimentale dell'ENEA ha preso in considerazione una parete verde distaccata di 60 cm dal muro dell'edificio prototipo. A partire dai dati sperimentali registrati dalla sensoristica presente sull'edificio verde prototipo nel CR ENEA si è calcolato un modificato denominato KV^* , applicabile al sistema sperimentale adottato dall'ENEA.

A partire dalla formula adottata per il K_v della parete verde adiacente all'edificio [15]:

$$\frac{(T_{se} - T_{sev})}{(T_{se} - T_{ae})} = \left(1 - \tau_v \frac{h_e}{h_e^*}\right) = K_v$$

τ_v = Coefficiente di trasmissione solare della vegetazione.

h_e, h_e^* = Coefficiente convettivo rispettivamente senza e con la copertura verde;

T_{sev} = Temperatura parete protetta dalla vegetazione.

T_{se} = Temperatura parete non protetta

T_{ae} = Temperatura dell'aria esterna

aI = Energia solare assorbita a = coefficiente di assorbimento della parete esterna; I = Radiazione solare globale.

Con opportuni calcoli:

$$\begin{cases} T_{se} = \left(T_{ae} + \frac{aI}{h_e}\right) \\ T_{sev} = T_{ae} + \tau_v \frac{aI}{h_e} \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_{se} = \left(T_{ae} + \frac{aI}{he} \right) \frac{\tau v}{\tau v} \\ T_{sev} = T_{aei} + \tau v \frac{aI}{he} \end{cases}$$

Si moltiplica e divide la prima equazione per una stessa quantità (τv)

$$\begin{cases} \tau v T_{se} = \left(\tau v T_{ae} + \frac{\tau v aI}{he} \right) \\ T_{sev} = T_{aei} + \tau v \frac{aI}{he} \end{cases}$$

Poi si sottrae la seconda equazione alla prima

$$\begin{aligned} \tau v T_{se} - T_{sev} &= \tau v T_{ae} - T_{aei} + \left(\frac{\tau v aI}{he} - \tau v \frac{aI}{he} \right) \\ \tau v T_{se} - T_{sev} &= \tau v T_{ae} - T_{aei} \\ \tau v T_{se} - \tau v T_{ae} &= T_{sev} - T_{aei} \\ \tau v (T_{se} - T_{ae}) &= T_{sev} - T_{aei} \end{aligned}$$

o

$$\tau v = \frac{T_{sev} - T_{aei}}{T_{se} - T_{ae}}$$

Il fattore verde K_v^* è definito dalla relazione: $K_v^* = 1 - \tau v$, da cui:

$$\begin{aligned} K_v^* &= 1 - \tau v = \left(1 - \frac{T_{sev} - T_{aei}}{T_{se} - T_{ae}} \right) \\ K_v^* &= \left(\frac{T_{se} - T_{ae} - T_{sev} + T_{aei}}{T_{se} - T_{ae}} \right) \\ K_v^* &= \frac{T_{se} - T_{ae} - T_{sev} + T_{aei}}{T_{se} - T_{ae}} \\ K_v^* &= \left(\frac{T_{se} - T_{ae}}{T_{se} - T_{ae}} \right) - \left(\frac{T_{sev} - T_{aei}}{T_{se} - T_{ae}} \right) \\ K_v^* &= 1 - \left(\frac{T_{sev} - T_{aei}}{T_{se} - T_{ae}} \right) \end{aligned}$$

Nel caso studio in esame bisogna considerare che il coefficiente convettivo h_e , a differenza del coefficiente convettivo h_e^* , introdotto nel caso di una parete verde attaccata alla facciata dell'edificio, non varia perché l'elemento verde risulta distaccato di 60 cm dalla facciata dell'edificio, e, pertanto, non viene modificata la stratigrafia della facciata stessa nel caso sperimentale dunque $h_e = h_e^*$.

2.3.2.1 Calcolo del K_v^* per la specie *Parthenocissus quinquefolia*

L'applicazione della formula permette quindi di calcolare il K_v^* relativo alla specie *Parthenocissus quinquefolia* nelle condizioni climatiche del sito sperimentale. In Tabella 7 vediamo come il K_v^* oscilla tra i diversi mesi raggiungendo i valori più elevati nel mese di maggio nel 2019 e nel mese di luglio negli anni 2020 e 2021. Durante il 2020 si sono registrati valori inferiori probabilmente a causa del *lockdown* che ha impedito di effettuare interventi manutentivi a carico del sistema di irrigazione e causato ritardi degli interventi di potatura e riordino della vegetazione.

Tabella 7. Sono riportati i valori di K_v^* ($\pm$ deviazione standard) per la specie *Parthenocissus quinquefolia* nei tre anni di sperimentazione per i mesi, da maggio ad agosto, maggiormente interessati dal flusso di calore entrante nell'edificio.

Mese	K_v^* 2019	K_v^* 2020	K_v^* 2021
maggio	$0,89 \pm 0,09$	$0,80 \pm 0,11$	$0,83 \pm 0,13$
giugno	$1,00 \pm 0,08$	$0,84 \pm 0,12$	$0,91 \pm 0,10$
luglio	$0,96 \pm 0,15$	$0,86 \pm 0,12$	$0,94 \pm 0,05$
agosto	$0,89 \pm 0,09$	$0,74 \pm 0,08$	$0,86 \pm 0,12$

2.3.3 Applicazione del K_v^* per stimare il flusso termico entrante con la schermatura di una parete verde.

L'applicazione del K_v^* alla formula del flusso termico ponendo fissa la temperatura di *comfort* di 26°C (UNI/TS 11300-1) permette di stimare i flussi termici entranti in un edificio coperto da una facciata verde ed è stata ottenuta con il seguente svolgimento:

La quantità di calore che entra in un ambiente attraverso una parete irraggiata dal sole, è pari alla quantità di calore che si trasmetterebbe se la parete non fosse sottoposta ad irraggiamento (Q_1) più la parte dovuta a quest'ultimo apporto (Q_2).

$$Q_1 = U(T_{ae} - T_i)$$

$$Q_2 = U \left(\frac{a \cdot I}{h_e} \right)$$

da cui:

$$Q_1 + Q_2 = U(T_{ae} - T_i) + U\left(\frac{a \cdot I}{h_e}\right)$$

$$Q_1 + Q_2 = U\left(\frac{a \cdot I}{h_e} + T_{ae} - T_i\right)$$

È invalso l'uso di indicare con il termine **Temperatura fittizia al sole** il termine:

$$\frac{a \cdot I}{h_e} + T_{ae} = T_{fse}$$

La temperatura fittizia al sole (T_{fse}) è dunque quella temperatura che dovrebbe avere l'aria esterna, in assenza di irraggiamento solare, affinché si trasmetta attraverso la parete lo stesso flusso termico che si verifica quando essa è irraggiata.

Si può valutare, di conseguenza, l'apporto dovuto all'irraggiamento solare sulla parete ed espresso:

$$T_{fse} - T_{ae} = \frac{a \cdot I}{h_e}$$

Nel caso studio, la temperatura fittizia al sole T_{fse} è espressa dalla temperatura misurata rispettivamente sulla parete nuda (T_{se}) e sulla parete protetta da coltre vegetale (T_{sev}), da cui, l'apporto dovuto all'irraggiamento solare, è espresso rispettivamente:

$$\text{Parete nuda (priva di coltre vegetale)} = (T_{se} - T_{ae})$$

$$\text{Parete protetta da coltre vegetale} = (T_{sev} - T_{aei}) = (T_{se} - T_{ae}) \cdot (1 - K_v^*)$$

Dai dati raccolti con l'attività sperimentale, possiamo considerare trascurabile la differenza di temperatura dell'aria esterna (T_{ae}) rispetto alla temperatura dell'aria nell'intercapedine (T_{aei}), pertanto possiamo imporre:

$$T_{ae} \approx T_{aei}$$

da cui si ottiene:

$$(T_{sev} - T_{ae}) = (T_{se} - T_{ae}) \cdot (1 - K_v^*)$$

$$T_{sev} = T_{ae} + [(T_{se} - T_{ae}) \cdot (1 - K_v^*)]$$

Pertanto, il flusso termico entrante (Q_{sev}) attraverso la parete protetta dalla coltre vegetale, sarà espresso dalla:

$$Q_{sev} = U \cdot S \cdot (T_{sev} - T_{int}) \text{ [flusso termico dalla parete vegetata]}$$

sostituendo abbiamo:

$$Q_{sev} = U \cdot S \cdot \{[T_{ae} + (T_{se} - T_{ae}) \cdot (1 - K_v^*)] - T_{int}\}$$

Il flusso termico entrante (Q_{se}) attraverso la parete nuda (non protetta da coltre vegetale), invece, si può esprimere con la seguente relazione:

$$Q_{se} = U \cdot S \cdot (T_{se} - T_{int}) \text{ [flusso entrante dalla parete non vegetata]}$$

L'applicazione del K_v^* per stimare i flussi termici entranti in un edificio coperto da una facciata verde distaccata ha permesso di ottenere valori di flussi simili a quelli stimati sfruttando i dati sperimentali raccolti sulla parete verde dell'edificio prototipo presente nel CR ENEA Casaccia, come riportato Tabella 8. Il K_v^* permette dunque di approssimare i valori di flussi che raggiungerebbero le stanze di un edificio coperto da una facciata verde, elemento che potrebbe notevolmente avvantaggiare i tecnici in fase progettuale.

Tabella 8. Sommatoria dei flussi termici calcolati nei mesi da maggio ad agosto nell'anno 2021. Sono riportati i flussi entranti nella parete non vegetata, per la parete coperta dalla vegetazione (flusso verde) e il flusso stimato con l'applicazione del K_v^* .

Flusso termico specifico entrante (kWh_t/m²) esposizione Sud-Ovest, anno 2021			
Mesi	Flusso parete non vegetata	Flusso verde	Flusso K_v^*
maggio	1,05	0,06	0,00
giugno	2,08	0,44	0,54
luglio	3,21	1,45	1,53
agosto	3,49	1,62	1,77

In conclusione, gli effetti sulla possibile riduzione dei flussi termici attraverso l'impiego di un sistema di coltri vegetali sono stati analizzati sulla facciata Sud-Ovest dell'edificio verde presente nel CRENEA Casaccia. A tal fine è stata sviluppata una semplice metodologia per stimare la trasmissione dei flussi termici che si è dimostrata valida e applicabile. La sperimentazione effettuata durante un arco di tempo che ha incluso i mesi da maggio ad agosto ha evidenziato un effetto significativo di "schermatura" da parte della facciata verde ricoperta di *Parthenocissus quinquefolia*, nei confronti della radiazione solare incidente sull'edificio prototipo. La riduzione da parte dell'infrastruttura verde della temperatura della parete intonacata coperta, ha prodotto come conseguenza diretta, una riduzione di circa il 36% del flusso termico all'interno dell'edificio. I risultati ottenuti hanno dimostrato la validità della facciata verde impiegata nella sperimentazione, sulla riduzione del flusso termico e quindi sulla riduzione dei consumi di energia elettrica per il condizionamento dell'aria durante i mesi estivi. Le facciate verdi di rampicanti sono dunque vantaggiose nelle aree mediterranee con forte insolazione, poiché il "taglio" della radiazione solare riduce la temperatura superficiale delle facciate e quindi la trasmissione di flusso termico all'ambiente interno.

La sperimentazione effettuata ha consentito dunque di evidenziare che l'impiego della coltre vegetale di *P. quinquefolia* riduce l'apporto radiante sulla parete esposta alla radiazione solare incidente, in particolare, tale riduzione viene esplicitata attraverso l'impiego del parametro K_v^* . In generale, il valore di K_v^* risulta compreso nell'intervallo dei valori tra 0 e 1. In particolare, laddove K_v^* assumesse valore unitario (massimo

sviluppo fogliare della pianta) si avrebbe totale riduzione di flusso raggianti e quindi la temperatura della parete protetta corrisponderebbe alla temperatura dell'aria nell'intercapedine. Se, invece, K_v^* risultasse caratterizzato da valore nullo (sviluppo precario o assenza dell'apparato fogliare) non si avrebbe alcuna riduzione di flusso raggianti e, quindi, la temperatura della parete protetta sarebbe pari alla temperatura della parete nuda.

Pertanto si ha:

$K_v^* = 1 \rightarrow (T_{sev} - T_{aei}) = 0 \rightarrow T_{sev} = T_{aei} \rightarrow$ RIDUZIONE MASSIMA

$K_v^* = 0 \rightarrow (T_{sev} - T_{aei}) = (T_{se} - T_{ae}) \rightarrow$ RIDUZIONE ASSENTE

T_{sev} = Temperatura parete protetta dalla vegetazione

T_{aei} = Temperatura dell'aria nell'intercapedine

T_{ae} = Temperatura dell'aria esterna

T_{se} = Temperatura parete non protetta.

È opportuno sottolineare, inoltre, che la relazione relativa al flusso termico entrante attraverso la parete protetta (Q_{sev}) si potrebbe configurare come uno strumento di indagine utile all'operatore per selezionare la specie vegetale (K_v^*) più idonea alle caratteristiche dell'edificio sul quale viene inserita la coltre vegetale ai fini del risparmio energetico associato alla riduzione di energia elettrica per il condizionamento estivo.

Nelle ricerche future sarebbe auspicabile approfondire il tema della selezione di specie vegetali adatte a crescere in sistemi verdi verticali, con caratteristiche fogliari rispondenti all'obiettivo di massimizzare l'attenuazione dei flussi termici quando integrate nel tessuto costruttivo degli edifici di cui si potrà calcolare e approfondire anche il parametro K_v^* .

la specie vegetale (K_v^*) più idonea alle caratteristiche dell'edificio sul quale viene inserita la coltre vegetale ai fini del risparmio energetico associato alla riduzione di energia elettrica per il condizionamento estivo.

Nelle ricerche future sarebbe auspicabile approfondire il tema della selezione di specie vegetali adatte a crescere in sistemi verdi verticali, con caratteristiche fogliari rispondenti all'obiettivo di massimizzare l'attenuazione dei flussi termici quando integrate nel tessuto costruttivo degli edifici di cui si potrà calcolare e approfondire anche il parametro K_v^* .

3 Tetto Verde

3.1 Evoluzione del tetto verde nel corso del 2021

In Figura 19 si riportano le immagini scattate nel corso del 2021 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 un mix di *Sedum* (prevalenza di *Sedum spurium*).

febbraio 2021



Maggio 2021



Ottobre 2021



Figura 19. 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*.

3.2 Misura dell'evapotraspirazione delle piante sul tetto (sperimentazione vasi sul tetto)

3.2.1 Allestimento del sistema "verde" sul tetto verde

Il 27 luglio 2021, si è proceduto a posizionare sul tetto verde un "allestimento vegetale" in vaso al fine di approfondire gli studi dell'effetto dei processi evapotraspirativi delle piante sul raffrescamento del microclima del tetto dell'edificio, durante il periodo estivo. Tale processo è stato monitorato in parallelo con quello della serra bioclimatica (per i dettagli della sperimentazione nella serra bioclimatica si rimanda al §4.1) al fine di confrontare l'evapotraspirazione (ET) di alcune specie vegetali scelte nei due differenti ambienti: serra bioclimatica e tetto verde. Le piante di pomodoro provengono dalla serra bioclimatica, infatti il 26 luglio tre vasi di pomodoro, dei sei inizialmente presenti, sono stati trasferiti dalla serra bioclimatica sul tetto; invece, le piante di vite e di sedano provengono da un vivaio di zona. Sul tetto sono stati posizionati in totale 11 vasi, così distribuiti: n.3 vasi di pomodoro, n. 3 di vite, n. 5 di sedano. Ciascun vaso conteneva una singola pianta; per ciascuna specie sono stati utilizzati vasi di dimensione e forma simile sia sul tetto che nella serra bioclimatica (Figura 20, Figura 21, Figura 30).

Ciascuna replica è stata identificata con una sigla riportata di seguito:

Specie	Sigla
Pomodoro 1 (proveniente dalla serra bioclimatica)	P1
Pomodoro 2 (proveniente dalla serra bioclimatica)	P2
Pomodoro 3 (proveniente dalla serra bioclimatica)	P3
Vite 4	V4
Vite 5	V5
Vite 6	V6
Sedano 5	S5
Sedano 6	S6
Sedano 7	S7
Sedano 8	S8
Sedano 9	S9



Figura 20. Piante di vite e di pomodoro sul tetto verde, 13 agosto 2021



Figura 21. Piante di pomodoro sul tetto verde, 13 agosto 2021



Figura 22. Pianta di sedano sul tetto verde, 13 agosto 2021. Nella foto di dx è visibile l'impianto di irrigazione appositamente installato sul tetto a servizio delle piante orticole.

La misura della quantità di acqua evapotraspirata è stata effettuata utilizzando una bilancia a cella di carico simile a quella utilizzata nella sperimentazione parallela svolta nella serra bioclimatica. La variazione di peso è stata calcolata in relazione al consumo idrico e alla capacità evapotraspirativa del sistema pianta+vaso in un tempo di 6 ore.

3.2.2 Misura dell'evapotraspirazione sul tetto verde

La capacità evapotraspirativa delle specie vegetali è stata rilevata mediante la misura della variazione dei pesi dopo sei ore che il sistema pianta-suolo aveva raggiunto la capacità di campo. Si rimanda al capitolo della serra bioclimatica per ulteriori approfondimenti.

I risultati, riportati in Tabella 9, hanno mostrato che, nei mesi estivi e nelle condizioni del tetto verde presente in Enea, le piante possono arrivare a perdere per ET una quantità d'acqua che varia da 0,2 Kg a circa 1,64 Kg durante le 6 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.

I valori massimi di acqua evapotraspirata nelle condizioni sperimentali del tetto verde, evidenziati in grassetto nella Tabella 9, sono stati ottenuti il 4 agosto e sono stati di circa 1,64 kg di acqua evapotraspirata/pianta per le piante di pomodoro; 1,38 kg di acqua evapotraspirata/pianta per la vite e 0,70 kg di acqua evapotraspirata/pianta per le piante di sedano.

In Tabella 10 è riportata la quantità di acqua totale evapotraspirata nel tetto verde da ciascuna specie, tenendo in considerazione il numero dei vasi presenti. La maggior ET si è verificata il 4 agosto con 12,56 Kg di acqua evapotraspirata nel corso delle 6 ore di osservazione.



Figura 23. A) Piante di vite, B) piante di pomodoro, C) piante di sedano, posizionate sul tetto verde durante il monitoraggio dell'evapotraspirazione.

Tabella 9. Acqua mediamente evapotraspirata, sul tetto verde, da ciascuna pianta durante le giornate monitorate (6 h di sperimentazione) nel periodo agosto-ottobre 2021

Quantità media di acqua ET (kg) per pianta									
Tetto verde	03-ago	04-ago	13-ago	25-ago	31-ago	01-set	15-set	20-set	04-ott
Sedano	0,48	0,70	0,52	0,35	0,55	0,55	0,39	ND	0,23
Pomodoro	0,81	1,64	0,62	0,68	0,59	0,71	0,47	0,41	0,38
Vite	0,68	1,38	0,55	0,61	0,79	1,22	0,64	0,95	0,57

Tabella 10. Acqua evapotraspirata dal “sistema verde” sul tetto verde in un tempo di 6 ore nelle giornate indicate

Quantità di acqua ET (kg) per specie vegetale nel tetto verde									
	03-ago	04-ago	13-ago	25-ago	31-ago	01-set	15-set	20-set	04-ott
Sedano	2,42	3,50	2,60	1,74	2,74	2,76	1,96	ND	1,13
Pomodoro	2,42	4,92	1,87	2,04	1,78	2,14	1,40	1,24	1,14
Vite	2,04	4,14	1,64	1,84	2,36	3,66	1,92	2,85	1,71
Totale	6,88	12,56	6,11	5,62	6,88	8,56	5,28	4,09	5,28
kg ET/h	1,15	2,09	1,02	0,94	1,15	1,43	0,88	0,68	0,88

3.2.3 Efficienza di assorbimento della radiazione luminosa da parte del sistema vegetale sul tetto verde

Per calcolare quanto l’evapotraspirazione delle piante possa contribuire a migliorare il microclima del tetto, intercettando la radiazione luminosa, si riportano in Tabella 11 i valori di irraggiamento assorbito dal sistema vegetale nel tetto verde nei giorni di monitoraggio dell’ET calcolati considerando la potenza (KW) necessaria all’evapotraspirazione di 1 kg di acqua in 1 ora di tempo.

Tabella 11. Irraggiamento assorbito [W/mq] dal sistema vegetale nel tetto verde

Irraggiamento assorbito [kW/mq] dal sistema vegetale nella serra bioclimatica									
	03-ago	04-ago	13-ago	25-ago	31-ago	01-set	15-set	20-set	04-ott
ET (kg) totale del sistema vegetale	6,88	12,56	6,11	5,62	6,88	8,56	5,28	4,09	5,28
kg ET/h	1,15	2,09	1,02	0,94	1,15	1,43	0,88	0,68	0,88
kg ET/m ² /h	0,14	0,25	0,12	0,11	0,14	0,17	0,10	0,08	0,08
Irraggiamento assorbito [W/mq]	94,00	171,61	83,48	76,79	94,00	116,96	72,14	55,88	54,38

Considerando un’evapotraspirazione massima registrata sul tetto verde durante la sperimentazione di 2,09 kg ET/h (dati del 4 agosto 2021) e che la potenza (KW) necessaria all’evapotraspirazione 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 solare assorbito dalle piante che hanno evapotraspirato in totale 0,25 kg ET/mq/h è rapportabile ad una potenza media pari a circa 0,17 KW/mq. Dunque, 170 W/mq è l’irraggiamento solare utilizzato mediamente dal sistema vegetale nelle 6 h di osservazione per il processo di ET. La potenza solare media incidente e trasmessa alle piante nella serra, per il giorno 4 agosto, è stata di 610 W/mq, media nelle 6 ore di osservazione; pertanto, la presenza del sistema verde ha assorbito il 28% della potenza solare incidente, generando un carico latente anziché

sensibile. In Figura 24 si riporta l'andamento della potenza solare incidente e trasmessa alle piante, tra le ore 12:00 e le ore 17:00, per il giorno 4 agosto, la cui media è stata di circa 610 W/mq ed una temperatura media dell'aria di 31°C.

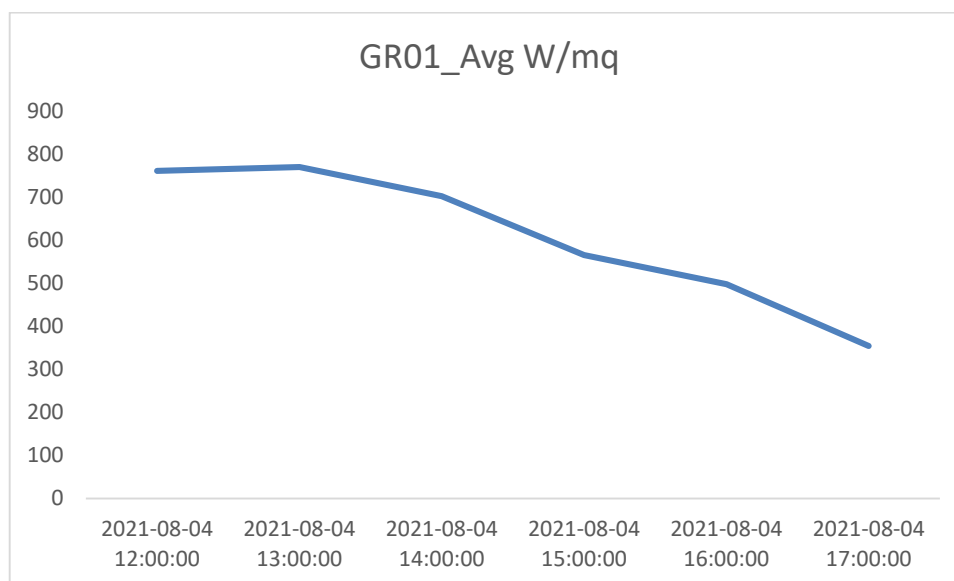


Figura 24. Potenza solare incidente e trasmessa alle piante il giorno 4 Agosto 2021

3.2.4 Capacità produttiva sul tetto verde e nella serra bioclimatica

Nel corso della sperimentazione dell'ET si è valutata la capacità produttiva delle piante di pomodoro cresciute sia sul tetto verde che nella serra bioclimatica. Le piante di pomodoro sul tetto verde, nel corso del ciclo colturale, hanno prodotto in totale n.465 frutti maturi e avuto una resa totale di 3,59 Kg; se consideriamo la singola pianta di pomodoro sul tetto verde, ogni pianta ha prodotto, in un ciclo colturale una media di 155 frutti con una resa di 1,20 kg/pianta. Confrontando questi dati con quelli ottenuti nella serra bioclimatica, si vede che le condizioni della serra, scelte per questa sperimentazione (schermatura alla radiazione solare per contenere la temperatura dell'aria interna e illuminazione a LED), hanno consentito la produzione totale di n.446 frutti maturi e una resa totale di 3,99 Kg; se consideriamo la singola pianta di pomodoro in serra bioclimatica "verde", ogni pianta ha prodotto, in un ciclo colturale, una media di n.149 frutti con una resa di 1,33 kg/pianta. Pertanto, questi risultati dimostrano che le condizioni della serra bioclimatica hanno consentito di ottenere una produzione molto simile a quella ottenuta sul tetto verde. In Figura 25 le piante di pomodoro con i frutti allo stadio di maturazione da raccolta, sul tetto verde e nella serra bioclimatica.

	tetto verde	serra bioclimatica
Totale frutti maturi (kg)	3,59	3,99
Totale frutti maturi (N°)	465	446
Totale frutti maturi /pianta (kg)	1,20	1,33
Totale frutti maturi/pianta (N°)	155	149



Figura 25. Piante di pomodoro con frutti maturi cresciute sul tetto verde (a dx) e nella serra bioclimatica (sx)

Di seguito si riporta la distribuzione della raccolta dei frutti maturi (espressa sia in numero di frutti che in Kilogrammi di peso) durante il periodo 13 agosto-6 ottobre, sia sul tetto verde che nella serra bioclimatica (Figura 26 e Figura 27 rispettivamente).

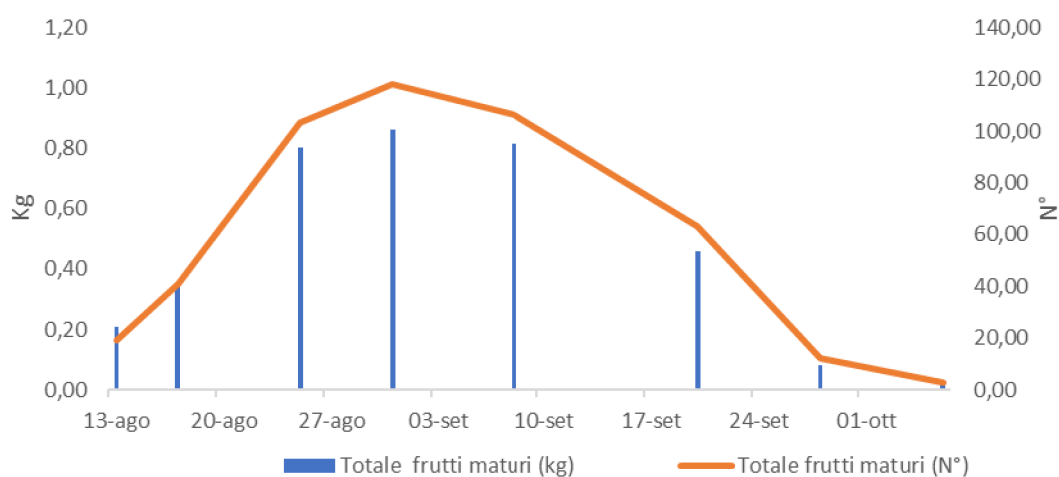


Figura 26. Produzione di pomodoro/pianta sul tetto verde durante il ciclo colturale.

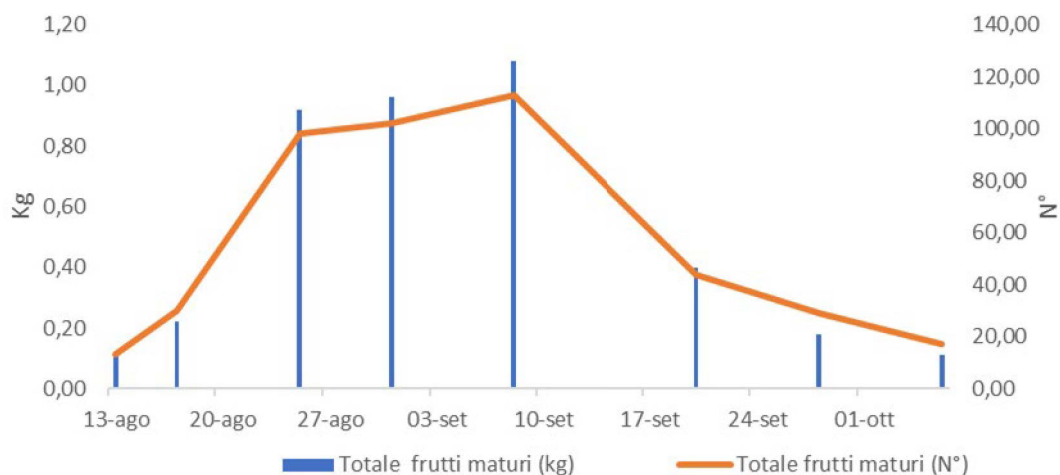


Figura 27. Produzione di pomodoro/pianta nella serra bioclimatica durante il ciclo culturale.

In conclusione, nel 2021 abbiamo osservato che tra la produzione di pomodori ottenuta sul tetto ed in serra bioclimatica non ci sono state differenze rilevanti. Inoltre, rispetto alla produzione in serra dello scorso anno, 2020 (dati non riportati), abbiamo osservato sia una migliore *performance* di crescita delle piante che una maggiore produzione di frutti che probabilmente è collegata alla migliore illuminazione disponibile per le piante rispetto a quella ricevuta nel 2020. La miglioria si è creata nella serra bioclimatica grazie all’inserimento delle lampade a LED (vedi capitolo serra bioclimatica) che ha consentito un miglior sviluppo delle piante. Tutto ciò, anche in linea con l’effetto benefico riscontrato dall’introduzione dei LED in serra bioclimatica sul microclima della serra stessa, includendo effetti positivi sulla ventilazione e il raffrescamento.

3.3 Sperimentazione sull'albedo

3.3.1 L'albedo delle superfici

L'albedo delle superfici ricoperte da coltri vegetali è una proprietà radiativa che influisce notevolmente sulla *performance* termica di un edificio, in quanto la superficie di un tetto ricoperto da vegetazione presenta un'albedo più alta rispetto ad un tetto tradizionale. L'albedo di una superficie ne rappresenta il suo potere riflettente e corrisponde alla percentuale di radiazione che viene riflessa in tutte le direzioni da quella superficie rispetto al totale della radiazione solare incidente, tale che:

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

L'albedo minima è pari a 0 quando nessuna frazione di luce viene riflessa come nel caso di una superficie nera, mentre l'albedo massima è pari ad 1 quando tutta la radiazione incidente viene riflessa come nel caso di una superficie bianca. In Tabella 12 vengono riportati i valori medi di albedo misurati su differenti tipi di superficie reperibili da varie fonti su internet.

Tabella 12. Valori di albedo di differenti tipi di superficie

TIPO DI SUPERFICIE	ALBEDO
Prato	0,25-0,30
Prato secco	0,20
Alberi	0,15-0,18
Boschi e foreste	0,05-0,20
Asfalto	0,05-0,20
Strada sterrata	0,04
Tetto con vernice colorata	0,15-0,35
Tetto con vernice bianca	0,50-0,90
Tetto con mattonelle rosse/marroni	0,10-0,35
Tetto con elevata riflettanza (tetto freddo, <i>cool roof</i>)	0,60-0,70
Neve	0,75
Superficie acquosa	0,03-0,10
Deserto	0,21-0,28
Sabbia asciutta	0,18-0,30
Sabbia umida	0,09-0,18

Un maggior valore di albedo corrisponde ad una riduzione dell'accumulo di calore; pertanto, considerando che, mediamente, la terra presenta un'albedo di 0,29-0,31 e le città di 0,10, si evince che le aree urbane assorbono più luce e riscaldano di più.

In pratica, le superfici di colore scuro (Figura 28 a sinistra) riflettono meno luce solare di quelle chiare (Figura 28 a destra), trasformando più energia solare in calore. L'aumento della riflettanza dei nostri edifici e delle superfici pavimentate, sia attraverso superfici chiare che superfici colorate riflettenti, può ridurre la temperatura di edifici e città.

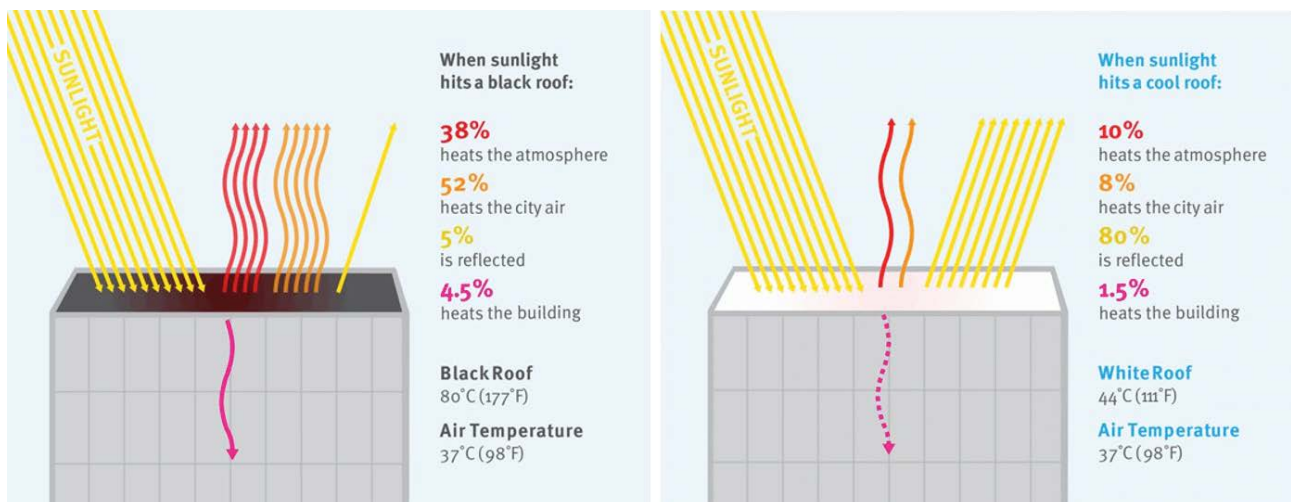


Figura 28. Effetto di un tetto scuro (a sinistra) e di un tetto bianco (a destra) sulla radiazione incidente sulla superficie. In un tetto scuro solo il 5% della radiazione viene riflessa, il resto scalda l'atmosfera, l'aria in città e l'edificio. In un tetto chiaro fino all'80% di radiazione viene riflessa. Immagine tratta dalla pagina web <https://globalcoolcities.org/discover/cool-science/how-it-works/>

Il cosiddetto effetto dell'isola di calore nelle aree metropolitane, determinato dall'intensa urbanizzazione e dall'impiego di materiali edilizi a basso albedo, fa riferimento all'aumento significativo delle temperature in città soprattutto nei periodi più caldi, comportando in parallelo un notevole aumento nel consumo di energia, oltre ad influire negativamente sulle condizioni di comfort microclimatico e ad intensificare il problema dell'inquinamento ambientale dell'aria. Se si stima che un aumento globale dell'albedo di 0,1 in una città comporta una riduzione della temperatura media di circa 0,3°C e una riduzione del picco di temperatura ambiente di circa 0,9°C, tale piccolo incremento di albedo si tradurrebbe in estate in un risparmio dell'ordine del 10-40% sul carico energetico per il raffreddamento delle superfici [16].

Dal momento che l'area di terreno libera disponibile in ambiente urbano è in genere limitata, oltre che di valore economico molto elevato, l'impiego di tecnologie per la mitigazione dell'isola di calore direttamente sulla superficie del suolo in città risulta relativamente arduo. Per questo motivo, i tetti in città rappresentano uno spazio ideale da sfruttare per l'implementazione di tecnologie visto che, sempre per l'urbanizzazione, gli spazi dedicati al verde vengono a ridursi mentre aumentano le coperture degli edifici [16].

Le tecnologie di mitigazione dell'isola di calore urbana più importanti associate ai tetti, che consentono di abbassare le temperature superficiali dei lastrici solari, determinando così un miglior comfort termico all'interno dell'edificio, e di diminuire il flusso di calore latente verso l'atmosfera, possono essere classificate in due tipi principali: quelle che mirano ad aumentare l'albedo dei tetti, trattasi dei cosiddetti tetti freddi (*cool roof*) o riflettenti [17], e quelle che prevedono la ricopertura parziale o totale con vegetazione dei tetti, trattasi dei tetti verdi [18]. I tetti freddi sono tipicamente bianchi (*white roof*), hanno un'albedo elevata e rappresentano un'ottima soluzione per la climatizzazione. Tali tetti bianchi sono già tipici in ambienti mediterranei ed hanno il vantaggio di essere facili da realizzare. Diversamente, i tetti verdi come soluzione strategica apportano un numero maggiore di benefici rispetto ai tetti dipinti di bianco. In particolare, il loro vantaggio aggiuntivo principale, di tipo ecologico, è che tramite le piante si verifica una riduzione della CO₂. Inoltre, le piante possono esercitare ulteriori effetti benefici quando coltivate sulle superfici dei tetti nelle aree urbanizzate, tra cui migliorare la qualità dell'aria, anche catturando elementi nocivi, inclusi i composti organici volatili (COV) ed il particolato. È stato rilevato che, in condizioni di temperatura dell'aria ambiente di 33°C, a metà pomeriggio di una giornata calda, la temperatura

superficiale raggiunta da un tetto nero è di 68°C, in un tetto bianco riflettente è mantenuta a 42°C, mentre in un tetto verde risulta compresa tra 31 e 38°C [19]. La maggiore riduzione di temperatura ottenuta con l'impiego dei tetti verdi, nonostante l'albedo più alto che contraddistingue i tetti bianchi, non è dovuta interamente alle proprietà radiative della copertura vegetale, bensì in gran parte alla evapotraspirazione delle piante [19].

L'albedo delle superfici vegetali è per lo più compreso tra 0,20 e 0,35 ed il suo valore è dipendente dalle condizioni climatiche (come l'umidità e l'angolo di incidenza dei raggi solari), dall'indice di copertura fogliare (LAI) e dall'intensità del colore (verde) delle piante presenti. Al crescere del LAI diminuisce la forzante radiativa solare sulla superficie ed un aumento del LAI da 2 a 5 determina una riduzione molto significativa della trasmissione solare della vegetazione [20]. Altri parametri colturali influenti sull'albedo delle superfici vegetali includono la copertura del suolo, la temperatura fogliare, umidità fogliare e altezza delle piante.

3.3.2 Caso studio ENEA: albedo e Influenza dei dati biometrici del tetto verde

Per una buona definizione energetica dei sistemi verdi in relazione alla loro caratteristica di riflettanza, la ricerca ENEA ha previsto di misurare l'albedo nei sistemi di "tetto verde", con il fine di incrementare le conoscenze disponibili a supporto della scelta delle specie di piante che risultino maggiormente adatte ad essere impiegate in queste infrastrutture, migliorando l'efficienza energetica degli edifici e, contemporaneamente, contrastando il fenomeno dell'isola di calore urbano.

La sperimentazione è stata condotta con un albedometro portatile, descritto in dettaglio nei report RdS 2019 [21] e 2020 [5] sul tetto verde ENEA (Figura 29).



Figura 29. Albedometro LPPYRA11 della DELTAOHM sul tetto verde ENEA. In primo piano nella fotografia a sinistra è visibile la centralina wireless.

A livello del settore a prato di Graminaceae, costituito da un mix di Festuca e Poa, il grafico dei valori di albedo nell'arco di 24 ore di una giornata di fine inverno, quale ad es. il 2 marzo 2021 (Figura 30), utilizzando la media oraria dei valori registrati ogni 5 minuti, evidenzia oscillazioni molto piccole dalle ore 9:00 alle 17:00, con un picco superiore di albedo (23,14%) alle ore 13:00 ed un picco inferiore (22,21%) alle ore 14:00. Il calo dell'albedo inizia dopo le ore 16:00 fino a crollare del tutto, risultando naturalmente pari a

zero nelle ore di assenza di luce. La temperatura fogliare, invece, raggiunge il suo picco più alto (23,3 °C) dalle ore 14:00 alle 15:00, come la temperatura dell'aria (20,1 °C, Figura 30).

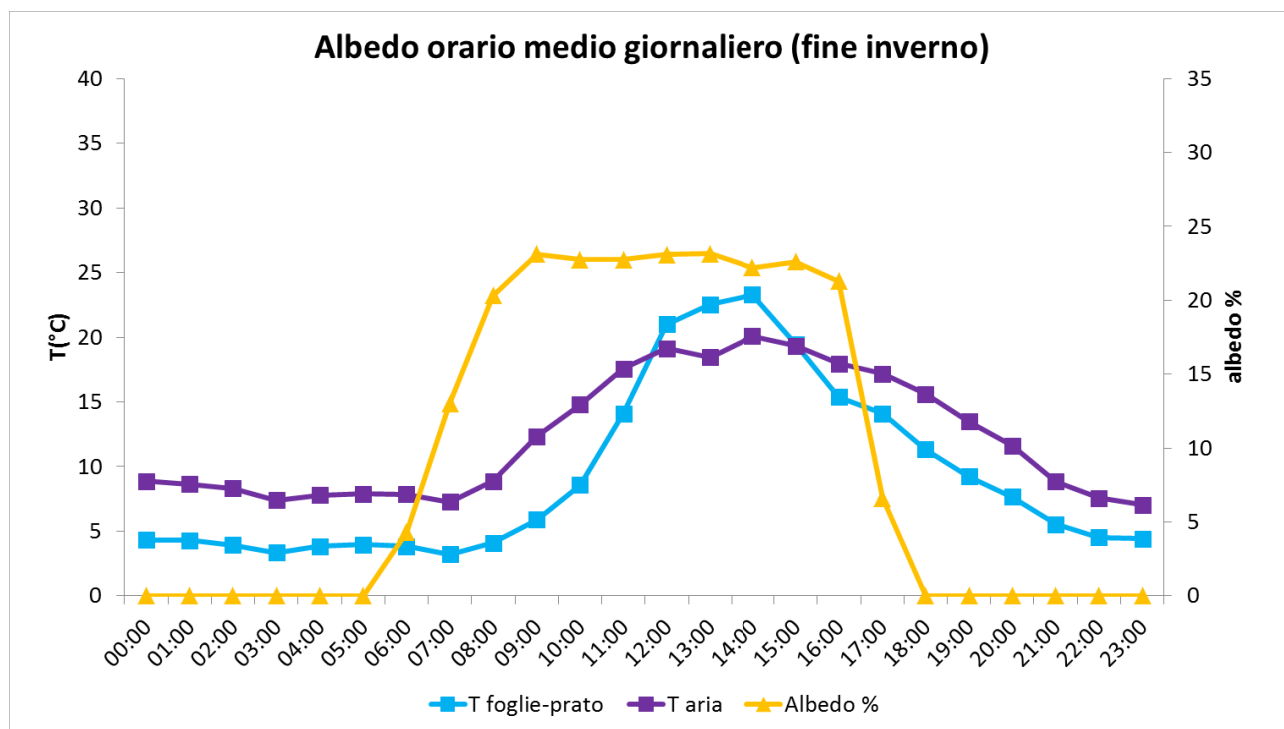


Figura 30. Grafico a doppio asse dell'andamento dell'albedo (linea gialla), della temperatura sul tetto a livello della superficie fogliare (linea azzurra) e della temperatura dell'aria (linea viola) nelle 24 ore di una tipica giornata di fine inverno (2 marzo 2021). I dati riportati rappresentano le medie orarie dei valori misurati dai sensori disposti sul settore di prato a Graminacee. In ordinata a sinistra sono riportati i valori di temperatura (°C) e a destra i valori di albedo espressi in %; in ascissa sono riportate le 24 ore della giornata, dalle 00:00 alle 24:00.

Diversamente, sempre nel settore di prato a Graminacee, il grafico dei valori di albedo nell'arco di 24 ore di una giornata estiva, quale ad es. il 12 agosto 2021 (Figura 31), mostra un andamento a "M", con un picco inferiore corrispondente ad un valore più basso dell'albedo (20,3%) nelle ore centrali più soleggiate della giornata, tra le 13.00 e le 14.00. Due ulteriori picchi superiori si rilevano, rispettivamente, nelle prime ore della mattina intorno alle 8:00 (30,0%) e nel pomeriggio intorno alle 17:00 (21,8%). Osservando contemporaneamente anche gli andamenti della temperatura a livello della superficie del prato di Graminacee e della temperatura dell'aria, si nota come le due curve tendano a sovrapporsi proprio nelle ore centrali e a discostarsi allontanandosi dalle ore centrali in ambedue le direzioni (Figura 31). Gli scostamenti tra temperatura delle foglie e temperatura dell'aria potrebbero essere collegati agli effetti dell'albedo e alla risposta fisiologica delle piante, che determinano un certo livello di raffrescamento della temperatura a livello della superficie verde del tetto. In particolare, la risposta fisiologica della pianta risiede nella termoregolazione della foglia: a temperature superiori ai 30 °C si ha una forte riduzione dell'efficienza di termoregolazione della foglia contemporaneamente alla riduzione dell'attività fotosintetica.

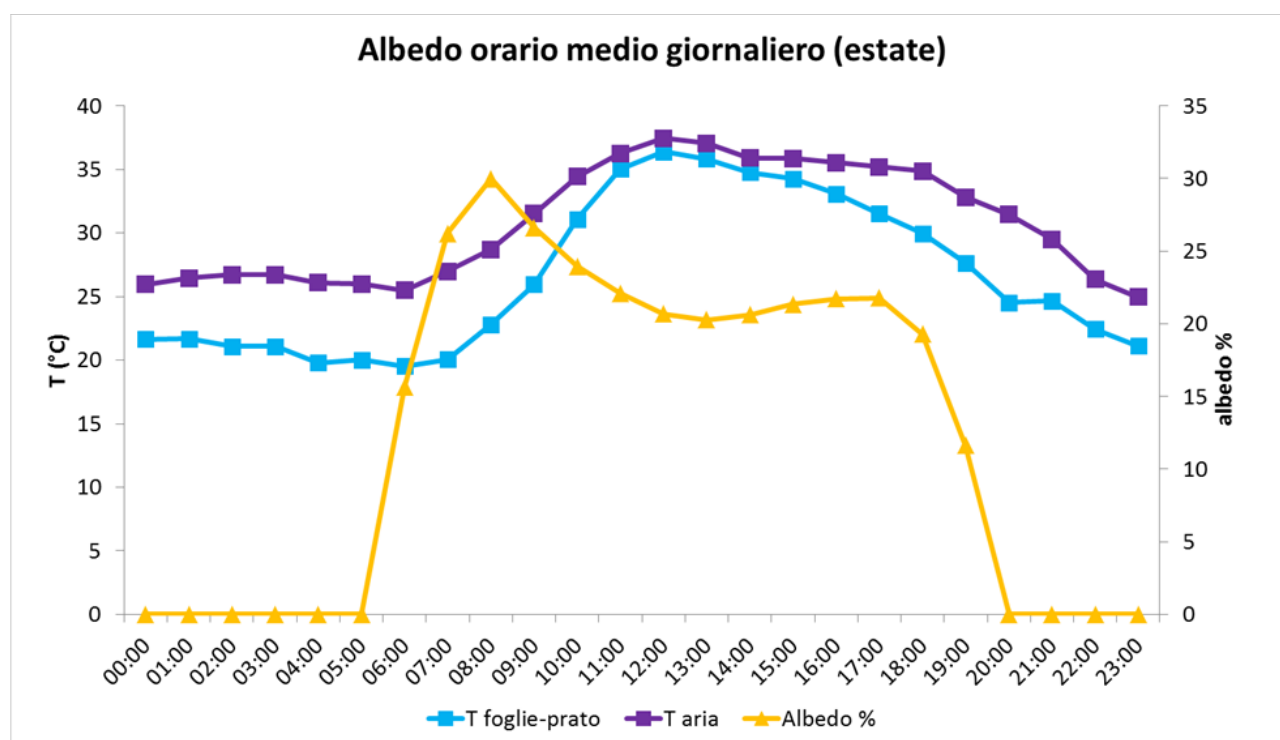


Figura 31. Grafico a doppio asse dell'andamento dell'albedo (linea gialla), della temperatura sul tetto a livello della superficie fogliare (linea azzurra) e della temperatura dell'aria (linea viola) nelle 24 ore di una tipica giornata estiva (12 agosto 2021). I dati riportati rappresentano le medie orarie dei valori misurati dai sensori disposti sul settore di prato a Graminacee. In ordinata a sinistra sono riportati i valori di temperatura (°C) e a destra i valori di albedo espressi in %; in ascissa sono riportate le 24 ore della giornata, dalle 00:00 alle 24:00.

Oltre alle dinamiche giornaliere rilevabili nell'arco delle 24 h (Figura 30 e Figura 31, l'albedo di una superficie vegetale su un tetto presenta un andamento dinamico legato alla stagione e ai parametri microclimatici, alla morfologia della biomassa vegetale e al livello di copertura. In Figura 32 è mostrata la variazione dei valori di albedo tra la copertura di prato a Graminacee (22.38%) e la copertura a *Sedum*, includendo la fase invernale tipicamente di colore rosso (18.19%) del *Sedum spurium* e la sua fase primaverile tipicamente di colore verde (19.20%). Nell'ambito della stessa specie, il monitoraggio ha messo in evidenza una differenza significativa di 1 punto percentuale (pp) dell'1% nel valore dell'albedo dovuta alla stagionalità e di conseguenza alla colorazione delle piante. Inoltre, tra i valori di albedo sul prato a Graminacee e quelli sul prato a *Sedum* rosso, misurati in periodi contigui ad inizio marzo 2021 (1-4 marzo per il prato a Graminacee e 6-9 marzo per il prato a *Sedum* rosso), è stata rilevata una differenza significativa di 4 pp. Tale differenza è ascrivibile all'ampia diversità esistente tra le due specie vegetali, incluse la loro colorazione e altre caratteristiche morfo-fisiologiche, tra le quali la tipologia dello strato ceroso che ricopre i tessuti vegetali delle piante delle due specie.

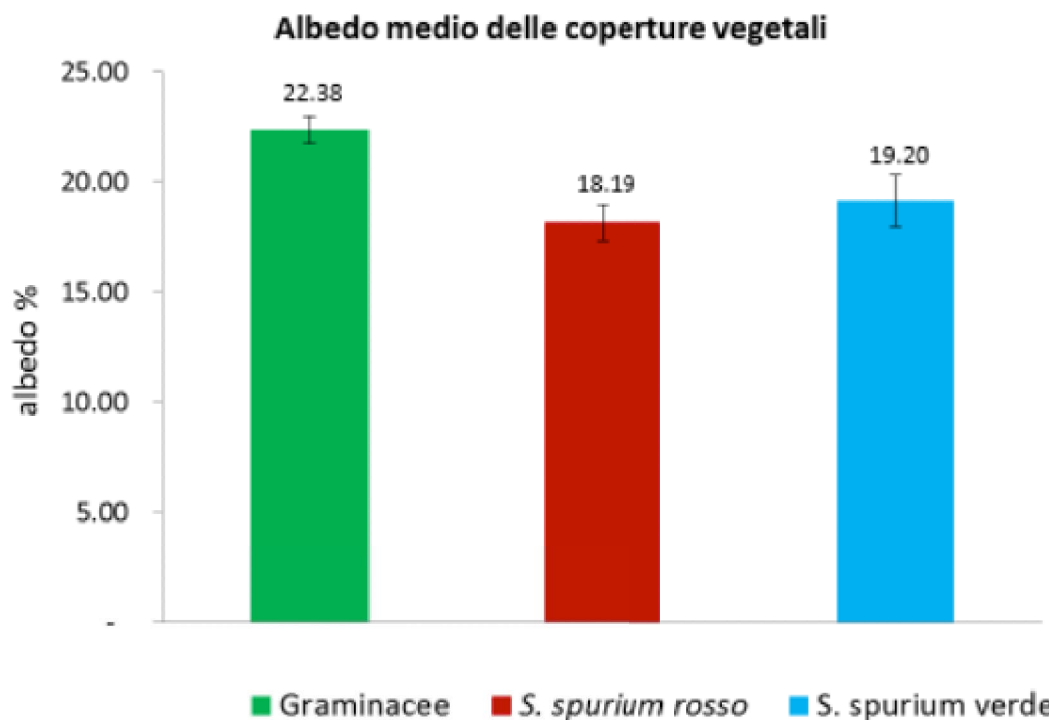


Figura 32. Istogramma dei valori medi dell'albedo (%) registrati durante 4 giorni sul tetto verde in inverno, a livello delle superfici coperte da prato di Graminacee (barra verde, 1-4 marzo 2021), prato di *Sedum spurium* rosso (barra rossa, 6-9 marzo 2021) e prato di *Sedum spurium* verde in primavera (barra azzurra, 29 maggio-1 giugno 2021). I valori rappresentati sono le medie dei dati registrati ogni 5 minuti, escludendo tutti i valori misurati in condizione di radiazione incidente $<150 \text{ W/m}^2$; le barre di errore indicano la deviazione standard.

Nel settore del tetto coperto dal tappeto di graminacee è stata monitorata l'albedo in relazione allo spessore e alla crescita del prato. Lo spessore dello strato di biomassa verde, equivalente all'altezza delle foglie di *Festuca*, compreso tra il suolo e il confine tra biomassa vegetale ed aria, è stato misurato con cadenza settimanale. In particolare, è stata misurata l'altezza di 10 culmi in 6 differenti punti di campionamento randomizzati rappresentativi dell'area di rilevazione dell'albedometro (Figura 33).



Figura 33. Sito sperimentale dell'analisi dell'albedo in relazione allo spessore del prato, nel settore di prato a graminacee sul tetto verde ENEA (C.R. Casaccia). Le palette gialle sul prato indicano i punti di misurazione dell'altezza delle foglie. Foto del 17 luglio 2021.

L'andamento giornaliero medio dell'albedo in relazione allo spessore del prato, monitorato durante due mesi dal 24 giugno al 24 agosto 2021, è un andamento di tipo crescente: l'albedo aumenta all'aumentare dell'altezza del prato, passando da un valore pari a 20.5% nella situazione di prato appena tagliato (altezza di circa 5 cm, 24 giugno 2021) ad un valore di 21.6% registrato a fine prova (altezza circa 12 cm, 21 agosto 2021). Dal 30 luglio al 23 agosto 2021 l'altezza massima del prato si è mantenuta costante, ma nel tempo è aumentata la densità delle foglie, fattore che può giustificare il continuo aumento dell'albedo anche dopo il 30 di luglio (Figura 34).

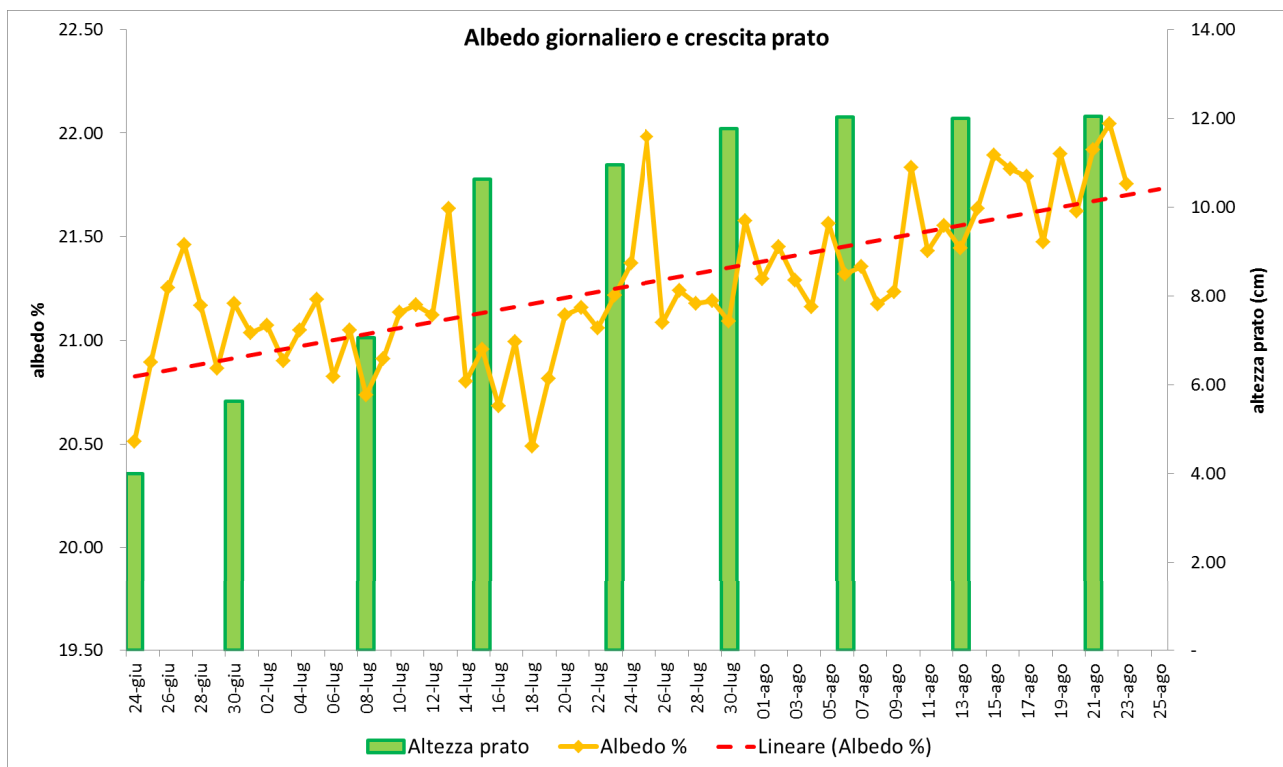


Figura 34. Grafico a doppio asse dell'andamento dell'albedo (linea gialla) e dello spessore del prato (istogramma verde) registrati dal 24 giugno al 24 agosto 2021 nel settore di prato a graminacee sul tetto verde. In ordinata a sinistra sono riportati i valori di albedo espressi in % e a destra i valori di altezza del prato in cm; in ascissa sono riportati i giorni. La linea di tendenza (tratteggiata rossa) risultante dalla regressione lineare ($R^2=0.5057$) è relativa ai valori di albedo di cui dimostra un evidente andamento positivo.

Questi risultati consentiranno di stabilire indicazioni opportune e precise a supporto di una migliore pianificazione e gestione di un tipico tetto verde di tipo estensivo con copertura a graminacee (e non solo), con l'obiettivo di massimizzare l'effetto mitigante di un tetto verde sull'isola di calore urbana e sulle emissioni inquinanti. Bisogna inoltre considerare che un prato con uno spessore di biomassa maggiore si suppone favorisca un incremento dell'attività evapotraspirante. Un'aumentata evapotraspirazione, se da un lato può aumentare la capacità del tetto verde di stoccare le acque piovane, da un altro richiederà un'irrigazione costante e coerente con le attività fisiologiche delle piante. In questo contesto, la gestione dell'irrigazione è un aspetto fondamentale, soprattutto per i tetti verdi calpestabili ove si voglia conseguire e mantenere una funzione sociale-ricreativa e di conseguenza anche estetica.

La sperimentazione ENEA è ancora in corso e, attualmente, si sta anche indirizzando verso la misura dell'albedo a livello di diverse coperture vegetali, con l'obiettivo di fornire indicazioni di supporto per la selezione di essenze vegetali con albedo elevata. Tra le specie vegetali da testare, si prevede di includere anche piante spontanee. È degno di nota, infatti, che nel bacino del Mediterraneo siano presenti numerosi specie di piante xerofite adattate a vivere in ambienti caratterizzati da lunghi periodi di siccità o da clima arido o desertico, che sfruttano anche la morfologia fogliare e annessi secondari dell'epidermide, come ad esempio i tricomi, per ridurre la radiazione luminosa assorbita riflettendone una quota maggiore.

Nel corso del 2021 è stato condotto anche lo studio delle variazioni dell'albedo della copertura di crassulacee, infatti il *Sedum spurium*, attualmente specie prevalente, è caratterizzato da transizioni di colorazione stagionali che potrebbero influenzare la riflettanza della copertura verde. Nel grafico in Figura 35 sono riportati i valori di albedo registrati sulla copertura di *Sedum spurium*, si nota come ai due estremi di marzo e agosto prevalga la colorazione rossa mentre nelle misurazioni intermedie di maggio la colorazione viri verso il verde. L'albedo nonostante il cambiamento di colorazione non sembra seguire l'andamento atteso; infatti, se a marzo sembrerebbe prevedibile un abbassamento del valore della albedo avendo il rosso scuro un'albedo minore del verde chiaro, ma nel corso della stagione l'albedo continua a salire sia con la colorazione verde che anche con quella rossa assunta in tarda estate. La colorazione del sedum muta per proteggere la pianta dagli sbalzi termici invernali prima, e dai picchi termici e di radiazione estivi poi, non sono da escludere delle variazioni eco-fisiologiche che concorrono all'innalzamento dei valori di albedo quale ad esempio potrebbe essere l'ispessimento delle cere cuticolari.

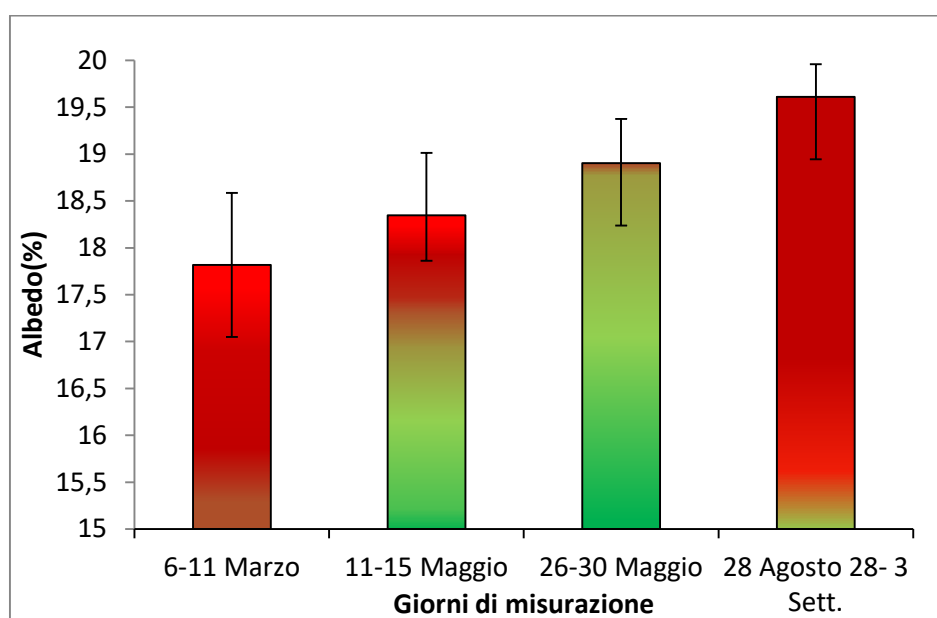


Figura 35. Grafico che riporta i valori di albedo registrati con misurazioni effettuate da marzo ad agosto, il colore degli istogrammi richiama la colorazione del *Sedum spurium* durante i relativi giorni di misurazione. Le barre indicano la $\pm$ deviazione standard

Dati questi risultati, sarebbe di interesse approfondire il ruolo della pianta nella modifica delle sue proprietà termiche, aspetto che può volgere l'attenzione sulla ricerca di specie vegetali, non solo dalle colorazioni chiare che dovrebbero possedere un elevato albedo, ma anche caratterizzate da meccanismi adattativi che potrebbero renderle competitive sui tetti verdi estensivi ed efficaci nel contribuire alla mitigazione dell'isola di calore urbana.

3.4 Piante spontanee sui tetti verdi per l'efficienza energetica degli edifici con salvaguardia della biodiversità di flora e fauna

In questo paragrafo viene riportata una sperimentazione condotta sul tetto verde dell'ENEA Casaccia R.C. in accordo con le "politiche verdi" EU mirate alla salvaguardia e all'incremento della biodiversità in ambiente urbano. In particolare, lo scopo principale di questo studio è stato quello di selezionare specie di piante erbacee che potessero adattarsi alle condizioni avverse tipiche di un tetto verde in clima mediterraneo e che fornissero servizi ecosistemici utili per la sopravvivenza degli impollinatori. In definitiva, due specie erbacee spontanee ed autoctone sono state valutate sul tetto verde ENEA al fine di una loro inclusione in miscele di semi per prati fioriti, soprattutto, per tetti verdi e altri inverdimenti urbani in ambiente mediterraneo.

3.4.1 I tetti verdi favoriscono la biodiversità e la salvaguardia degli impollinatori

Attualmente, una delle più severe minacce per l'umanità e la sicurezza del sistema alimentare è rappresentata dal collasso dell'ecosistema globale causato dalla perdita delle api e degli impollinatori [22, 23, 24]. A contrasto di tale fenomeno, l'Europa ha già approvato numerose strategie e politiche incentrate sul capitale naturale e sullo sviluppo di servizi ecosistemici, identificati come principali fondamenti di nuovi modelli urbani, che promuovano soluzioni basate sulla Natura (NBS) per supportare le società nella risoluzione di una varietà di problemi ambientali e sfide sociali ed economiche. In questo ambito, la UE riconosce un elevato valore ambientale al verde urbano che può offrire rifugio per gli impollinatori e può rappresentare un valido strumento per la protezione della biodiversità degli insetti pronubi minacciati nelle campagne dall'utilizzo di pesticidi [25]. Tra le infrastrutture pensili urbane, i tetti verdi si sono già confermati come strumenti essenziali per la pianificazione di corridoi ecologici, finalizzati a rigenerare le nostre città e a renderle più sostenibili [25, 26]. Negli ultimi anni, in Europa Nord-Occidentale e nei paesi anglo-sassoni, la realizzazione di tetti verdi ha avuto un grande incremento, ed ora anche in Italia, grazie all'attuale fase di transizione ecologica, sono programmati importanti investimenti per le NBS, erogati nell'ambito del Piano Nazionale Resistenza e Resilienza (PNRR), con l'obiettivo di incrementare la sostenibilità delle nostre città, in linea con la strategia Europea per la Biodiversità del 2030 [27].

Il successo delle infrastrutture verdi nelle aree mediterranee potrà avvenire purtroppo solo dopo il reperimento e la selezione di piante specifiche, differenti da quelle di utilizzo consolidato nei tetti verdi in climi temperati, che sono incapaci di adattarsi alle condizioni climatiche della zona mediterranea, dove la stagione critica non è l'inverno come nel Nord Europa, bensì l'estate. Bisogna inoltre considerare che le condizioni ambientali sui tetti possono risultare ancora più critiche [28]. Purtroppo, le conoscenze su piante erbacee adatte ad essere utilizzate nei tetti verdi mediterranei sono ancora limitate ed il ritardo nell'individuazione di erbacee mediterranee è derivato in gran parte da una sopravvalutazione del valore ecologico e dell'utilizzo di piante grasse, soprattutto specie del genere *Sedum* della famiglia delle *Crassulaceae*. Tali specie sono state tradizionalmente considerate le più adatte all'applicazione sui tetti verdi mediterranei, in considerazione delle caratteristiche del loro apparato radicale poco profondo, del metabolismo CAM e della loro resistenza a condizioni di estrema [29, 30]. Tuttavia, oggi, alla luce della minaccia dovuta alla scomparsa degli impollinatori, dell'incremento nelle città di fenomeni di surriscaldamento e del livello aumentato di CO₂ atmosferico, si ritiene che l'utilizzo di tali specie sia meno vantaggioso rispetto a quello di piante erbacee caratterizzate da processi di fioriture, di evapotraspirazione e di capacità di sequestro della CO₂ di maggiore valore ecologico.

Di conseguenza, nell'ultimo decennio, in zona mediterranea, si è pertanto delineata una differente visione, che richiede ulteriori conferme, finalizzata all'inclusione di maggiore biodiversità di piante erbacee nel verde pensile al fine di ottenere maggiori vantaggi ambientali. In accordo con la rivoluzione verde che guida il nuovo *Green Deal* europeo, si consiglia infatti di riportare la natura nelle città inserendo anche specie erbacee spontanee native e con radici poco profonde [31], endemiche di ambienti aridi e caldi, oltre alle sopramenzionate *Crassulaceae*. Infatti, anche in Italia, la Legge del 14 gennaio 2013, n. 10, che sancisce nuove “Norme per lo sviluppo degli spazi verdi urbani”, individua la flora spontanea -includendo le specie erbacee - come un prezioso patrimonio capace di offrire importanti servizi ambientali ed energetici nelle nostre città. È purtroppo da constatare che l'Italia ha accumulato un ritardo significativo rispetto ad altri paesi europei nel ripristinare nelle città spazi verdi ricchi di biodiversità nativa. Pertanto, si attende la messa a disposizione di risorse per il censimento della biodiversità delle piante, la salvaguardia delle specie e la propagazione da seme di piante selvatiche native, specialmente fiorite, che rappresentano una straordinaria risorsa per i nostri impollinatori. Si rendono necessari sia un incremento dei monitoraggi sul territorio che forniscano dati aggiornati sulla presenza e sul declino delle specie botaniche e dei loro impollinatori, sia lo sviluppo di studi e ricerche per acquisire una maggiore conoscenza sulle esigenze ecologiche e fisiologiche delle piante più idonee [23].

3.4.2 Caso studio ENEA

Per prima cosa è stata condotta un'indagine bibliografica volta ad identificare specie vegetali che esibissero caratteristiche di resistenza allo stress idrico, buona capacità di auto-propagazione e di adattamento ai climi aridi tipici delle aree mediterranee, e che nello stesso tempo offrissero lunghe fioriture per attrarre e sostenere gli impollinatori. Come risultato dello studio, sono state selezionate due specie autoctone appartenenti al genere *Echium*, rispettivamente *Echium vulgare* L. ed *Echium plantagineum* L. [32, 33] (Figura 36).



Figura 36. Fioritura di *Echium vulgare* (foto tratta da <https://www.resnaturae.com/schede-prodotti/erba-viperina/>) a sinistra e di *Echium plantagineum* (foto tratta da [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Echium_plantagineum_plant8_\(13919288556\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Echium_plantagineum_plant8_(13919288556).jpg)) a destra.

E. vulgare L. è un'erbacea appartenente alla famiglia delle Boraginaceae, anche nota come viperina vulgare (Figura 36, a sinistra). Si tratta di una pianta entomogama, originaria dell'Europa, dell'Asia e della Cina occidentali, data come presente nella nostra penisola [34], ma rara o non comune in alcune regioni [35], e nota per essere particolarmente tollerante agli stress abiotici. Per il suo valore ecologico, l'*E. vulgare* è già da tempo comunemente utilizzata nei tetti verdi europei a clima temperato, pertanto la valutazione delle

prestazioni di questa specie anche in un tipico tetto verde di area mediterranea è risultata di particolare interesse. Pertanto, in questo studio abbiamo voluto verificare il livello di resistenza e resilienza di questa pianta durante le calde/aride estati mediterranee e se le fioriture in clima mediterraneo fossero simili a quelle esibite nei climi più temperati, per il sostegno dell'entomofauna. Infine, si è voluto constatare se, in accordo con le conoscenze disponibili, questa specie potesse favorire la connettività tra diverse aree verdi urbane essendo in grado di stimolare la mobilità degli impollinatori grazie all'abbondante offerta di nettare delle sue fioriture [36, 37] (Figura 37).

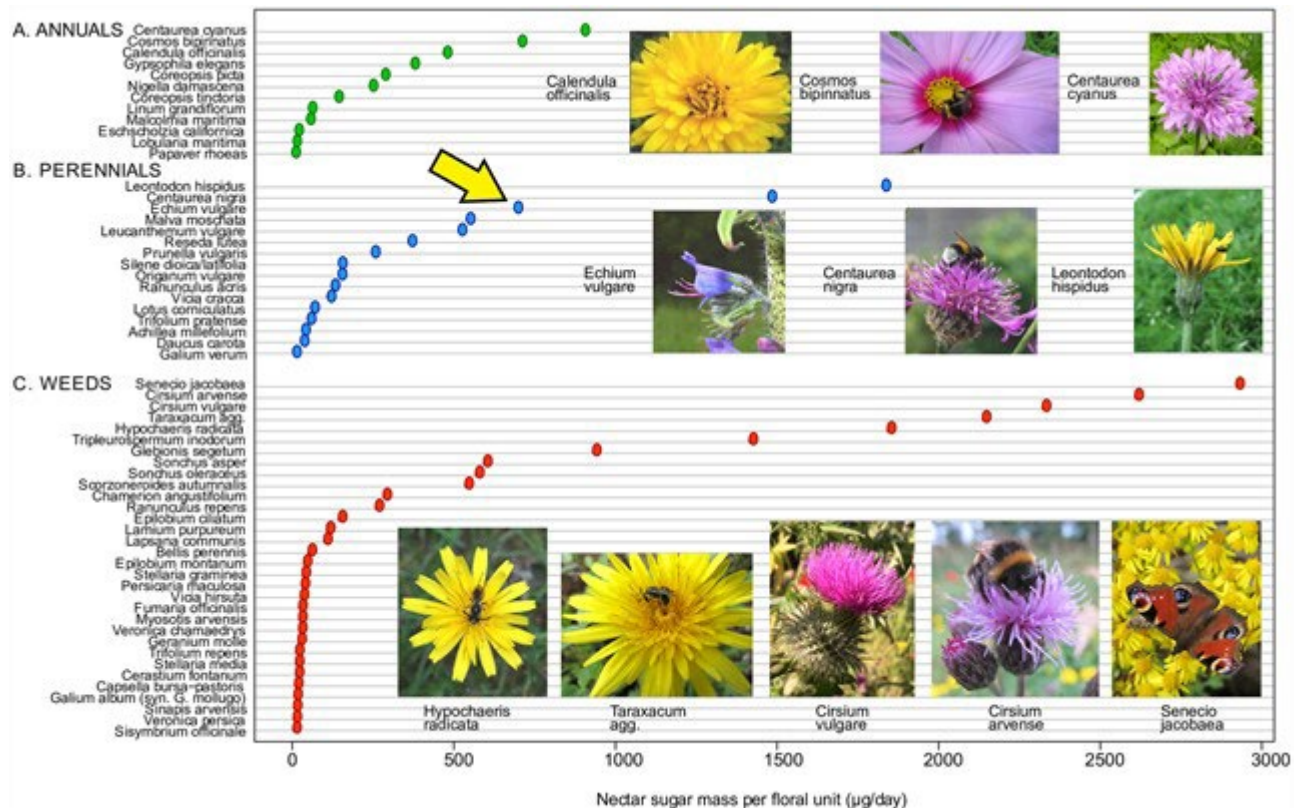


Figura 37. In base alla massa di zucchero presente nel nettare per unità di fiore, *Echium vulgare* è risultata essere, tra le numerose analizzate, la terza specie con maggiore quantità di zuccheri nel polline. Foto tratta da [36].

Diversamente, l'*E. plantagineum* (Figura 36, a destra) è una specie originaria delle regioni mediterranee e dell'Europa occidentale atlantica ed è data come molto comune nelle aree mediterranee, tanto in ambienti rurali che urbani [35, 38].

Per reperire le due specie è stata effettuata una campagna di monitoraggi in campo, in aree verdi situate nella regione Lazio, precisamente presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia ed entro i confini del Parco di Veio, oltre che in un'ampia rete di aree verdi e parchi situati nelle aree centrali della capitale. Nei monitoraggi la *viperina vulgare* è risultata irreperibile, nonostante la specie sia ancora censita come presente nel Lazio, mentre di *E. plantagineum* ne sono stati rinvenuti solo pochi esemplari. Pertanto, per l'*E. vulgare* abbiamo dovuto reperire i semi da un fornitore. Le osservazioni sul territorio hanno permesso di assegnare un elevato valore alle fioriture di *E. plantagineum*, sia per il loro colore ed appariscenza, che

per attrattività per gli impollinatori e durata delle loro visite. In bibliografia, *E. plantagineum* non risulta ancora utilizzata né raccomandata per l'inserimento nel verde pensile ed urbano [35].

3.4.3 Analisi comparativa delle due specie di *Echium* sul tetto verde ENEA

Sul tetto verde ENEA è stato condotto uno studio comparativo nell'ambito di una sperimentazione di durata triennale. Le due specie di *Echium* sono state valutate in relazione a diverse caratteristiche delle piante, tra cui la morfologia dei semi, dello stadio di rosetta e dell'infiorescenza, oltre che altri tratti relativi ai fiori, alle radici e alle caratteristiche del loro ciclo biologico. Nonostante le due specie di *Echium* condividano numerosi tratti simili, si distinguono nettamente per altre caratteristiche, come ad es. la morfologia dei semi e della rosetta (Figura 38).

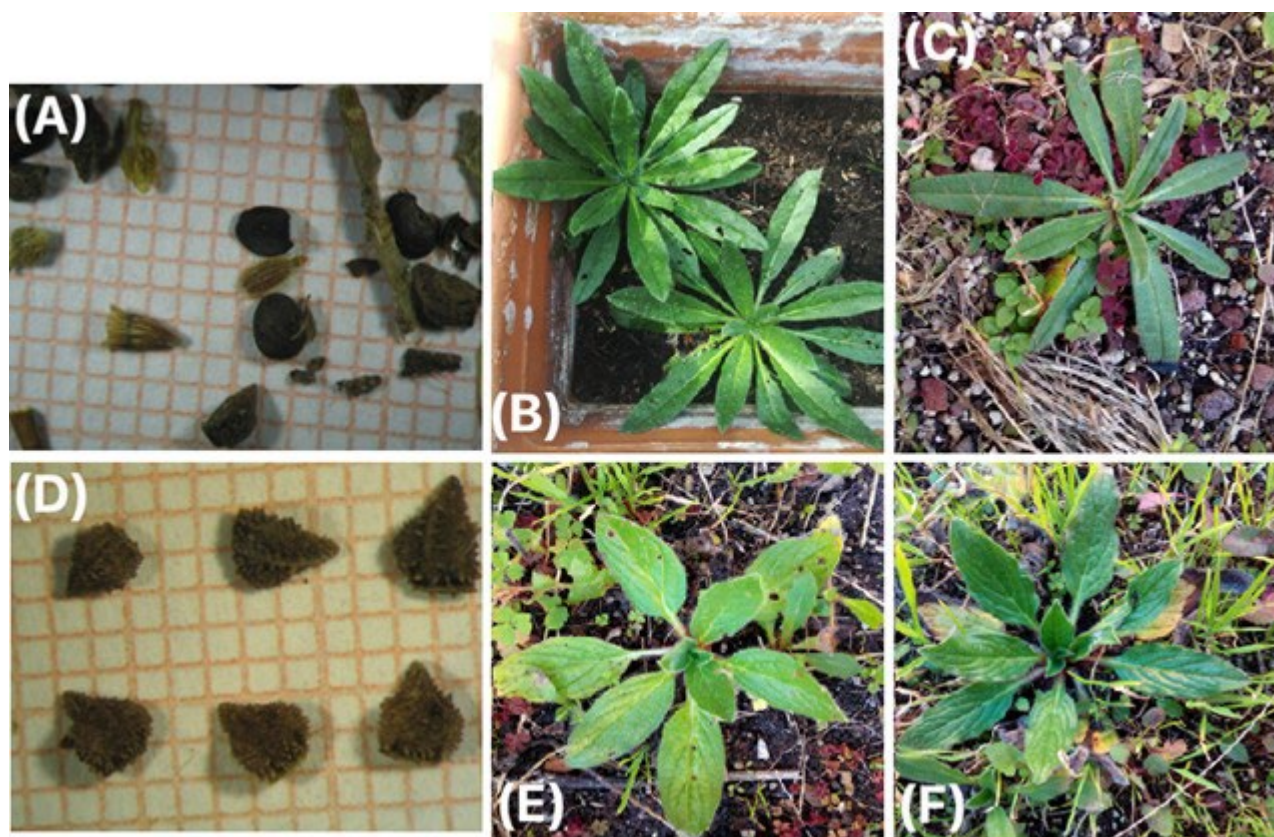


Figura 38. Analisi morfologica comparativa tra le due specie di *Echium*. (A) Semi osservati al microscopio ottico e (B-C) rosette di *Echium vulgare*, (D) semi osservati al microscopio ottico e (E) rosette di *Echium plantagineum*.

Inoltre, in accordo con la letteratura, sono state osservate per *E. plantagineum* forme annuali o talvolta biennali, a seconda delle condizioni stagionali di crescita. In particolare, l'andamento della crescita delle rosette della forma biennale di *E. plantagineum* è risultato più rapido rispetto a *E. vulgare*, presentando anche dimensioni maggiori. La radice fittonante delle piante adulte di *E. vulgare* è risultata essere di maggiori dimensioni rispetto a quella di *E. plantagineum*, anche nelle condizioni, limitanti la crescita, dovute all'esiguo spessore del tetto verde ENEA. Alcuni altri risultati di tale analisi comparativa sono stati recentemente presentati al convegno nazionale "Biodiversità 2021" [39].

Per valutare la capacità rigenerativa e il livello di resistenza alla siccità delle due specie, prima della fine della calda stagione estiva, è stato imposto un forte stress idrico sul tetto verde, interrompendo

l'irrigazione per 1 mese. La risposta allo stress idrico ha determinato rapida senescenza e disseccamento delle piante. In seguito, per una valutazione complessiva dello sviluppo vegetativo a valle dello stress idrico, in relazione alla capacità delle due specie vegetali di rientrare in vegetazione ed auto propagarsi, sono state calcolate le percentuali di copertura come indice di copertura vegetale (*vegetation coverage index*, VCI) (Figura 39). Dopo lo stress idrico applicato a fine agosto, *E. plantagineum* ha subito ripreso lo sviluppo vegetativo ad ottobre, con prime fioriture a dicembre e piena fioritura nella primavera dell'anno successivo.

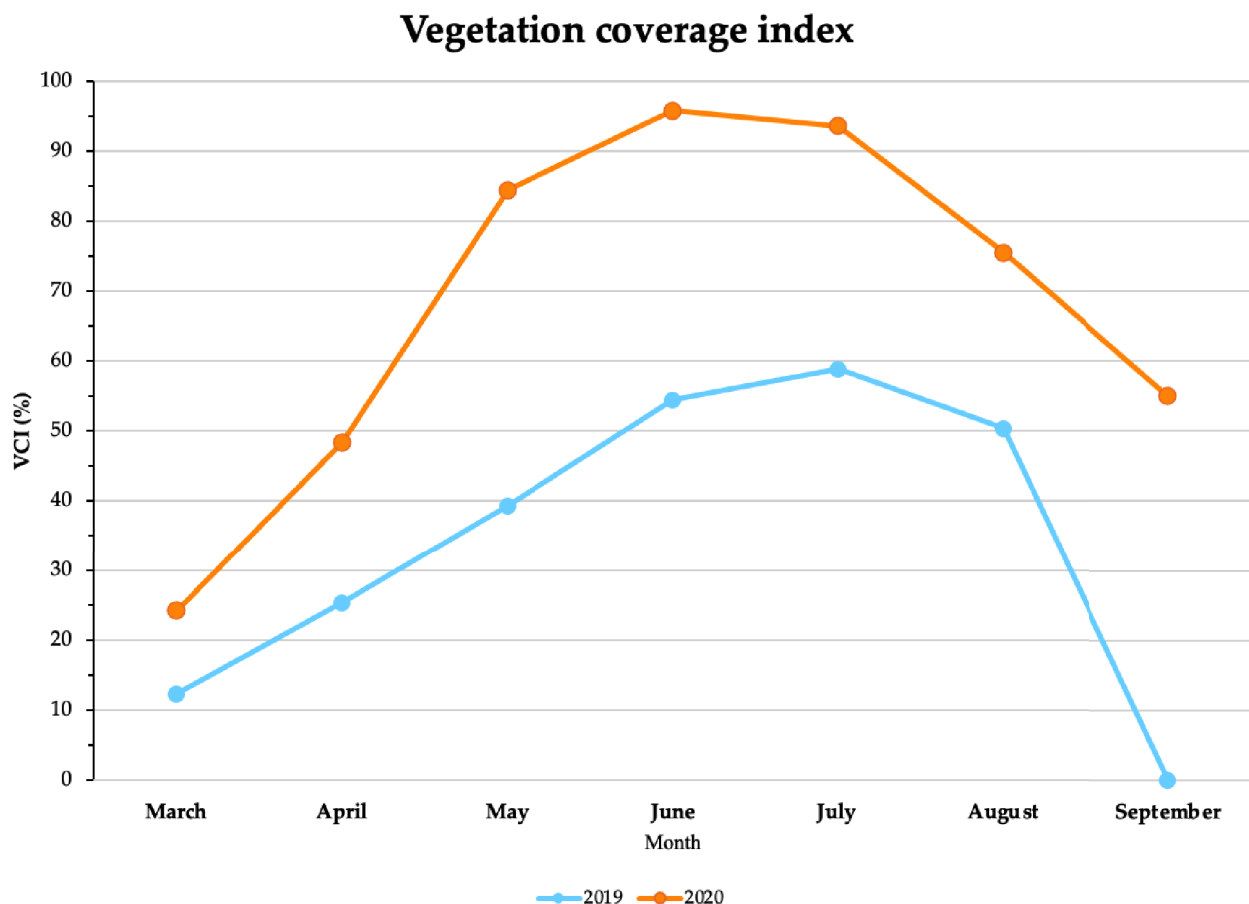


Figura 39. Vegetation coverage index (VCI, %) delle due specie di *Echium* sul tetto verde ENEA da marzo a settembre 2019 (linea azzurra) e 2020 (linea arancione).

La sperimentazione ha rivelato che *E. plantagineum*, emicriptofita e terofita annuale, pur non essendo in grado di resistere al disseccamento estivo, è una specie molto resiliente con elevata capacità di auto propagazione. Infatti, i suoi semi, molto resistenti alla disidratazione, hanno germinato alla ripresa dell'irrigazione e hanno riprodotto una buona copertura verde già nell'autunno successivo allo stress idrico estivo, grazie al suo rapido ciclo biologico con produzione di semi fertili durante tutte le stagioni tranne che in pieno inverno. Inoltre, a favore dell'utilizzo di questa specie nei prati fioriti pensili, è importante riportare che durante il primo anno di sperimentazione, le piantine di *E. plantagineum*, dopo essere state trasferite sul tetto verde, sono entrate rapidamente nella fase di fioritura senza aver precedentemente sviluppato lo stadio di rosetta, completando la prima fioritura e la prima maturazione di seme già in primavera: quindi, grazie alla sperimentazione è stato rilevato questo comportamento della forma annuale, non riportato nei

testi botanici, che consente un rapido sviluppo delle fioriture primaverili di prati pensili. Tale caratteristica ne costituisce un valore aggiunto per il suo utilizzo nei miscugli di seme.

Diversamente, *E. vulgare*, nell'autunno successivo allo stress idrico subito a fine estate, non è stato in grado di autorigenerarsi per minore resistenza dei suoi semi allo stress idrico nelle condizioni di clima caldo mediterraneo. Nonostante ciò, *E. vulgare* è stato in grado di garantire un efficiente manto vegetale secco di ridotto sviluppo radicale che ha contribuito al raffrescamento estivo degli spazi interni dell'edificio sotto al tetto verde. La messa a coltura di nuove piantine è stata necessaria per il reinserimento della specie nella coltre verde.

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

Si ipotizza, inoltre, che gli alti livelli di diversità genetica di *E. plantagineum*, insieme alla sua capacità di produrre metaboliti secondari difensivi, potrebbero rappresentare i fattori chiave nel determinare le strategie di successo e di diffusione di questa specie, proprio perché si rafforzano in condizioni avverse [40]. Diversamente, il declino di *E. vulgare* in alcune regioni a clima mediterraneo, si suppone che possa essere dovuto alla sua maggiore suscettibilità, derivante dalle caratteristiche del ciclo biologico biennale, all'aumento delle temperature e della siccità causato dai cambiamenti climatici.

3.4.4 Vantaggio delle forme annuali nell'affrontare le avversità della stagione estiva

Gli esiti di questo lavoro hanno fornito dati rilevanti per la pianificazione della composizione di miscugli di semi per tetti verdi e prati pensili in ambiente mediterraneo. Generalmente si suggerisce di adottare miscele di semi che includano numerose specie con differenti cicli stagionali e differenti forme biologiche, le attuali conoscenze sulle diverse consociazioni più appropriate che possano coesistere al meglio nelle diverse regioni climatiche sono ancora insufficienti [31].

Nel caso studio ENEA, realizzato in condizioni estive mediterranee particolarmente calde e siccitose, si dimostra l'utilità di includere nei tetti verdi anche forme annuali maggiormente resistenti e resilienti delle forme biennali nella nostra zona climatica. Infatti, nello spettro biologico e corologico (sistema Raunkiaer) centro meridionale, le forme annuali sono molto diffuse in quanto sono avvantaggiate dal superare la stagione estiva, la più avversa in ambiente mediterraneo, allo stadio di seme. I risultati di questo studio portano alle seguenti raccomandazioni: *E. plantagineum* dovrebbe essere privilegiato nei tetti verdi estensivi, di spessore ridotto, in clima mediterraneo, in associazione con *Poaceae* e/o altre graminacee selvatiche. Inoltre, la maggiore adattabilità riscontrata di *E. plantagineum* rispetto a *E. vulgare* suggerisce che, in ambiente mediterraneo, l'inserimento di piante annuali (terofite) dovrebbe essere incoraggiata rispetto alle piante biennali e perenni (emicriptofite), che invece trovano maggior applicazione con successo nei tetti verdi del Nord Europa [31].

3.4.5 Ruolo della manutenzione del verde tramite sfalcio nel declino di biodiversità

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

particolari operazioni di sfalcio sono realizzate anche lungo i bordi stradali e ferroviari per la manutenzione della viabilità.

Durante i monitoraggi in campo, è stato osservato che *E. plantagineum* è rilevabile solo nell'epoca antecedente lo sfalcio dell'erba primaverile. Infatti, anno dopo anno, la sua diffusione si è ridotta drasticamente in tutte le aree soggette a sfalcio a causa della scarsa capacità di ricaccio della specie dopo il taglio dell'erba. Questo fatto ci ha fatto supporre che nei territori monitorati il taglio dell'erba primaverile possa essere, almeno in parte, responsabile anche dell'assenza di *E. vulgare* nei territori monitorati.

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

I risultati di questa sperimentazione hanno messo in evidenza che nuove specie erbacee resistenti e resilienti alle condizioni avverse dei tetti verdi pensili potrebbero essere rinvenute tra specie attualmente in declino nei nostri territori, poiché incapaci di contrastare l'avversità dovuta al taglio del prato ed alle lavorazioni agricole del terreno. Infatti, i tetti verdi, per tutte le piante che soffrono le pratiche di gestione umana del territorio, possono rappresentare realmente ambienti protetti e ideali, in quanto a livello pensile le lavorazioni del verde necessarie a livello del terreno sono invece controindicate anche ai fini energetici.

3.4.6 Protezione della biodiversità vegetale e salvaguardia delle api

Il mancato ritrovamento di *E. vulgare* e la scarsa diffusione osservata per *E. plantagineum* a seguito degli sfalci primaverili dei prati hanno dimostrato la fragilità di queste specie nelle aree monitorate del Lazio, motivando l'interesse del loro inserimento in miscugli di semi per tetti verdi in area mediterranea al fine di proteggere biodiversità botanica e quella entomologica da essa dipendente.

Il genere *Echium* è notoriamente una specie entomogama dalle caratteristiche fiorali particolarmente attraenti per gli apoidei e per gli impollinatori in genere [36], pertanto il valore aggiunto per l'inserimento di specie di *Echium* sul tetto verde è quello di offrire una copiosa quantità di nettare e polline di specifica composizione a diversi taxa di insetti impollinatori, soprattutto api selvatiche [37]. Nell'ultimo anno di sperimentazione per quantificare le visite degli impollinatori sono state condotte osservazioni non strutturate. In particolare, nelle condizioni descritte, l'associazione di *E. vulgare* ed *E. plantagineum* sul tetto verde ENEA si è rivelata in grado di sostenere le visite di preziosi impollinatori selvatici sugli ornamentali fiori blu-violacei delle due specie, da marzo a settembre. Dal punto di vista della tassonomia, sono stati identificati vari apoidei, alcuni anche a livello di specie, inviando segnalazioni di supporto al progetto www.beewatching.it, mirato a fare luce sullo stato delle api in Italia (Figura 40).

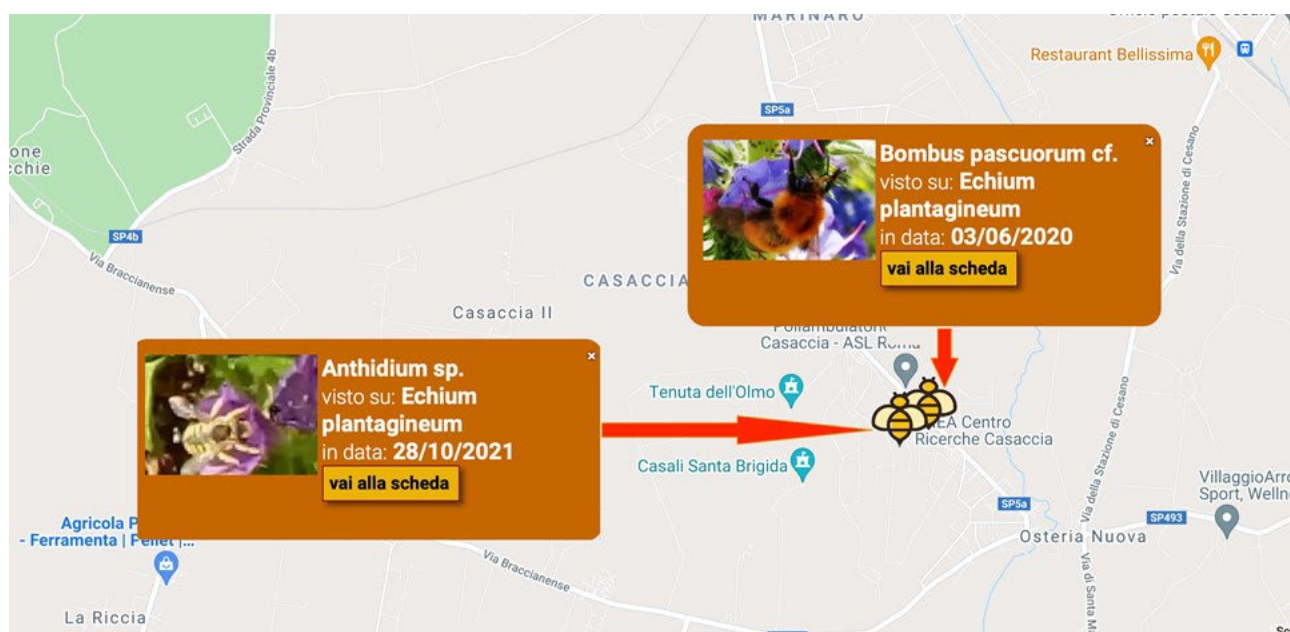


Figura 40. Alcune api osservate e identificate sul tetto verde attraverso il sito www.beewatching.it.

3.4.7 L'opzione per un tetto verde spontaneo e secco

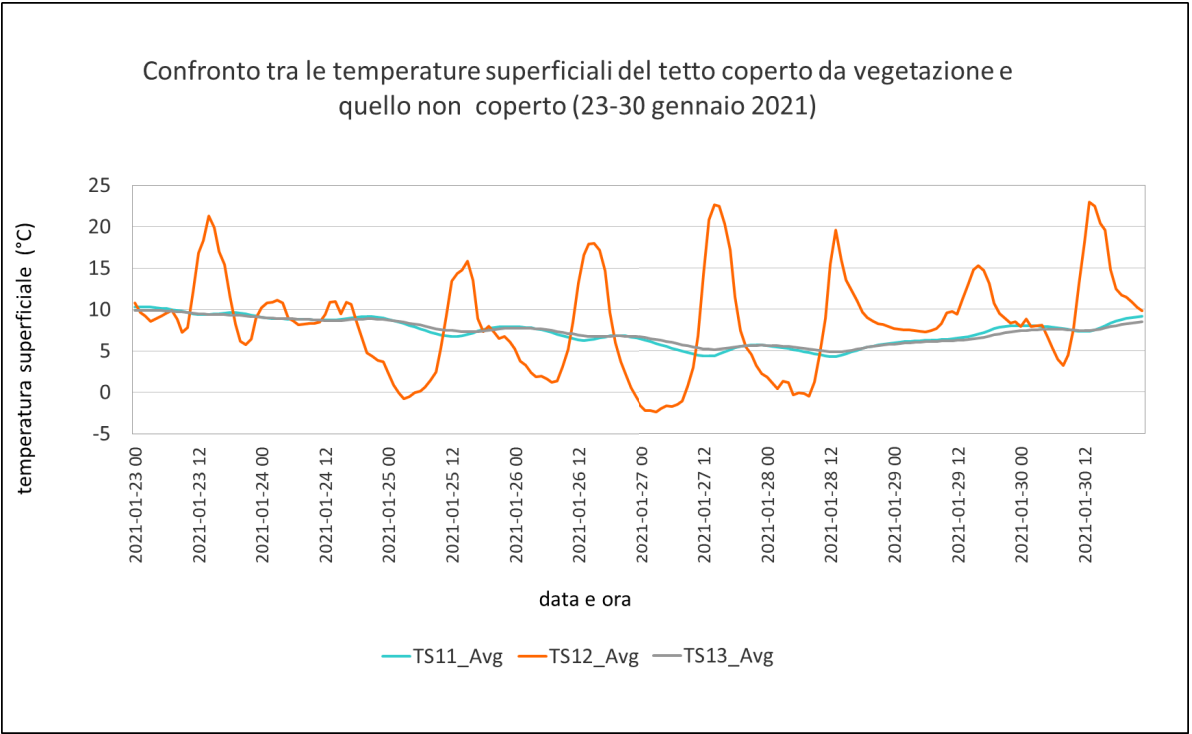
Dai risultati della sperimentazione condotta presso il C.R. ENEA-Casaccia emerge che tetti verdi con coperture vegetali, secche in estate, sarebbero da privilegiare in tutte quelle aree mediterranee dove il risparmio idrico costituisce un'esigenza primaria. Purtroppo, nonostante un tetto verde a prato naturale, con senescenza estiva, offra vantaggi ambientali, idrici, energetici, oltre che di costi di impianto e manutenzioni, l'opinione pubblica nazionale è ancora piuttosto scettica nell'accettazione dell'ingiallimento di tale tipologia di prato in estate [41]. Malgrado ciò, è ben noto che un tetto verde, anche nella fase di senescenza, continui ad espletare la sua funzione isolante e, pertanto, permetta comunque un risparmio dei costi energetici per il raffrescamento estivo degli edifici [21], che possono essere anche molto elevati nelle località a clima arido e sub-arido, sia in termini di impatto ambientale che energetico.

3.5 Monitoraggio mensile del tetto verde: confronto tra le temperature superficiali rilevate sotto due diverse tipologie di coperture vegetali e sul tetto privo di vegetazione (anno 2021) e confronto 2020-2021

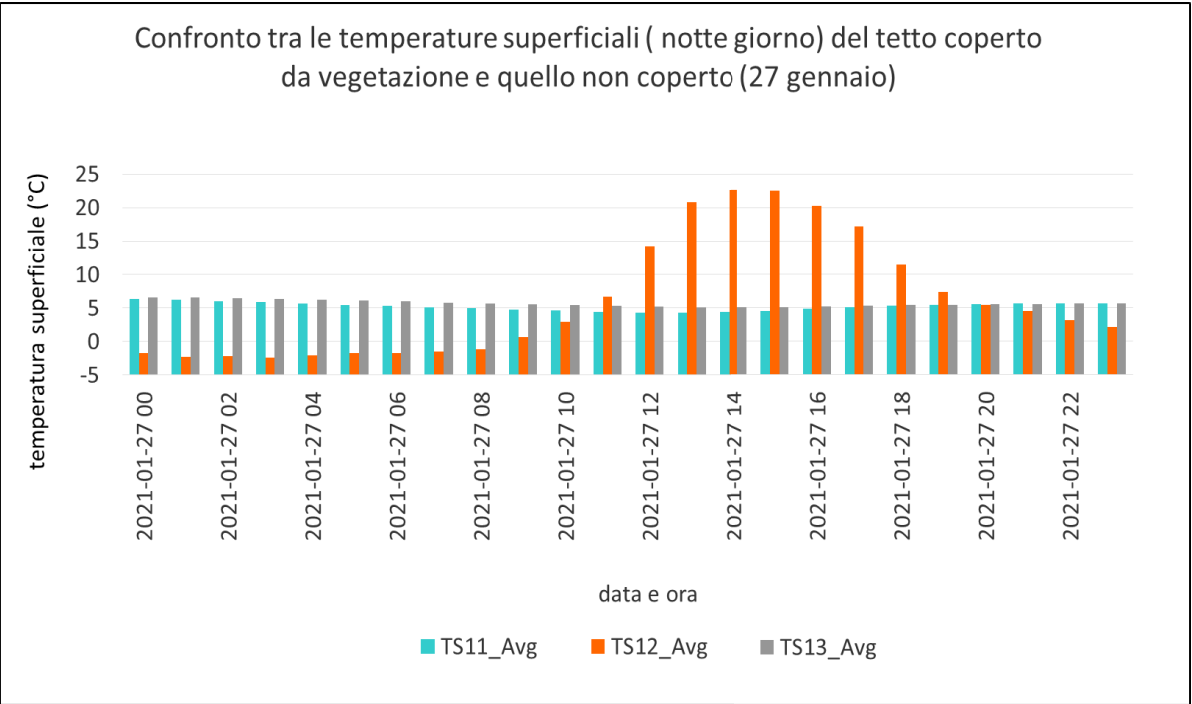
Le due tipologie di tetto verde studiate, come per l'anno 2020, sono: 1) il tetto verde costituito da piante appartenenti alla famiglia delle Graminaceae, nello specifico un mix di *Festuca arundinaceae* e *Poa pratensis*; 2) tetto verde costituito da piante appartenenti alla famiglia delle Crassulaceae, nello specifico un mix di *Sedum*, con prevalenza di *Sedum spurium*. Durante l'anno 2020 è stata valutata l'influenza esercitata sulle variazioni delle temperature superficiali rilevate sotto le due tipologie di tetto verde rispetto alla temperatura superficiale rilevata sul tetto privo di vegetazione. Lo scopo è stato quello di valutare come diversi tipi di vegetazione possono influenzare le variazioni di temperature sotto la copertura verde, in estate e in inverno, migliorando il comfort degli ambienti interni sottostanti il tetto verde e riducendo i consumi energetici per il condizionamento estivo e il riscaldamento invernale. Durante l'anno 2021 il monitoraggio mensile del tetto verde è stato ripetuto al fine di validare i dati ottenuti nel 2020. Di seguito, per ciascun mese, si riportano i grafici delle temperature superficiali registrate sul tetto, corredati con i grafici della temperatura ambiente e umidità relativa. Per ciascun mese si è focalizzato sui dati di una settimana. Inoltre, per i mesi di gennaio e di settembre vengono mostrati anche gli andamenti delle temperature superficiali nell'arco delle 24 h di una giornata (scelta in maniera randomica tra i 7 giorni della settimana analizzata).

Gennaio 2021: periodo dal 23-30 gennaio 2021

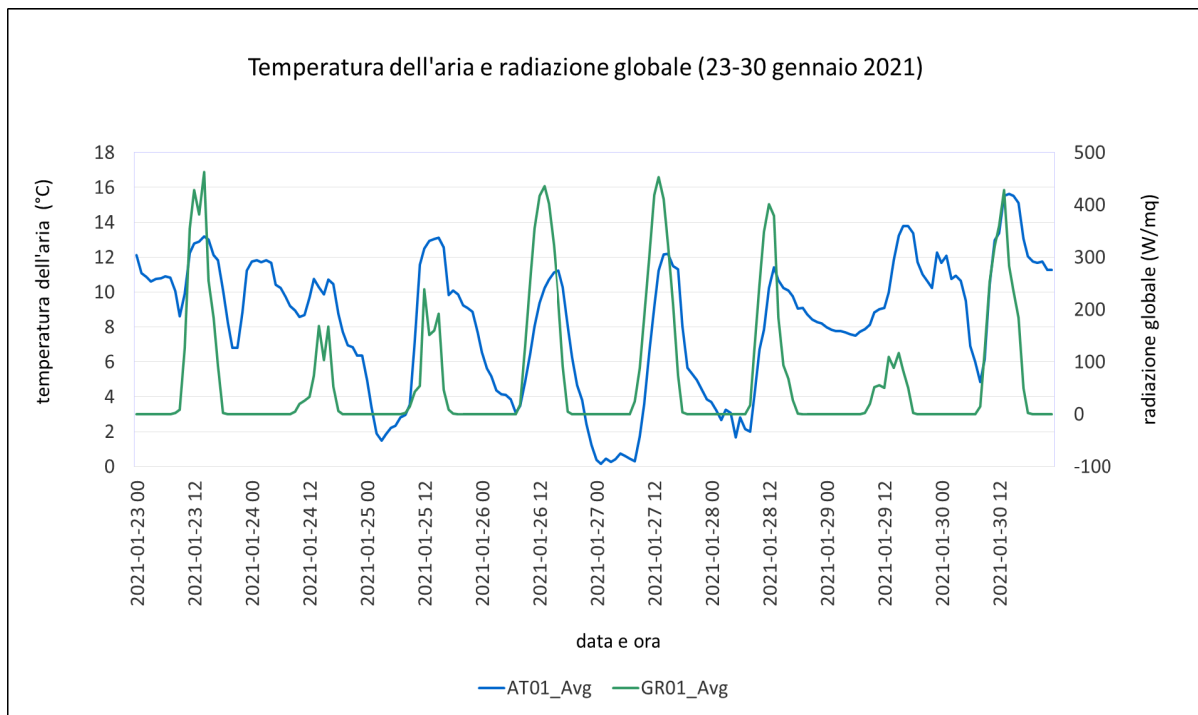
Le temperature rilevate sotto la copertura del tetto verde a Graminaceae (registrate dal sensore TS11) e sotto il tetto verde a *Sedum* (registrate dal sensore TS13) presentano un andamento piuttosto costante anche se la temperatura sotto la copertura a *Sedum* si mantiene più uniforme, con meno differenze tra il giorno e la notte. Di giorno la temperatura superficiale rilevata sotto la copertura a *Sedum* si presenta leggermente superiore a quella rilevata sotto la copertura a Graminaceae. Nei giorni della settimana considerata in cui la temperatura è più elevata e nelle ore più calde della giornata, la differenza tra la temperatura superficiale rilevata sul tetto nudo e quella rilevata sotto la copertura verde è intorno ai 17 °C sotto il *Sedum* e 18 °C sotto le Graminaceae (Figura 41a). Di notte, quando la temperatura superficiale sul tetto privo di vegetazione arriva a -2 °C, sotto la vegetazione essa resta intorno ai 6 °C, con scarse differenze tra le due tipologie di coperture vegetali (Figura 41b). In questo periodo la temperatura massima dell'aria rilevata è stata di 15,6 °C mentre la radiazione globale è stata di circa 450 W/m² (Figura 41c).



(a)



(b)

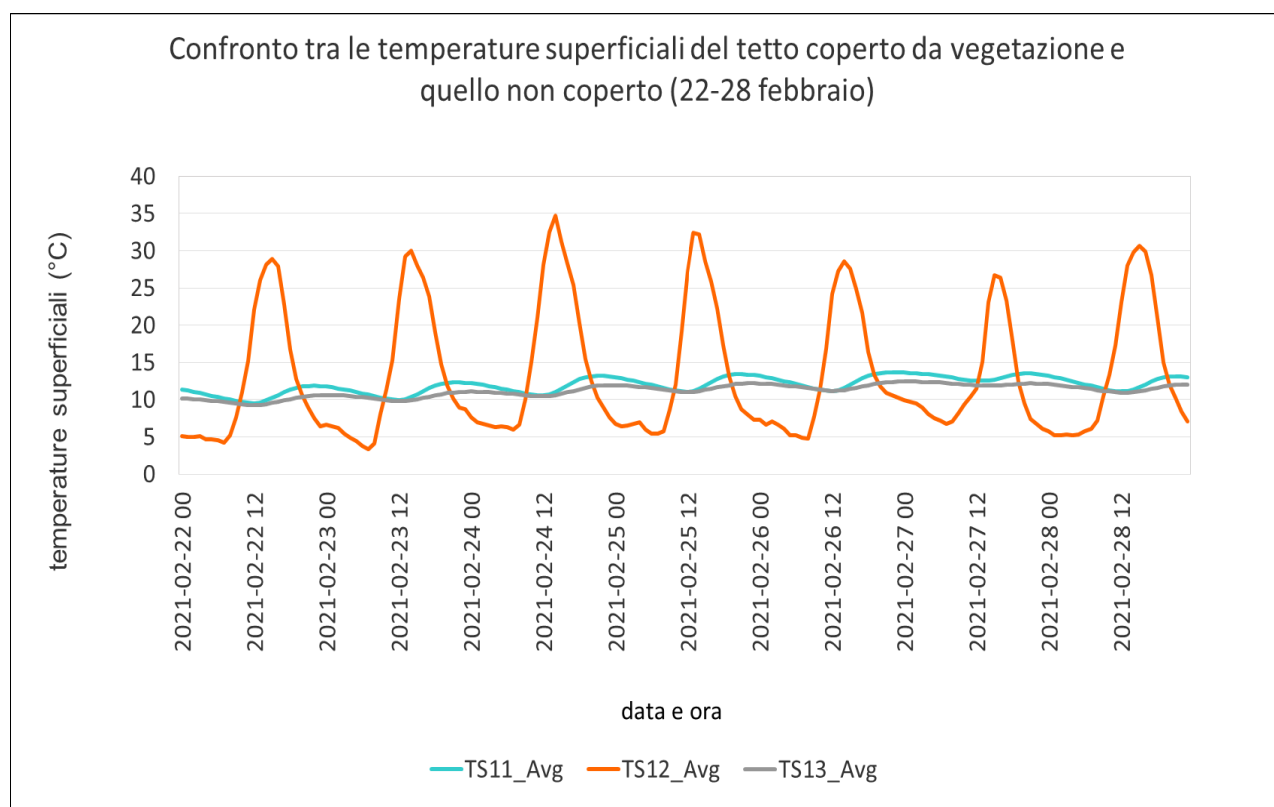


(c)

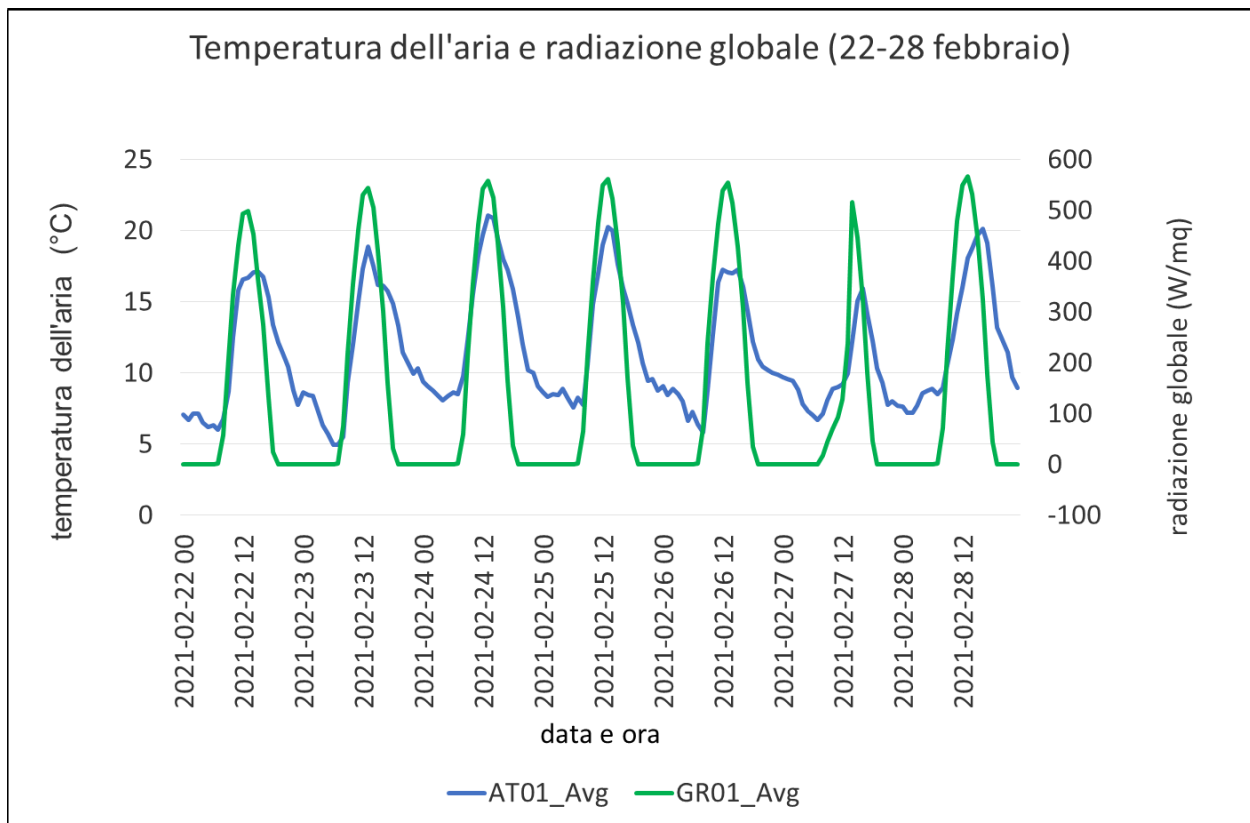
Figura 41. Gennaio 2021, periodo dal 23 al 30. (a) (b) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto privo di vegetazione. (c) Temperatura dell'aria (AT) e radiazione globale (GR) medie rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale.

Febbraio: periodo dal 22 al 28 febbraio 2021

Nel mese di febbraio, così come in gennaio, la temperatura superficiale sotto il *Sedum* presenta un andamento più uniforme rispetto alla temperatura superficiale rilevata sotto le Graminaceae. Tuttavia, al contrario di gennaio, di notte, mediamente, la temperatura superficiale sotto le Graminaceae è quasi 1 °C superiore alla temperatura superficiale rilevata sotto il *Sedum* mentre di giorno la differenza si annulla. Di notte, mediamente la temperatura rilevata sul tetto privo di vegetazione è di circa 4 °C più bassa di quelle rilevate sotto le coperture verdi, mentre di giorno la temperatura sul tetto nudo è di circa 10-12 °C più elevata di quella sotto le coperture verdi (Figura 42a). Questi rilievi dimostrano che nei mesi invernali la copertura verde consente di mitigare l'abbassamento delle temperature notturne ed evitare gli sbalzi della temperatura, mentre di giorno, nelle ore calde, impedisce la cessione del calore dovuto al riscaldamento delle superfici nude. La temperatura dell'aria del periodo considerato presenta variazioni dai 15 ai 20 °C (le massime) e dai 4 agli 8 °C (le minime) (Figura 42b).



(a)

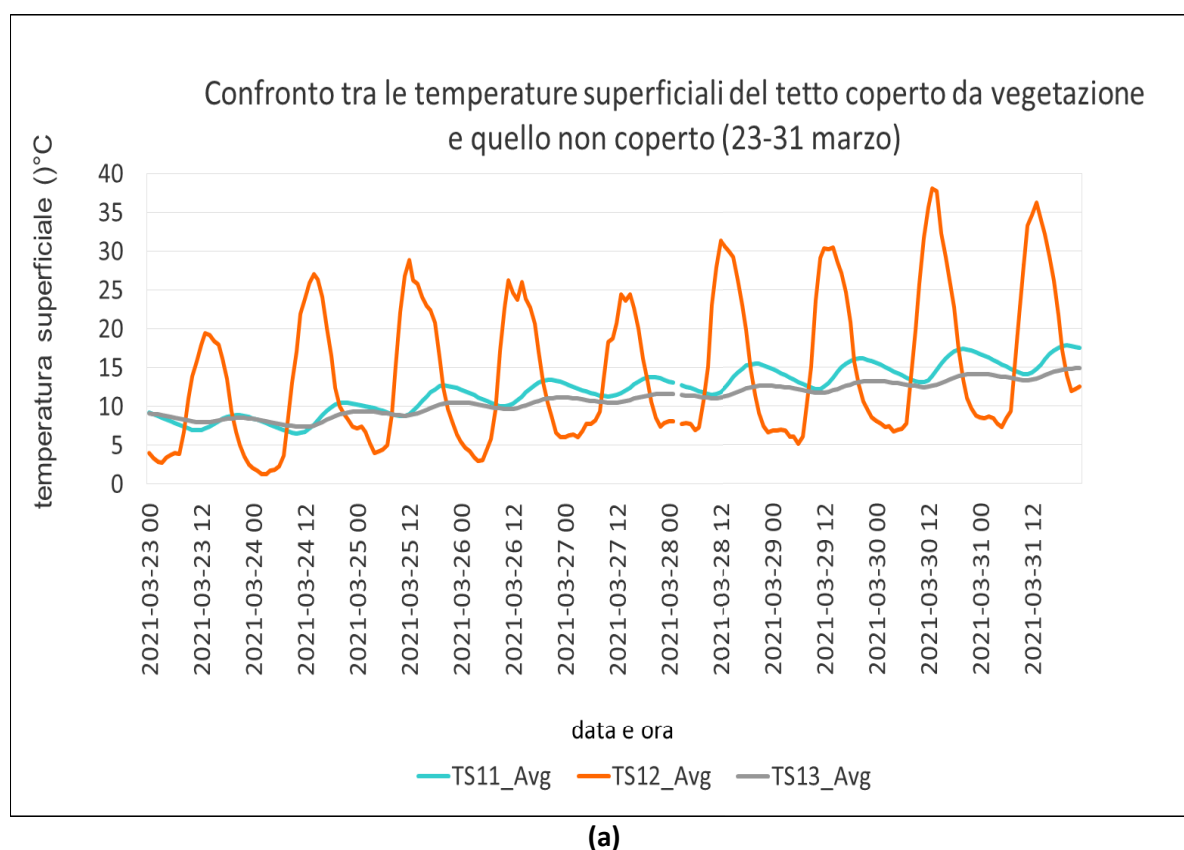


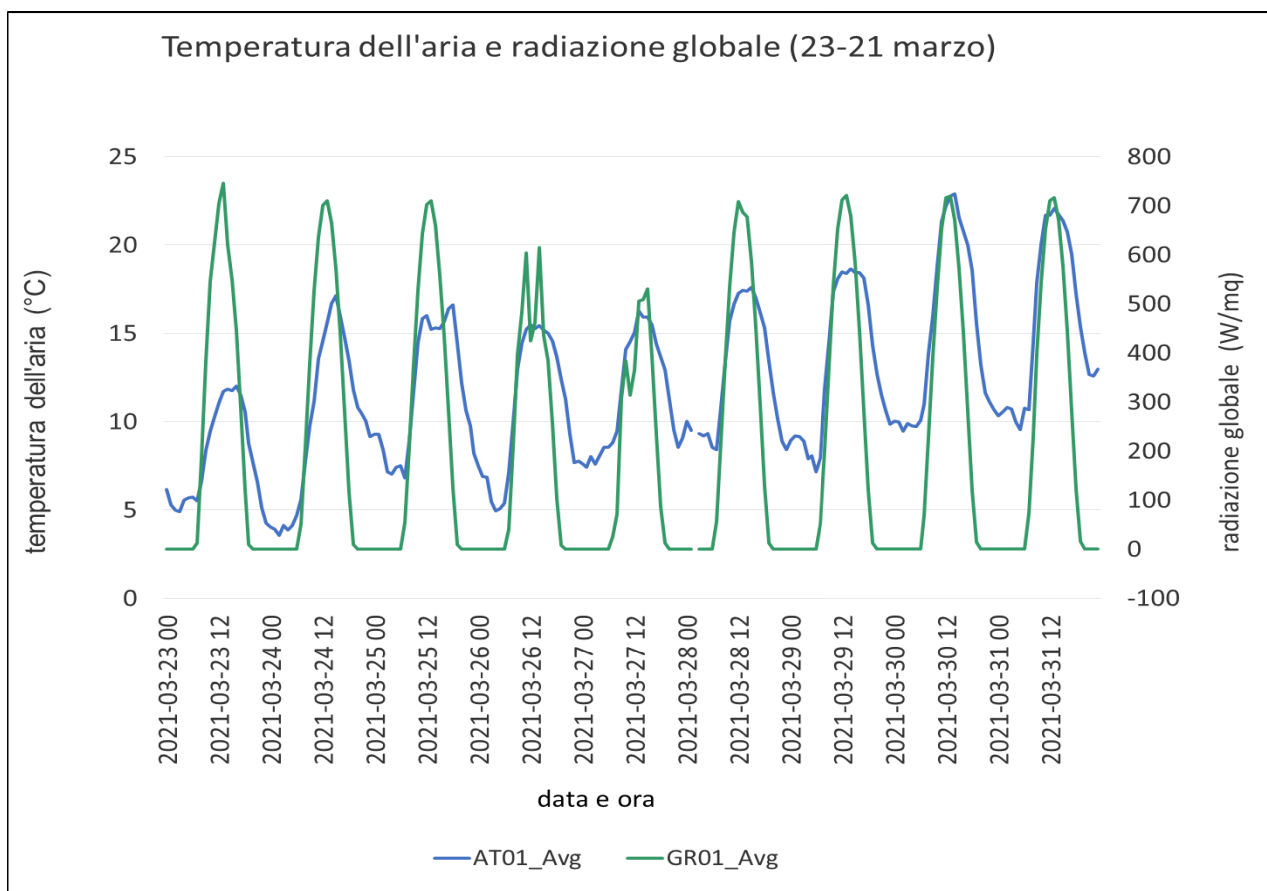
(b)

Figura 42. Febbraio 2021, periodo 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 privo di vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) e radiazione globale (GR) medie rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale.

Marzo: periodo dal 23 al 31 marzo 2021

Si osservano meno variazioni di temperatura, tra il giorno e la notte, sotto il *Sedum* che mantiene una temperatura più costante rispetto a quella rilevata sotto le Graminaceae. Sia di notte che di giorno la temperatura sotto la copertura a Graminaceae è più elevata rispetto a quella sotto la copertura a *Sedum*, evidenziando una maggiore differenza nelle ore notturne (quasi 1,5 °C). Come si vede nella figura 3a, l'innalzamento maggiore della temperatura superficiale sotto la copertura verde si osserva a partire dalle ore 13:00; la media delle temperature superficiali alle ore 21:00 sotto le Graminaceae è 12,14 °C e 10,68 °C sotto il *Sedum*). La temperatura superficiale sul tetto nudo (temperatura controllo, sensore TS12), calcolata come media delle ore nel mese, si innalza a partire dalle ore 8:00 per arrivare a un massimo intorno alle ore 14:00 (da 7 °C a 24 °C). La temperatura dell'aria (AT01), a fine di marzo, si innalza fino a quasi 22 °C (Figura 43b), anche se in media la temperatura più elevata è intorno ai 14-15 °C, tra le ore 13:00 e le 14:00. Le temperature dell'aria più basse del periodo considerato si aggirano intorno ai 3,5 °C alle ore 2:00, con medie mensili, alla stessa ora, di 6,7 °C. La radiazione globale (GR01) si aggira intorno ai 700 W/m², con media mensile alle ore 13:00 (orario in cui il sensore GR01 registra i valori più elevati) intorno ai 530 W/m² (Figura 43B).



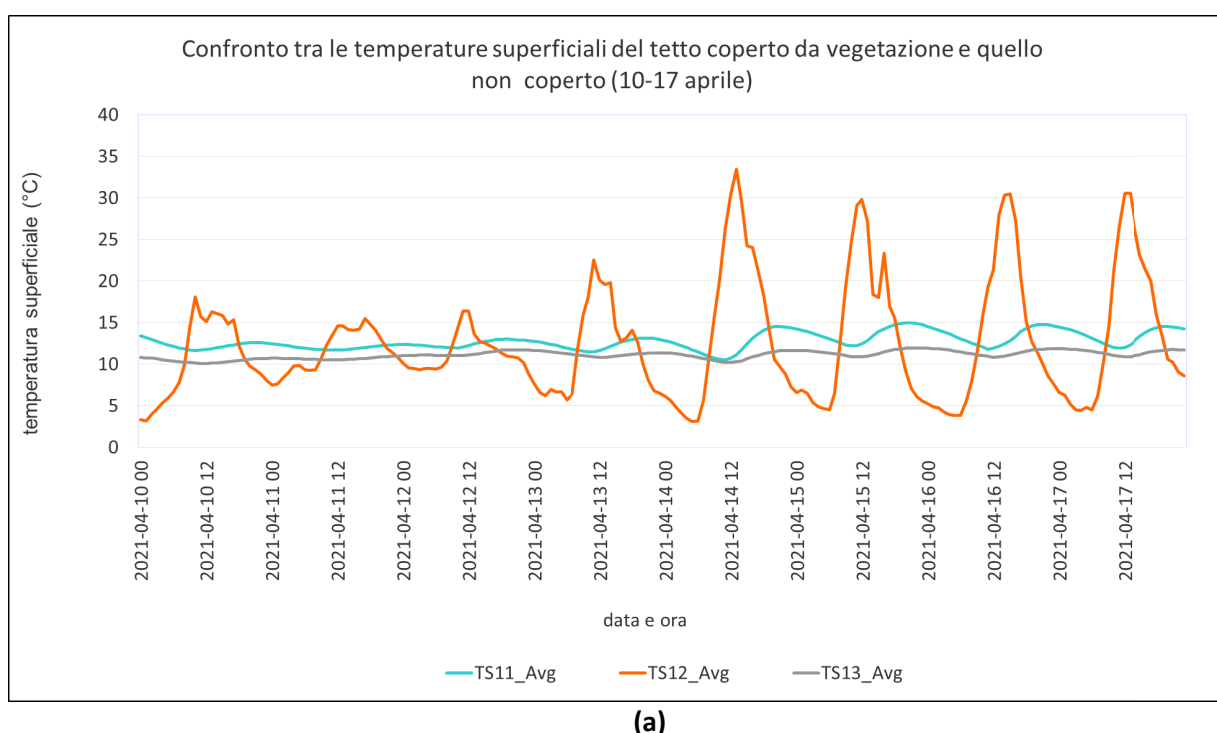


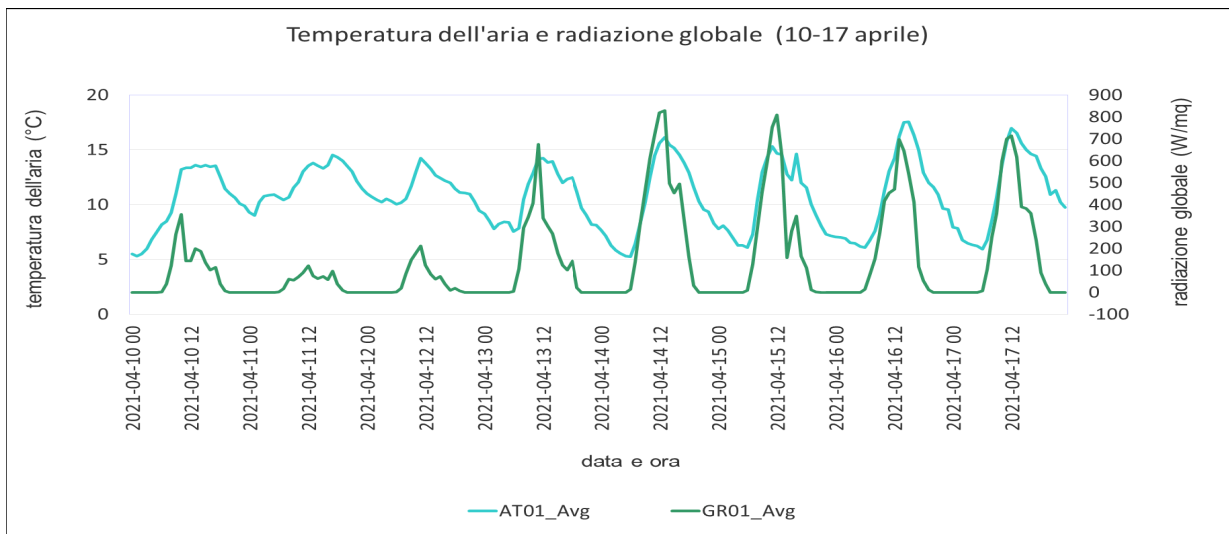
(b)

Figura 43. Marzo 2021, periodo dal 23 al 31. (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 privo di vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) e radiazione globale (GR) medie rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale.

Aprile: periodo dal 10 al 17 aprile 2021

Nel periodo dal 10 al 17 aprile, la temperatura superficiale sul tetto privo di vegetazione (TS12), in alcuni giorni, alle ore 13:00, supera i 33 °C, mentre sotto le Graminaceae, alla stessa ora, oscilla intorno ai 12 °C e sotto la copertura a *Sedum* intorno agli 11 °C. È evidente, dalla Figura 44a, che la temperatura sotto il *Sedum* mantiene una maggiore uniformità nel tempo e che è più bassa rispetto a quella rilevata sotto le Graminaceae, pertanto la differenza con la temperatura superficiale del tetto nudo è più elevata. Nella settimana considerata, la temperatura dell'aria (AT01) varia tra i 13 e i 17 °C nelle ore centrali della giornata, mentre la radiazione luminosa raggiunge gli 800 W/m² (Figura 44b). Le medie mensili orarie restituiscono i valori più elevati di temperatura dell'aria (16,24 °C) intorno alle ore 13:00 e quelli di radiazione luminosa (592 W/m²) intorno alle ore 12:00.



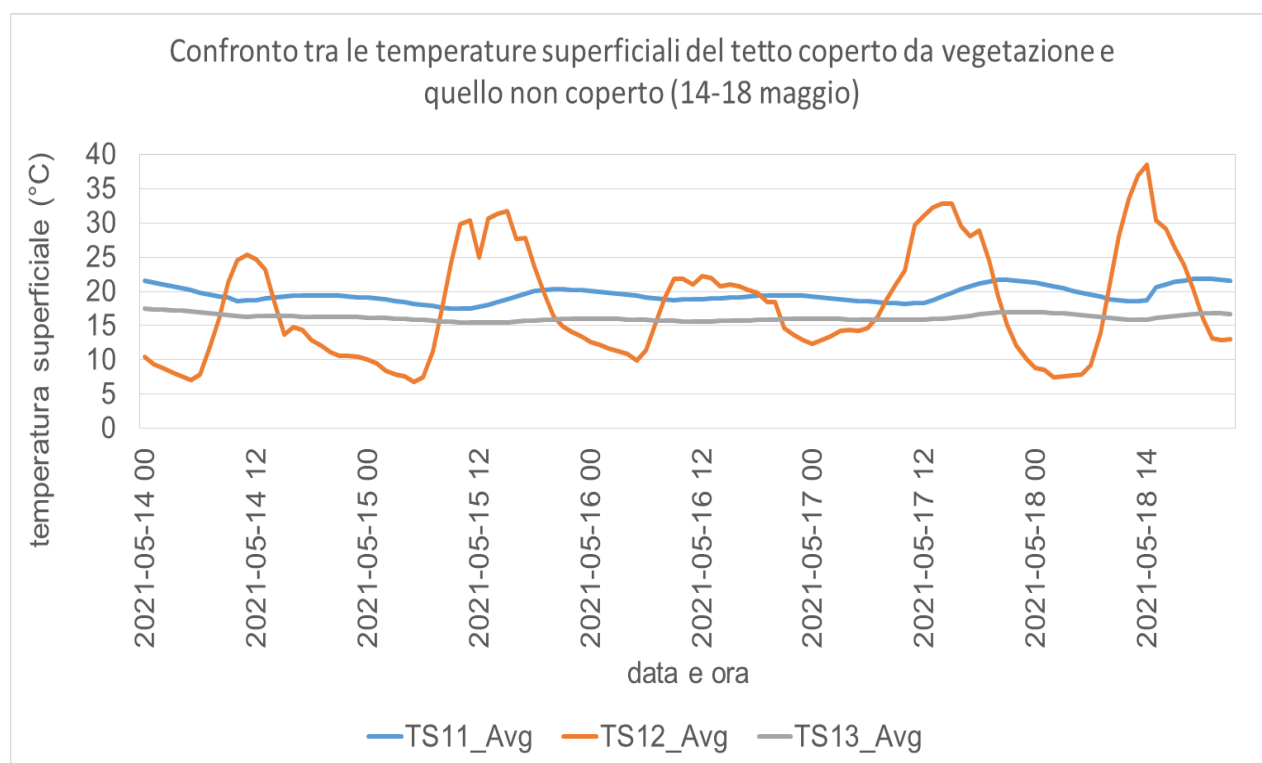


(b)

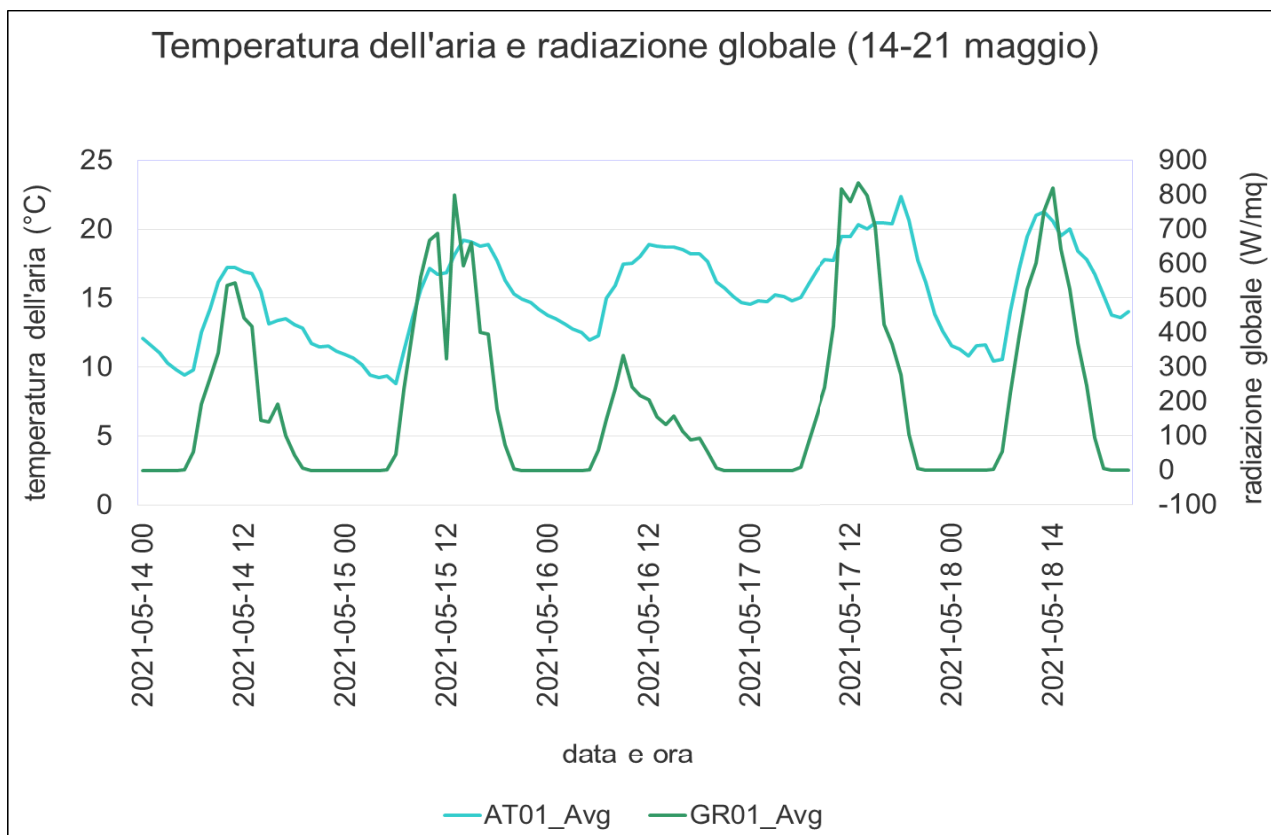
Figura 44. Aprile 2021, periodo dal 10 al 17. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto privo di vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) e radiazione globale (GR) medie rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale.

Maggio: periodo dal 14 al 18 maggio 2021

Con l'alzarsi della temperatura dell'aria intorno ai 18°C, con picchi di 23°C, e la radiazione globale che supera gli 800 W/m² (Figura 45b) sono più elevate anche le temperature rilevate sotto le coperture vegetali. La temperatura superficiale, soprattutto sotto le Graminaceae, nelle ore notturne è mediamente più elevata rispetto alle ore diurne. Questa temperatura inizia ad alzarsi verso le ore 15:00 per arrivare a un massimo tra le ore 20:00 e le ore 22:00. La differenza di temperatura superficiale tra la copertura a Graminaceae e quella a *Sedum* è mediamente di circa 3 °C. Di giorno, nelle ore centrali della giornata, tra tetto privo di vegetazione e tetto coperto si raggiungono circa 13 °C di differenza con la copertura a Graminaceae e circa 16 °C con quella a *Sedum* (Figura 45a).



(a)

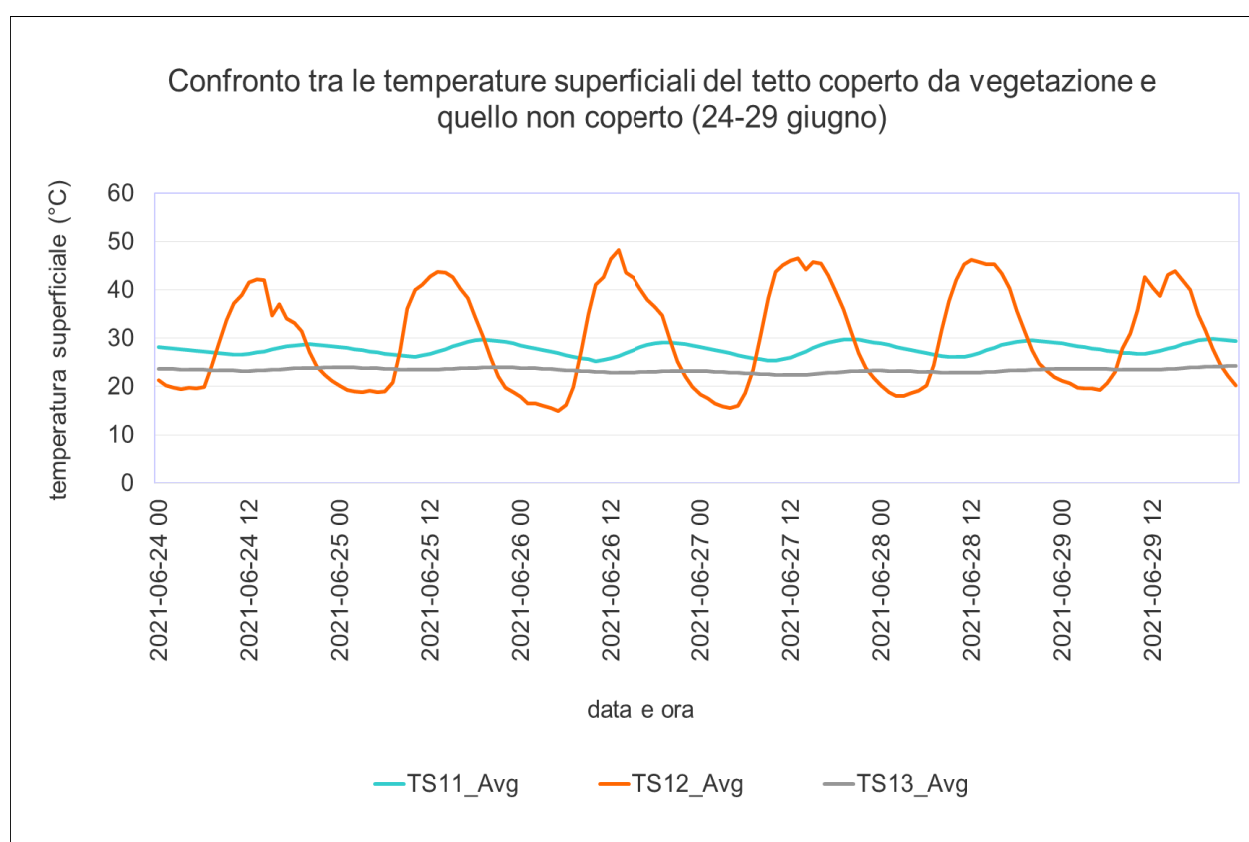


(b)

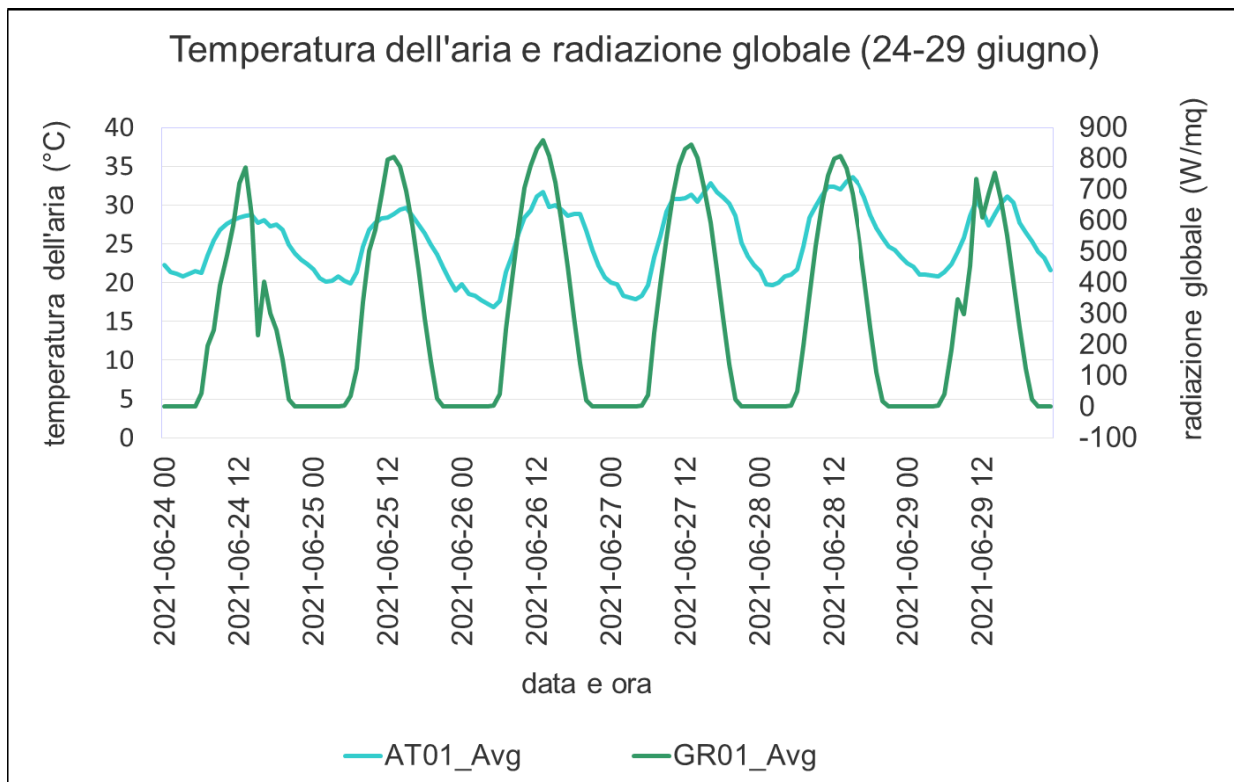
Figura 45. Maggio 2021, periodo dal 14 al 18. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto privo di vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) e radiazione globale (GR) medie rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale.

Giugno: periodo dal 24 al 29 giugno 2021

A fine giugno è maggiormente evidente l'andamento uniforme della temperatura superficiale sotto il *Sedum*, con scarse oscillazioni tra le diverse ore del giorno e della notte. Sotto il manto delle Graminaceae, invece, si verificano variazioni di circa 3-4 °C tra la temperatura più elevata e quella più bassa. La temperatura superficiale sotto la copertura verde si alza a partire dalle ore 15:00 e resta elevata fino alle ore 23:00 per poi diminuire solo di qualche grado. La temperatura superficiale sul tetto nudo si alza a partire dalle ore 8:00 per arrivare al valore massimo verso le ore 12:00, toccando punte di 45 °C, e diminuisce poi gradualmente. Le differenze di temperatura superficiale tra le Graminaceae e il *Sedum* vanno dai 3 °C con le temperature più basse ai 6 °C con quelle più elevate; quindi, la temperatura sotto la copertura a *Sedum* resta significativamente più bassa rispetto a quella sotto le Graminaceae (Figura 46a). La temperatura dell'aria nel periodo è piuttosto elevata raggiungendo punte di 33 °C (Figura 46b).



(a)

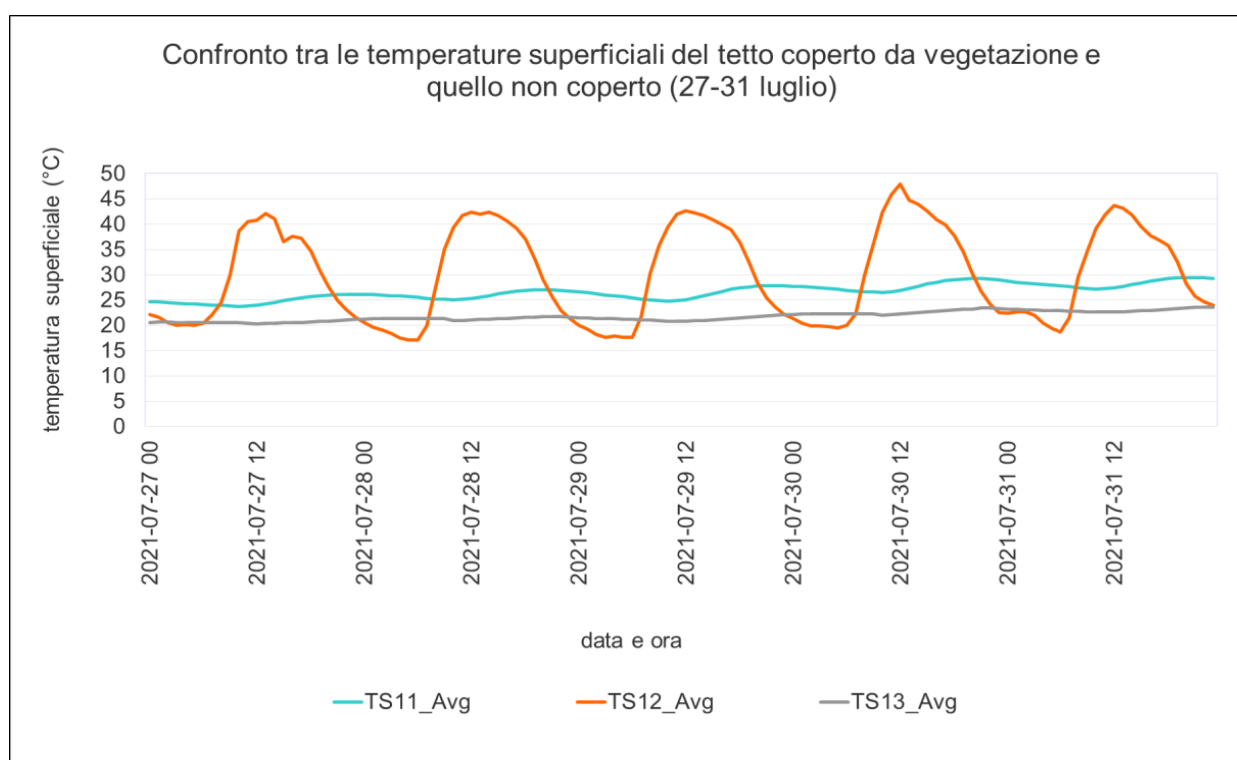


(b)

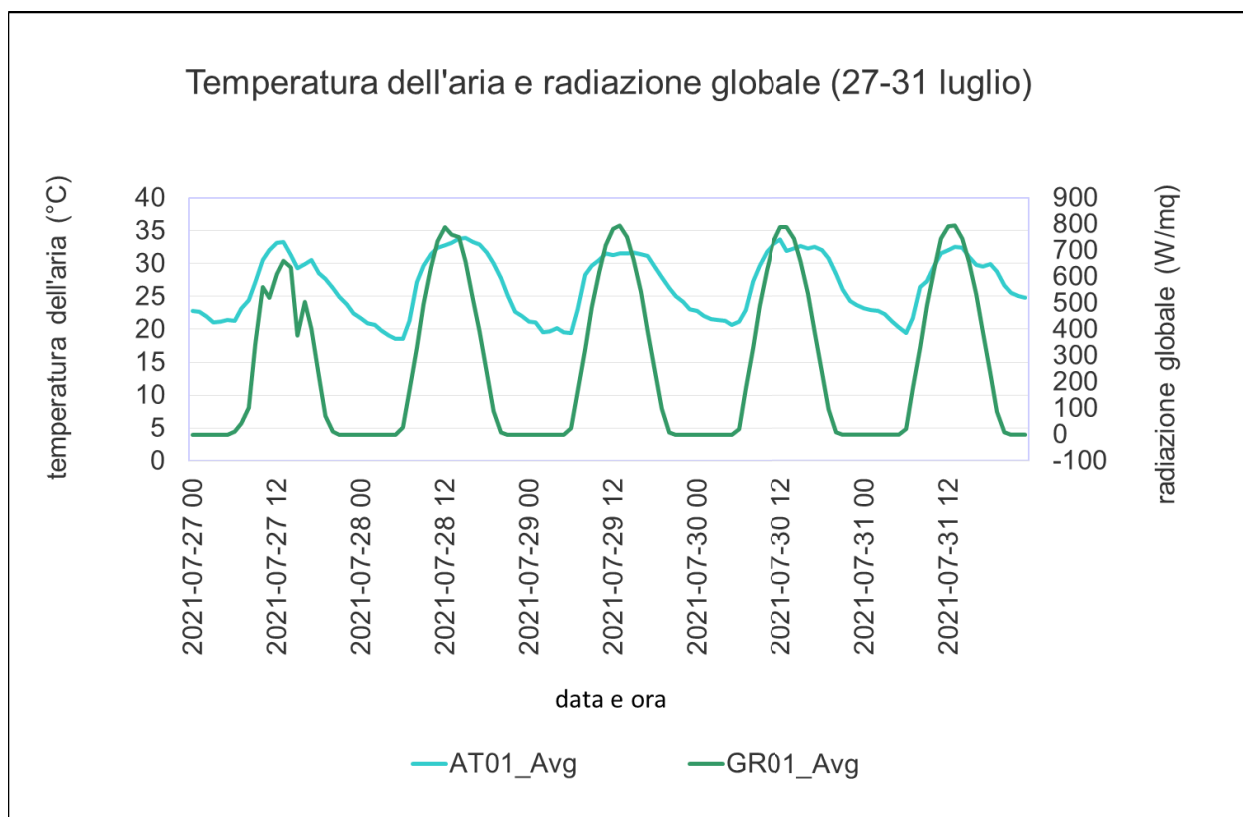
Figura 46. Giugno 2021, periodo dal 24 al 29. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto privo di vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) e radiazione globale (GR) medie rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale.

Luglio: periodo dal 27 al 31 luglio 2021

La media (notte-giorno) delle temperature dell'aria in questa settimana di fine luglio supera i 26 °C. Le temperature più elevate di questo periodo si aggirano intorno ai 34 °C. La radiazione globale si avvicina agli 800 W/m² intorno alle ore 12:00-13:00 (Figura 47b). La media della temperatura superficiale (TS12) sul tetto nudo è di circa 30 °C, mentre la media della temperatura superficiale è di circa 26 °C sotto le Graminaceae e di circa 22 °C sotto il *Sedum*. Persiste la minore temperatura superficiale sotto il tetto a *Sedum* che mantiene l'andamento più costante già riscontrato negli altri mesi. La temperatura sotto le Graminaceae, rispetto ai mesi più freddi, tende a essere più stabile, presentando minori fluttuazioni tra il giorno e la notte. Di giorno la differenza di temperatura superficiale tra il tetto nudo e quello coperto dalla vegetazione è di circa 17 °C con le Graminaceae e circa 21 °C con il *Sedum*. Di notte la temperatura sotto le coperture verdi resta più elevata rispetto a quella rilevata su tetto nudo e le differenze con la copertura a *Sedum* si aggirano intorno ai 3-4 °C, mentre con la copertura a Graminaceae intorno ai 7 °C (Figura 47a). Il beneficio della riduzione delle temperature, dovuto alla copertura verde, viene reso soprattutto di giorno, con grandi differenze nelle ore principali della giornata. Di notte, soprattutto nel caso del *Sedum*, la temperatura sotto la copertura verde è lievemente superiore rispetto a quella rilevata su tetto nudo, ma resta comunque una temperatura vivibile, che nei giorni più caldi si stabilizza intorno ai 23 °C.



(a)

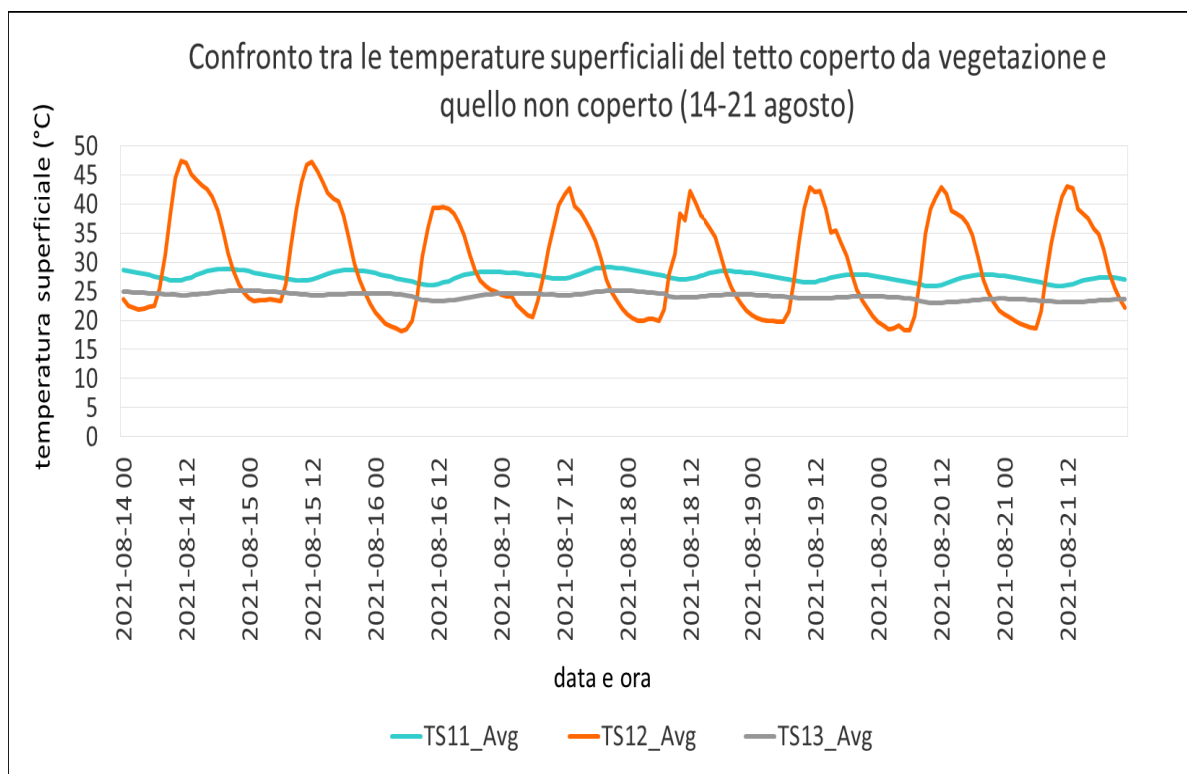


(b)

Figura 47. Luglio 2021, periodo dal 27 al 31. (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 privo di vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) e radiazione globale (GR) medie rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale.

Agosto: settimana dal 14 al 21 agosto 2021

La media delle temperature superficiali nel periodo considerato è di 27,56 °C sotto il manto a Graminaceae e 24,18 °C sotto quello a *Sedum*, mentre sul tetto privo di vegetazione è di 29,85 °C. La differenza di temperature superficiali tra tetto nudo e sotto la copertura verde nei giorni delle temperature più elevate è di circa 20 °C sotto il tetto a Graminacea e di quasi 23 °C sotto i *Sedum*: ad esempio, il giorno 14 agosto alle ore 11:00 si rilevano i seguenti valori: TS12 =47,35 °C, TS11 = 26,92°C e TS13 =24,36 (Figura 48a). La temperatura superficiale massima sotto il tetto verde si raggiunge verso le ore 20:00 quando la temperatura superficiale del tetto nudo tende a diminuire. La temperatura sotto il manto a *Sedum* mantiene un andamento più costante con variazioni inferiori a 2 °C mentre sotto le Graminaceae le variazioni di temperatura sono di circa 3 °C. Nei giorni più caldi, la temperatura dell'aria raggiunge i 36 °C e la radiazione globale raggiunge gli 800 W/m² (Figura 48b).



(a)

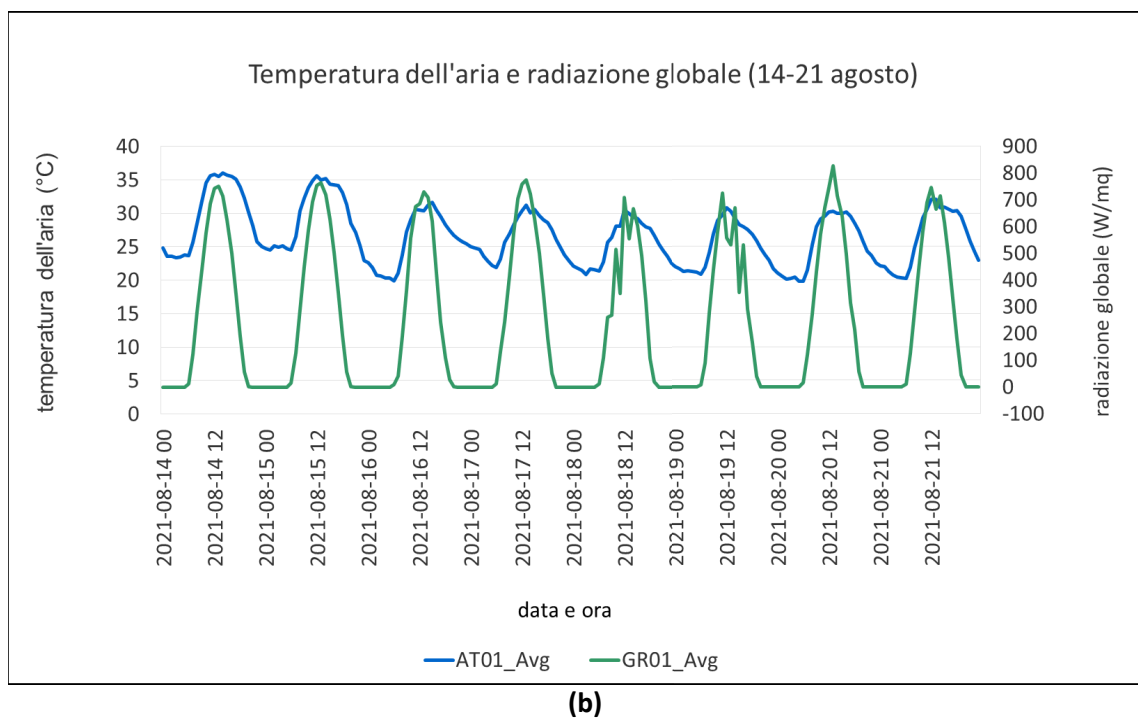
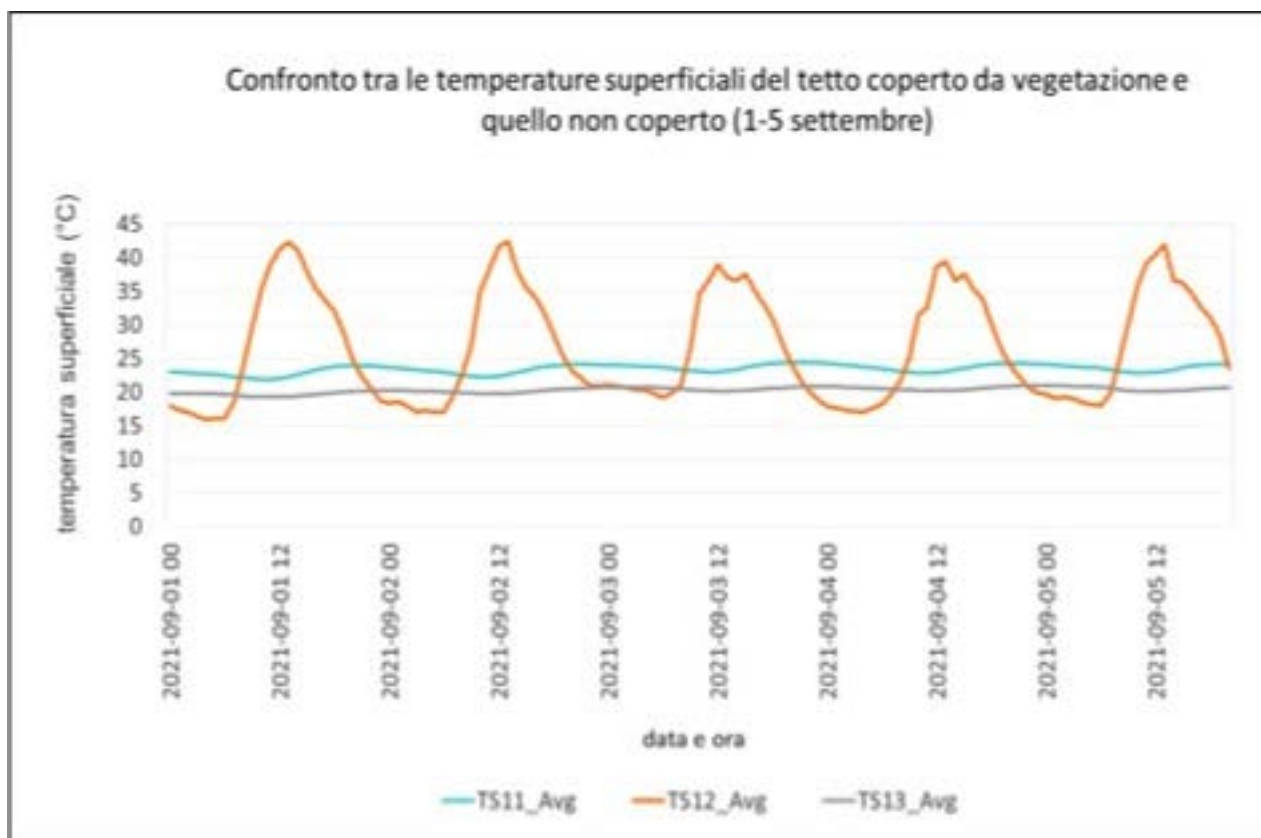


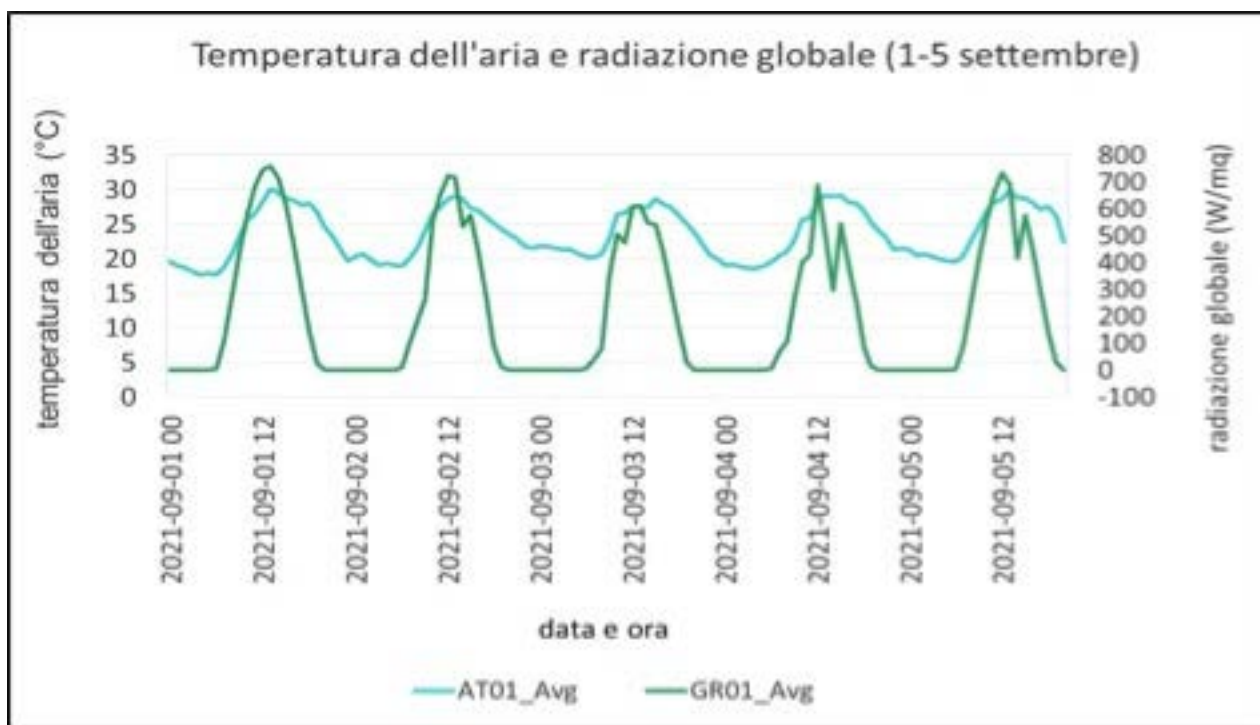
Figura 48. Agosto 2021, periodo dal 14 al 21. (a) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto privo di vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) e radiazione globale (GR) medie rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale.

Settembre: settimana dall'1 al 5 settembre 2021

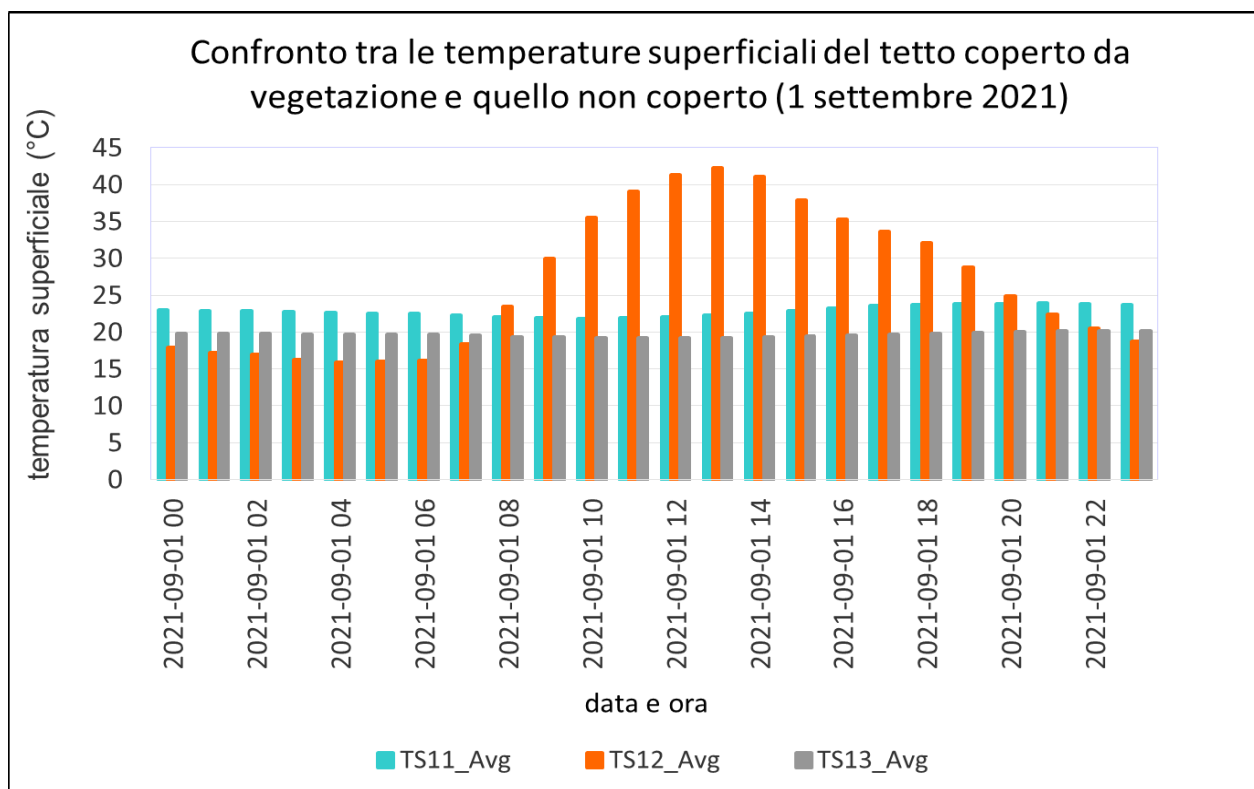
In settembre, appena 10 giorni dopo i rilievi delle misure effettuate in agosto non si verificano differenze evidenti rispetto ad agosto. La differenza di temperatura, nelle ore più calde del giorno, tra tetto nudo e tetto verde è di circa 20 °C con la copertura a Graminacea e di 22-23 °C con la copertura a *Sedum*. Nessuna variazione rispetto a 10 giorni prima. La temperatura rilevata sotto le Graminaceae è mediamente intorno ai 23 °C con differenze tra il giorno e la notte inferiori a 1 °C; quella sotto il *Sedum* è mediamente di circa 20 °C con fluttuazioni inferiori a 0,5 °C (Figura 49a). Il grafico giornaliero (Figura 49c) evidenzia che le temperature superficiali più elevate sotto le due tipologie di coperture verdi si hanno intorno alle ore 19:00-20:00, mentre la temperatura superficiale rilevata su tetto nudo è più elevata intorno alle ore 13:00 e la differenza alla stessa ora con quella rilevata sotto le due coperture verdi è rispettivamente di circa 20 °C con le Graminaceae e di 23 °C con il *Sedum*, come già riportato. Di notte invece la temperatura superficiale su tetto nudo è più bassa rispetto a quelle rilevate sotto le coperture verdi. La temperatura dell'aria alle ore 13:00 supera i 35 °C mentre la radiazione globale, alla stessa ora è intorno ai 700 W/m² (Figura 49b).



(a)



(b)



(c)

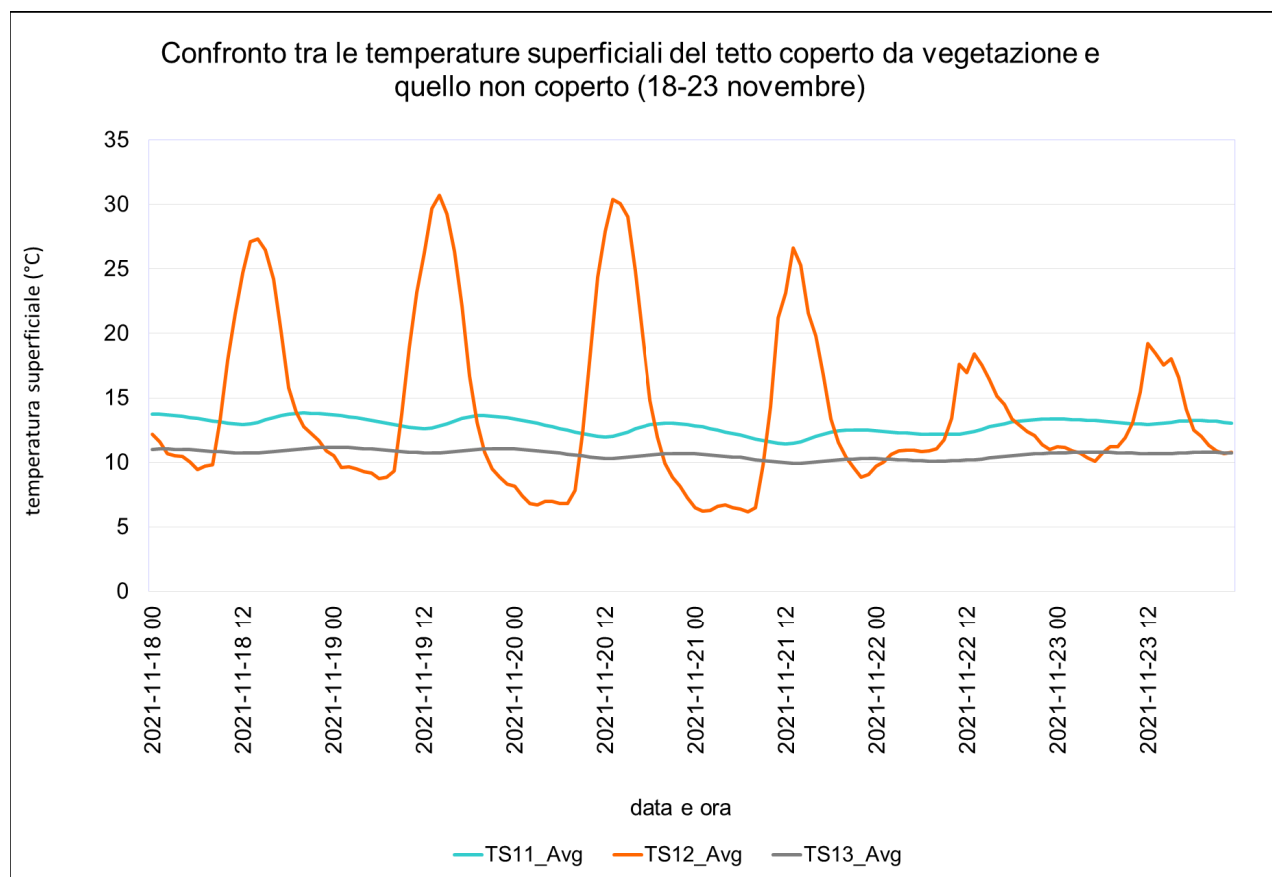
Figura 49. Settembre 2021, periodo dall'1 al 5. (a, b) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae; TS13: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12: controllo su tetto privo di vegetazione. (c) Temperatura dell'aria (AT) e radiazione globale (GR) medie rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale.

Ottobre

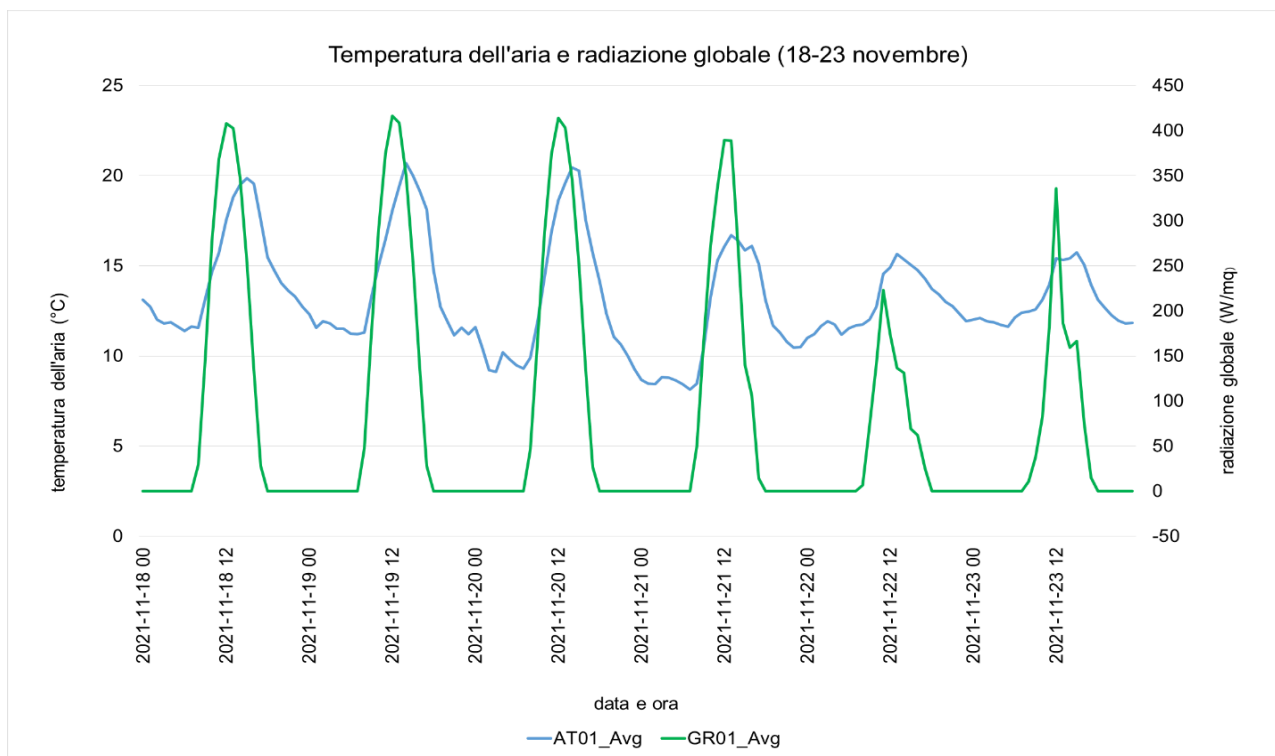
Purtroppo, nel mese di ottobre 2021 si sono verificate alcune anomalie a livello della centralina che non hanno consentito la registrazione di dati sufficienti per analizzarne l'andamento in un periodo di giorni significativo.

Novembre: settimana dal 18 al 23 novembre 2021

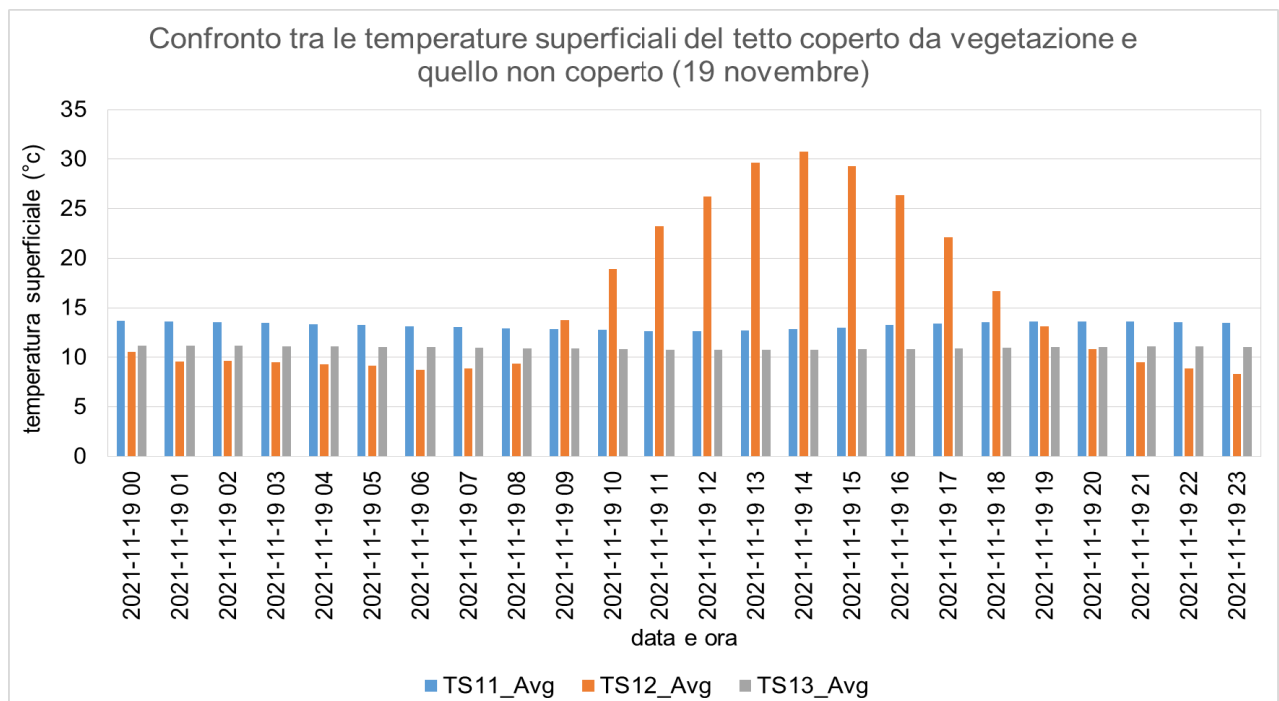
La media della temperatura superficiale sotto il *Sedum*, in questo periodo, è di 10,6 °C e presenta piccole oscillazioni (circa 0,5 °C) con la temperatura leggermente più alta di notte. La temperatura superficiale sotto le Graminaceae è più elevata e la media del periodo è di 12,9 °C con differenze tra il giorno e la notte inferiori a 1 °C. La media della temperatura superficiale rilevata su tetto nudo è intorno ai 14 °C con punte superiori ai 30 °C (giorno 19 alle ore 14:00) (Figura 50a). Dal grafico delle 24 ore si rileva che la temperatura superficiale su tetto privo di vegetazione si alza a partire dalle ore 9:00 e si abbassa verso le ore 19:00 (Figura 10 c). La media della temperatura dell'aria, in questo periodo, è intorno ai 14 °C ma in alcuni giorni, alle ore 14:00, supera i 20 °C mentre la minima non scende mai sotto gli 8 °C (Figura 50b). Da questi dati si evince che il vantaggio delle coperture verdi viene espletato maggiormente di notte impedendo un raffreddamento dei solai del tetto.



(a)



(b)

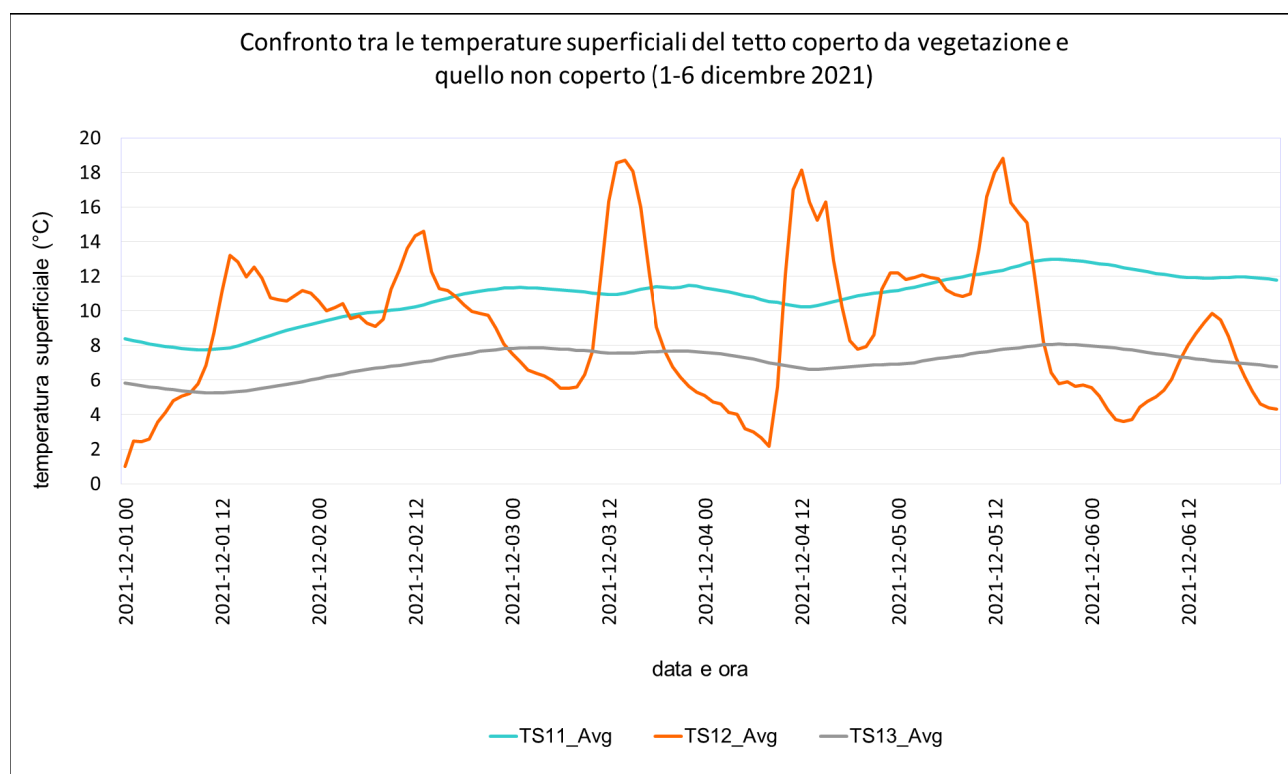


(c)

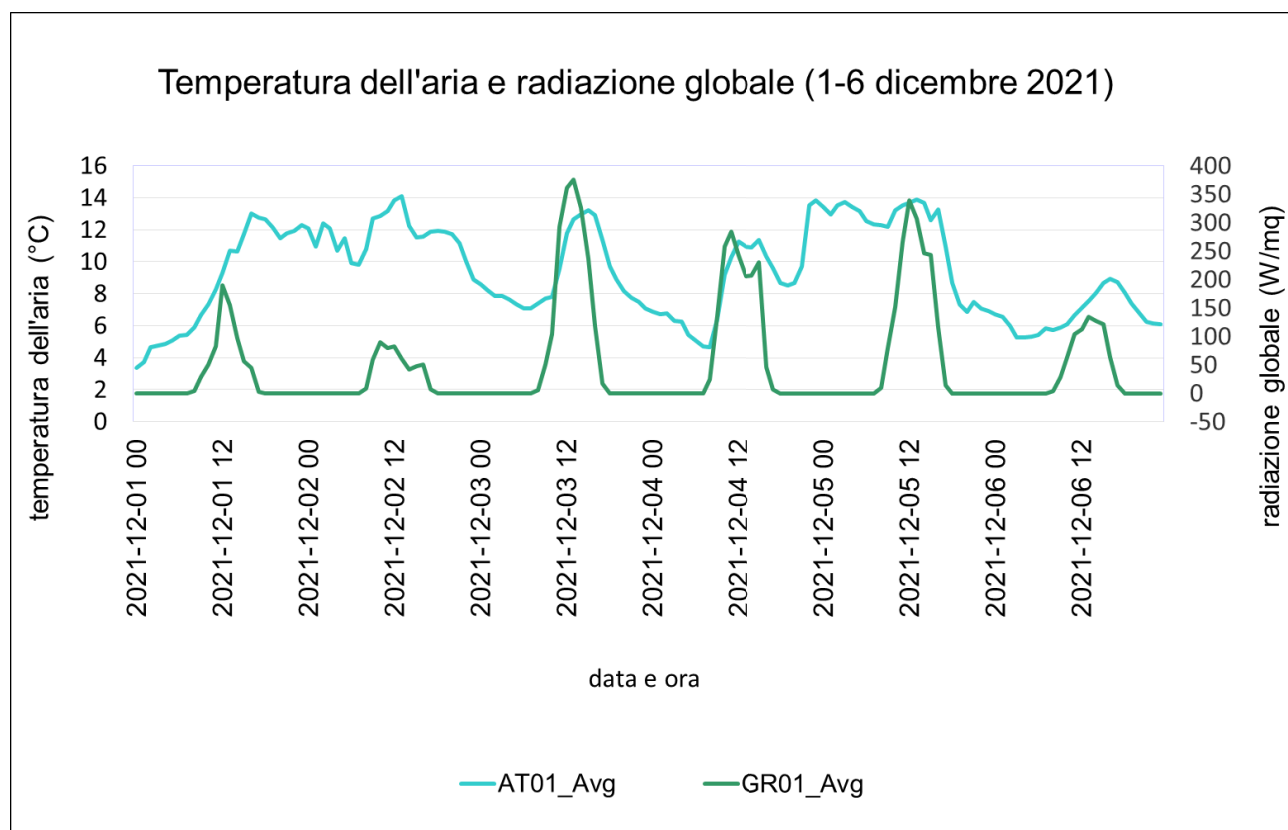
Figura 50. Novembre 2021, periodo dal 18 al 23. (a, c) Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11: sotto il manto erboso a Graminaceae; TS13: sotto il manto erboso a Sedum; TS12: controllo su tetto privo di vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) e radiazione globale (GR) medie rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale.

Dicembre: settimana dal 1° al 6 dicembre 2021

Sempre dovuto ad anomalie verificatesi a livello della centralina, i periodi monitorati dei mesi di novembre e dicembre distano solo di una settimana; tuttavia, in questo intervallo si verifica un abbassamento della temperatura dell'aria che passa da circa 14 °C nel periodo 18-23 novembre a 9,3 °C nella prima settimana di dicembre; le massime superano i 13 °C e le minime non scendono mai al di sotto dei 3 °C. La temperatura superficiale su tetto privo di vegetazione, di notte, arriva a 1–2 °C e di giorno può superare anche i 18 °C. La media del periodo si attesta intorno ai 9 °C. La temperatura sotto le Graminaceae in questo periodo varia dagli 8 °C a quasi 13 °C con una media di 10,8 °C. La temperatura superficiale rilevata sotto il *Sedum* rimane più stabile, con scarse variazioni e una media di 7 °C, quindi di quasi 4 °C inferiore a quella rilevata sotto le Graminaceae.



(a)



(b)

Figura 51. Dicembre 2021, periodo dall'1 al 6. (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 sutetto privo di vegetazione. (b) Temperatura dell'aria (AT) e radiazione globale (GR) medie rilevate dalla stazione meteorologica installata a livello del tetto verde. AT01: temperatura dell'aria; GR01: radiazione globale.

In conclusione, dal monitoraggio delle temperature superficiali misurate sul tetto, considerando sia i dati del 2020 (citare il Report RDS 2020 e inserirlo in bibliografia) che quelli del 2021, possiamo affermare con certezza che la presenza di un manto vegetale adagiato sulla superficie di un lastrico solare:

- in estate limita significativamente il flusso di calore all'interno dell'edificio (più specificamente nell'ambiente adiacente sottostante), consentendo di risparmiare elettricità per il raffrescamento;
- in inverno limita gli effetti degli sbalzi di temperatura dell'aria che si susseguono tra il giorno e la notte, mantenendo una temperatura più costante sulla superficie del tetto e di conseguenza all'interno dell'edificio (più specificamente nell'ambiente adiacente sottostante), consentendo di risparmiare energia per il riscaldamento.

Evidentemente il risparmio conseguibile durante l'estate è superiore rispetto all'inverno.

La temperatura rilevata sotto la copertura a *Sedum*, con prevalenza di *Sedum spurium*, è mediamente sempre più bassa, sia in inverno che d'estate, con differenze rispetto alla copertura rilevata sotto le Graminaceae che aumentano con l'aumentare della temperatura superficiale rilevata su tetto nudo. In media si verificano da 2 a 4 °C di differenza. La copertura con questa tipologia di *Sedum* presenta maggiori vantaggi in estate rispetto

all'inverno e quindi risulta più adatta al raffrescamento estivo degli ambienti sottostanti il tetto; in inverno, al contrario, la copertura a Graminaceae può contribuire maggiormente a impedire che la temperatura negli ambienti interni, di notte, subisca gli effetti degli sbalzi di temperatura influenzati dai picchi di raffreddamento dei solai del tetto. Ad ogni modo, entrambe le tipologie di coperture verdi mantengono le temperature superficiali più costanti rispetto agli sbalzi di temperatura che si hanno su tetto nudo, di giorno, in inverno, nelle giornate assolate possono impedire la diffusione del calore negli ambienti interni dovuto al riscaldamento delle superfici del tetto nudo.

3.5.1 Confronto tra i risultati del monitoraggio delle temperature superficiali sul tetto verde nel 2020 e nel 2021.

In questo paragrafo vengono confrontati i risultati del monitoraggio dei dati termici effettuato sul tetto verde nel 2020 con quelli del monitoraggio nel 2021. I mesi scelti per il confronto sono stati:

- gennaio, per la stagione invernale con la media delle temperature dell'aria e radiazione globale più bassa, sia nel 2020 che nel 2021 (Tabella 13);
- aprile, per i mesi primaverili in cui si rileva un innalzamento della temperatura dell'aria e della radiazione luminosa come dai dati riportati in Tabella 13. Con l'innalzamento della temperatura e l'allungarsi del fotoperiodo inizia anche la ripresa vegetativa delle piante;
- luglio e agosto, per la stagione estiva quando le temperature dell'aria e la radiazione luminosa sono più elevate (Tabella 13) e la copertura vegetale del tetto esplica i maggiori benefici termici.

Tabella 13. Media mensile della temperatura dell'aria e della radiazione globale rilevate dalla stazione a livello del tetto nell'anno 2020 e nell'anno 2021

Mesi	Anno 2020		Anno 2021	
	Media delle Temperatura dell'aria (AT01_Avg) (°C)	Media della Radiazione globale (GR01_Avg) (W/mq)	Media delle Temperatura dell'aria (AT01_Avg) (°C)	Media della Radiazione globale (GR01_Avg) (W/mq)
Gennaio	8,6	82,5	7,5	70,2
Febbraio	10,4	123,7	10,0	102,9
Marzo	10,8	160,5	10,0	158,5
Aprile	13,7	220,4	11,8	241,1
Maggio	18,9	252,3	17,2	350,8
Giugno	21,3	281,5	24,5	329,4
Luglio	25,6	292,8	26,4	297,9
Agosto	26,0	245,0	25,5	231,9
Settembre	21,9	179,727	23,7	214,3
Ottobre	15,3	124,7	Non rilevato	Non rilevato
Novembre	13,3	86,8	11,8	64,5
Dicembre	9,1	54,1	9,4	57,6

Gennaio 2020 e 2021: periodo dal 23 al 30

In inverno non si evidenziano significative differenze nell'andamento delle temperature superficiali sotto la copertura a Graminaceae e quella a *Sedum*, per entrambi gli anni (Figura 52). Le temperature superficiali per l'anno 2021 sotto le due tipologie di tetto verde sono più basse, in rapporto ai dati di temperatura dell'aria e radiazione globale riportati in Tabella 13 ed anche alla minore temperatura superficiale del tetto nudo. Un andamento più uniforme della temperatura sotto il *Sedum* (TS13) si verifica in entrambi gli anni. La media dei dati nel periodo considerato non rileva differenze tra le temperature superficiali sotto le due tipologie di tetto verde (anno 2020: sensore TS11 = 8,9 °C; sensore TS13 = 8,9 °C; anno 2021: sensore TS11 = 7,2 °C, TS13 = 7,2 °C). Nei giorni in cui si verificano le differenze di temperatura tra le due tipologie di tetto verde queste non superano mai 1 °C. Nel 2021, come descritto nel paragrafo precedente in alcuni giorni la temperatura superficiale sotto il *Sedum* si presenta leggermente superiore a quella rilevata sotto le Graminaceae; nel 2020, sembrerebbe il contrario ma si tratta di lievi flessioni che non possono essere considerate rilevanti ai fini di definire una differenza di temperatura che possa influenzare un eventuale risparmio energetico per gli ambienti sottostanti il tetto verde.

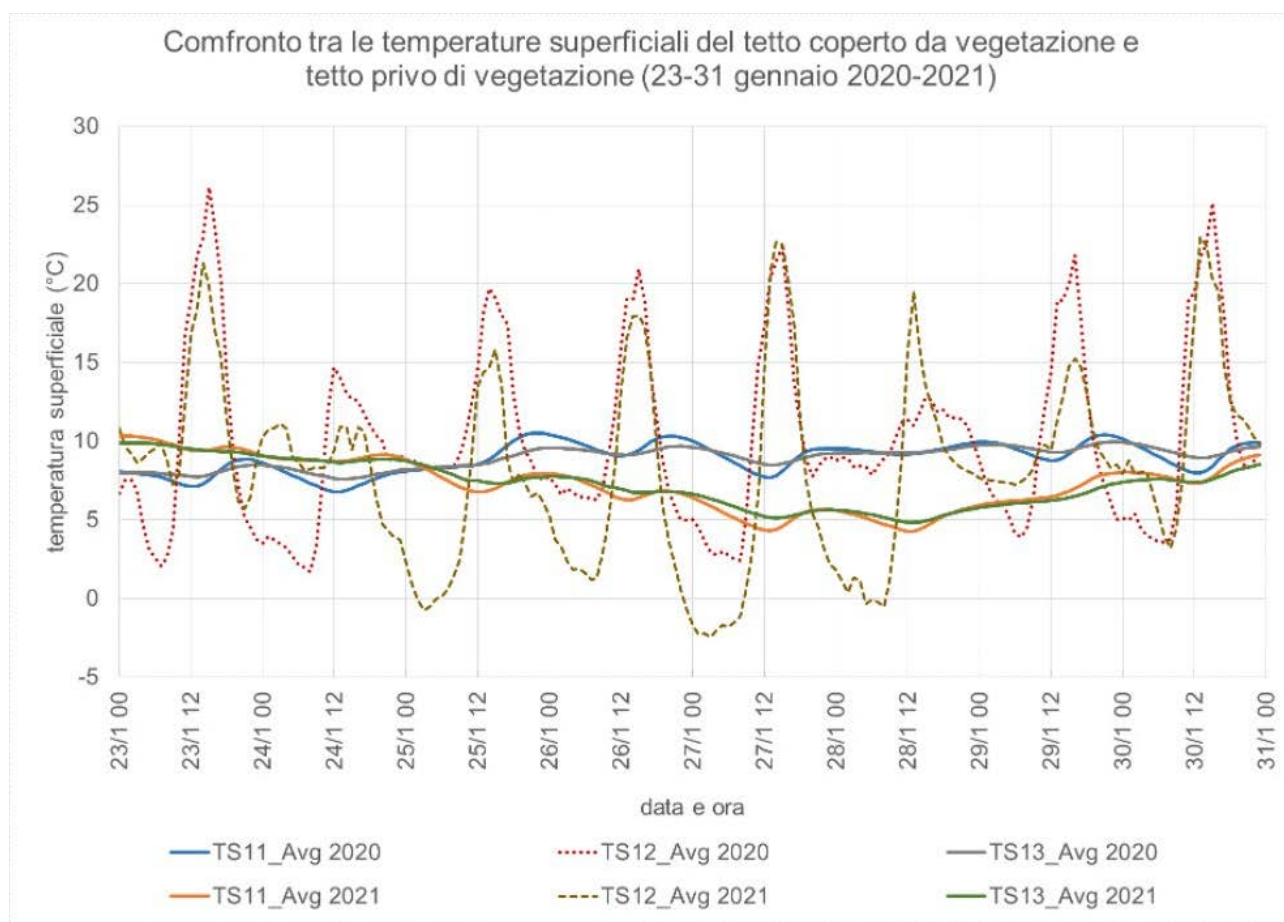


Figura 52. Gennaio 2020-2021, periodo dal 23 al 30. Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11 2020, TS11 2021: sotto il manto erboso a Graminaceae; TS13 2020, TS13 2021: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12 2020, TS12 2021: controllo su tetto privo di vegetazione.

Aprile 2020 - 2021: periodo dal 10 al 17

Un andamento più uniforme delle temperature è rilevabile sotto la copertura a *Sedum* rispetto a quella sotto la copertura a Graminacea dove si notano maggiori fluttuazioni sia per l'anno 2020 che per l'anno 2021. Con l'alzarsi delle temperature superficiali del tetto nudo la differenza tra la temperatura superficiale rilevata sotto il *Sedum* e quella rilevata sotto le Graminaceae aumenta e soprattutto di notte quella sotto le Graminaceae è più elevata per entrambi gli anni. La media delle temperature (notte/giorno) del periodo è più elevata di 0,5 °C sotto le Graminaceae per l'anno 2020 e 1,5 °C per l'anno 2021, rispetto alla copertura a *Sedum*.

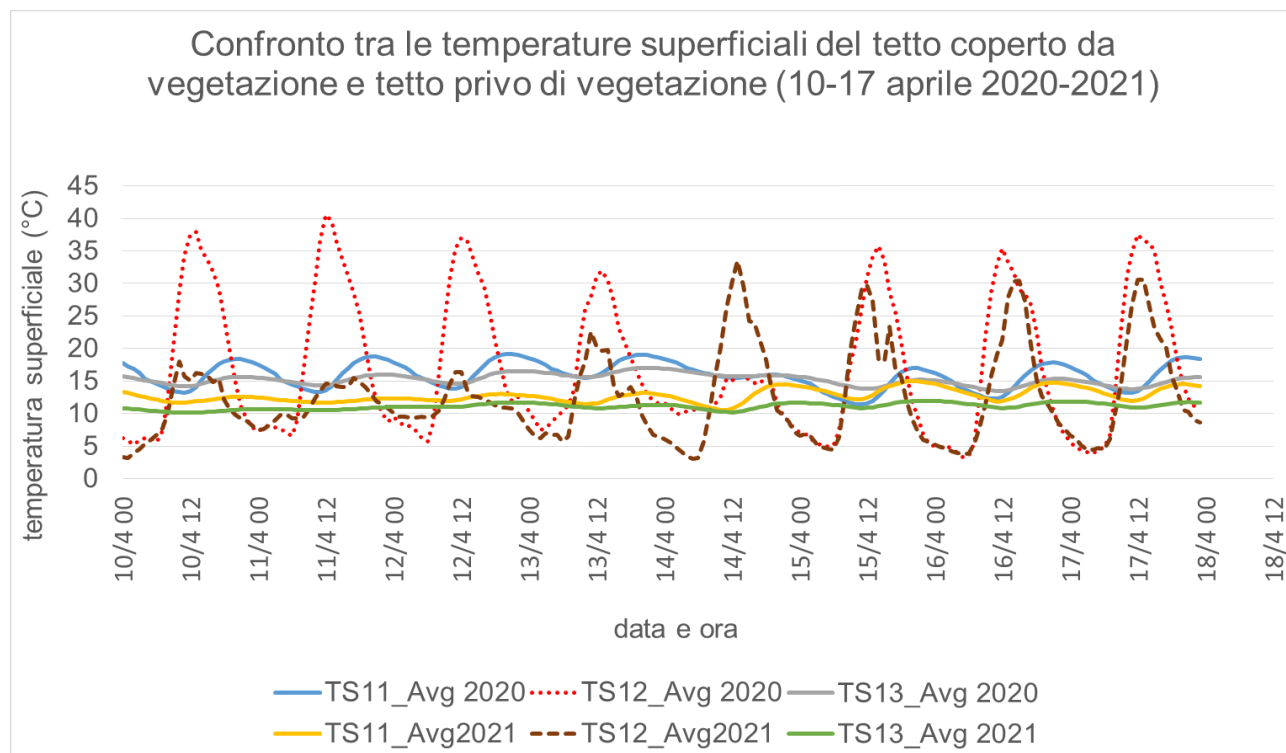


Figura 53. Aprile 2020-2021, periodo dal 10 al 17. Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11 2020, TS11 2021: sotto il manto erboso a Graminaceae; TS13 2020, TS13 2021: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12 2020, TS12

Luglio 2020-2021: periodo dal 27 al 31

Con la stagione estiva e con l'aumento delle temperature superficiali del tetto privo di vegetazione la distanza tra le temperature superficiali del tetto coperto dalle due diverse tipologie di vegetazione aumenta maggiormente rispetto a quella rilevata ad aprile. La temperatura sotto la copertura a *Sedum* resta più bassa sia di notte che di giorno per entrambi gli anni; inoltre presenta un andamento più costante quindi con meno sbalzi di temperatura rispetto alle Graminaceae. Nel 2020 la differenza tra le due temperature corrispondenti alle due diverse coperture è inferiore rispetto al 2021 che comunque si mantiene più bassa sotto il *Sedum* (Figura 54). Questa differenza può dipendere dallo stato della vegetazione e dal fatto che il particolare periodo pandemico del 2020 non ha consentito di effettuare una adeguata manutenzione delle coperture verdi.

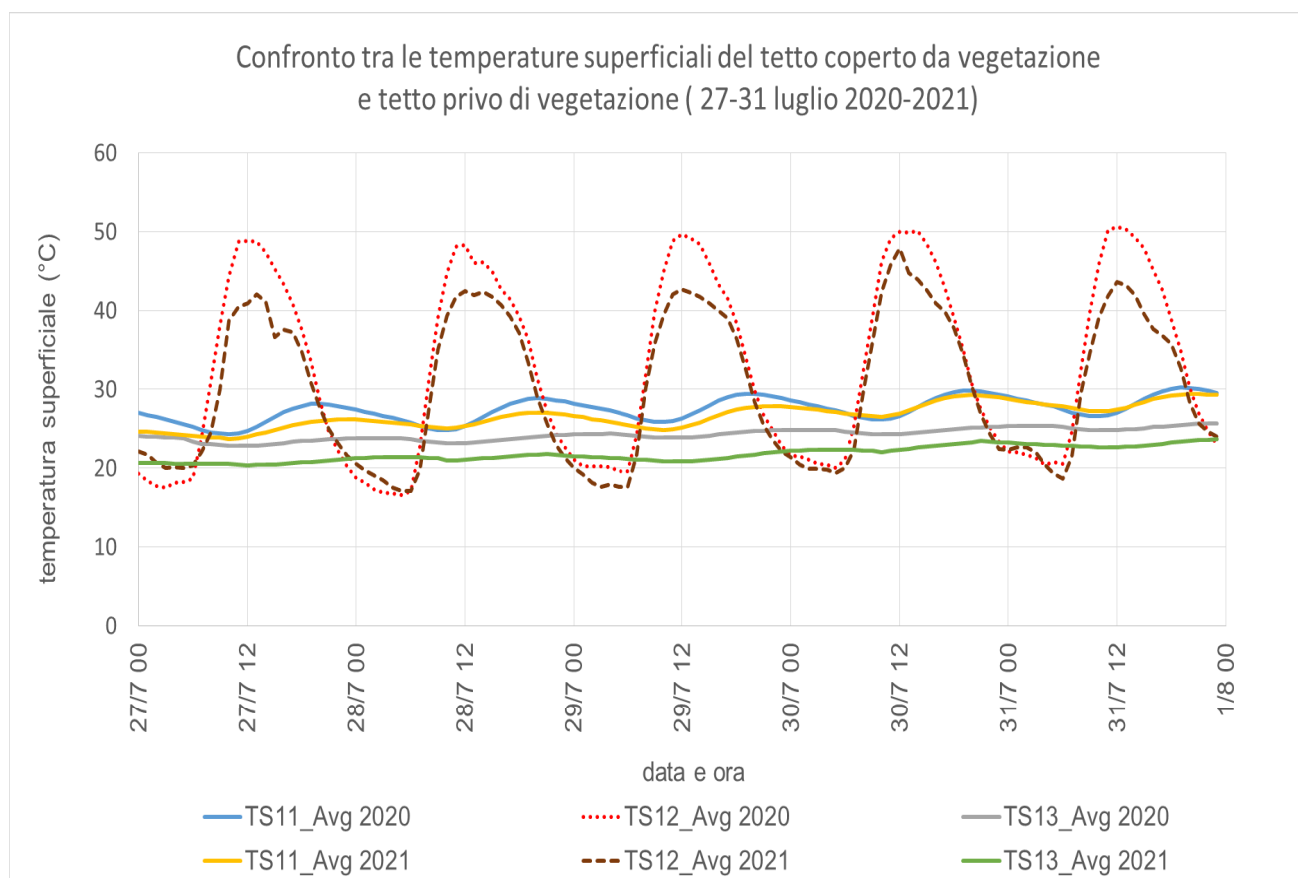


Figura 54. Luglio 2020-2021 periodo 27-31. Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11 2020, TS11 2021: sotto il manto erboso a Graminaceae; TS13 2020, TS13 2020: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12 2020, TS12 2021: controllo su tetto privo di vegetazione.

Agosto 2020 - 2021: settimana dal 27 al 31

In agosto è ancor più evidente che la temperatura sotto la copertura a *Sedum* resta più bassa rispetto a quella rilevata sotto la copertura a prato di Graminaceae. La media del periodo, includendo notte e giorno, evidenzia una differenza superiore a 3 °C (sensore TS11 = 27,5 °C, sensore TS13 = 24,18 °C) nel 2021, e di circa 1,5 °C nel 2020 (TS11 = 26,8 °C, TS13 = 25,1 °C). La differenza da un anno a un altro, come detto in precedenza, può dipendere dallo stato della vegetazione, comunque per entrambi gli anni la temperatura sotto la copertura a *Sedum* è più bassa. L'abbattimento delle temperature superficiali nelle ore centrali della giornata è elevato: la differenza tra la temperatura su tetto privo di vegetazione e quello coperto è di circa 23 °C con la copertura a *Sedum* e circa 20 °C con quella a Graminaceae, sia per il 2020 che per il 2021.

In Tabella 14, per il periodo 14-21 agosto, sono riportati i valori delle medie delle temperature superficiali rilevate nell'arco orario (24:00-5:00 e 8:00-21:00) sotto le coperture verdi a Graminaceae (TS11) e a *Sedum* (TS13) e sopra il tetto privo di vegetazione (TS12) per il 2020 e per il 2021.

Nelle ore notturne, quindi, la temperatura superficiale sopra il tetto nudo è più bassa rispetto a quella rilevata sotto le due tipologie di coperture verdi, con una maggiore differenza nel 2020 rispetto al 2021 in cui tra tetto nudo e Graminaceae si osserva una differenza di quasi 8 °C e tra tetto nudo e *Sedum* di 6 °C. Nelle ore diurne, considerando l'arco tra le 8:00 e le 21:00, invece, il beneficio dovuto alle coperture verdi è evidente rilevandosi una media delle temperature più bassa rispetto a quella rilevata su tetto nudo di 11 °C con le Graminaceae e di 13 °C con la copertura a *Sedum*, nel 2020, e di 7 °C con le Graminaceae e 11 °C con il *Sedum*, nel 2021.

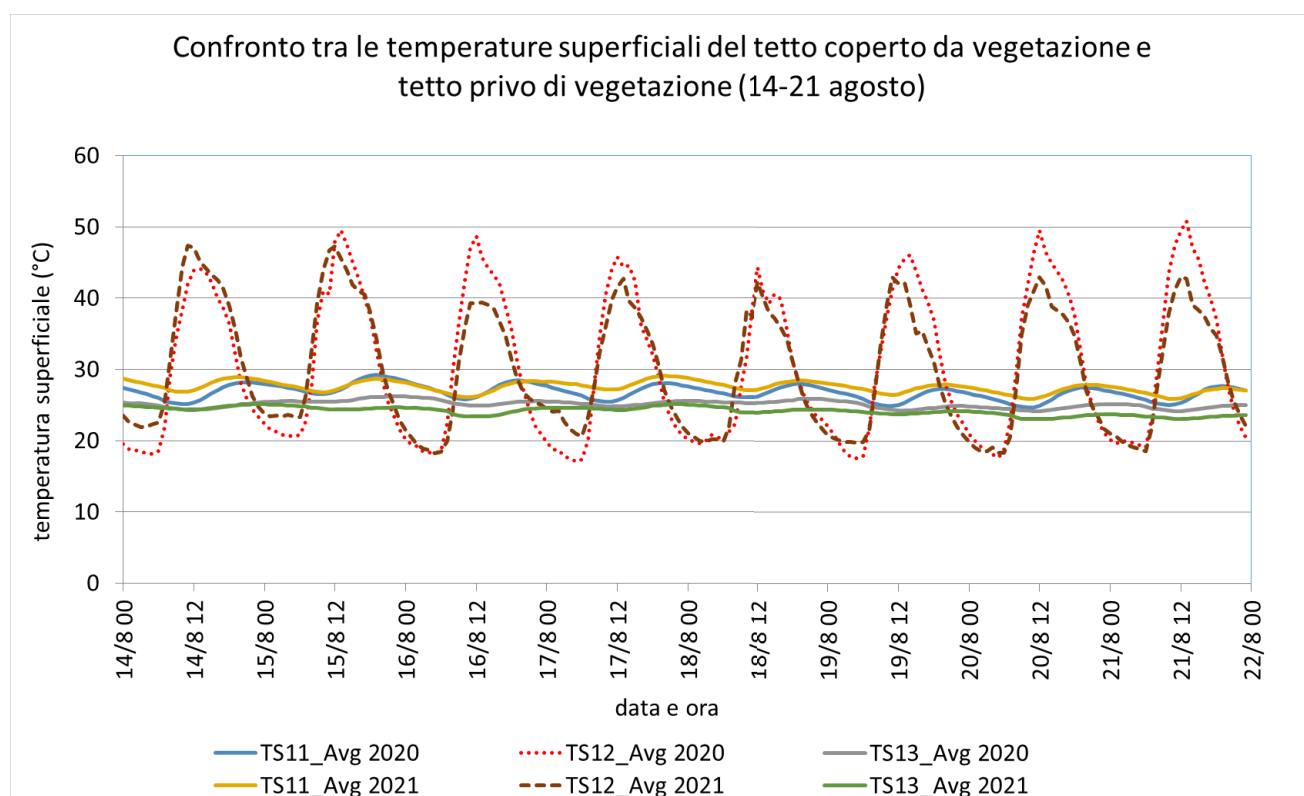


Figura 55. Agosto 2020-2021, periodo dal 14 al 31. Temperature superficiali (TS) medie rilevate sotto la vegetazione del tetto verde. TS11 2020, TS11 2021: sotto il manto erboso a Graminaceae; TS13 2020, TS13 2020: sotto il manto erboso a *Sedum*; TS12 2020, TS12 2021: controllo su tetto privo di vegetazione.

Tabella 14. Media delle temperature superficiali (TS) nelle ore notturne e diurne nel periodo 14-21 agosto

Ore	Anno 2020			Anno 2021		
	TS sotto Graminaceae (TS11_Avg) (°C)	TS su tetto nudo (TS12_Avg) (°C)	TS sotto <i>Sedum</i> (TS13_Avg) (°C)	TS sotto Graminaceae TS11_Avg (°C)	TS su tetto nudo TS12_Avg (°C)	TS sotto <i>Sedum</i> (TS13_Avg) (°C)
Dalle 24:00 alle 5:00	27,0	19,4	25,4	27,8	21,0	24,5
Dalle 8:00 alle 21:00	26,4	37,6	24,7	27,1	34,3	23,6

Per concludere, la copertura a *Sedum*, dai dati rilevati, consente in estate e nelle ore diurne una maggiore riduzione della temperatura superficiale rispetto alla copertura a Graminaceae. La temperatura superficiale più bassa di circa 2-3 °C consente un maggiore raffrescamento delle superfici e quindi degli ambienti abitati sottostanti il tetto verde con conseguente risparmio energetico speso per i condizionatori. Nelle ore più calde della giornata è comunque rilevante l'abbattimento della temperatura dovuta a entrambe le tipologie di copertura verde. Nelle ore notturne la temperatura superficiale sotto le coperture verdi resta più alta rispetto al tetto privo di vegetazione, con minore differenza per quella coperta da *Sedum* (con prevalenza di *sedum spurium*) senza mai raggiungere temperature critiche (Tabella 14). In inverno, le coperture verdi di notte mitigano l'abbassamento delle temperature superficiali limitando gli effetti degli sbalzi termici all'interno dell'edificio; diversamente, di giorno, in particolar modo nelle giornate assolate, limitano il riscaldamento dei solai del tetto ostacolando il flusso di calore dall'esterno verso l'interno. Essendo questo secondo effetto poco vantaggioso, bisognerebbe effettuare un bilancio termico al fine di valutare il risparmio energetico totale a livello invernale. In definitiva, i nostri risultati confermano pienamente che le coperture verdi offrono, in estate, un raffrescamento delle superfici e conseguentemente si può beneficiare di un notevole risparmio energetico. In aggiunta, spingono gli *stakeholder* ad interessarsi maggiormente alla realizzazione di tetti verdi realizzati impiegando piante annuali che in autunno seccano e tornano a vegetare in primavera con totale copertura estiva del tetto. L'inserimento di queste piante, per lo più autoctone, porterebbe alla tutela e al miglioramento della biodiversità nelle città con il risultato di un beneficio doppio sia per la sostenibilità energetica che ambientale.

3.6 Flussi termici: Tetto verde sperimentale (ENEA)

La stima dei flussi termici entranti in un edificio è fondamentale per valutarne di conseguenza, le *performance* energetiche che vengono influenzate dalla necessità di ricorrere al condizionamento artificiale che oltre a comportare consumi energetici aumenta l’apporto di calore antropogenico nel sistema urbano, favorendo fenomeni quali le isole di calore urbano. Per stimare i flussi termici che attraversano il tetto verde sperimentale è stato fondamentale partire dai parametri costruttivi di quest’ultimo. La realizzazione del tetto verde ha previsto una tipologia di sistema verde multistrato, pensile, leggero, denominato “Geoplast”. In accordo con la norma UNI/TS 11300-1 e con le caratteristiche del modulo Geoplast i valori delle trasmittanze termiche sono risultati pari a 0,35 per il tetto non vegetato e a 0,31 per il tetto vegetato (Figura 56)

STRATIGRAFIA						
DESCRIZIONE		SPESSORE	CONDUTTIVITA'	RESISTENZA	TRASMITTANZA	
		(m)	[λ]	TERMICA [R]	TERMICA [τ]	
			W/mK	m²K/W	W/m² K	
Solaio	Resistenza termica interna			0,100		
	Intonaco interno		0,015	0,240		0,063
	Pignatta *		0,180			0,300
	Isolante termico		0,080	0,035		2,286
	Massetto in cls		0,050	1,490		0,034
	Guaina imp. Bituminosa		0,004	0,150		0,027
	Piastrelle		0,012	0,800		0,015
	Resistenza termica esterna					0,040
RESISTENZA TERMICA STRUTTURA [Rstruttura]				2,864		
TRASMITTANZA TERMICA STRUTTURA [Ustruttura]					0,35	
Verde	Strato di geotessile non tessuto (TNT)		0,132	0,366	0,361	
	Manto sintetico in PVC, tipo HarpoPlan ZD UV					
	Sistema multistrato verde**					
RESISTENZA TERMICA VERDE [Rgreen]				0,361		
TRASMITTANZA TERMICA GREEN [Ugreen]					2,77	
RESISTENZA TERMICA TOTALE [Rtotale]				3,225		
TRASMITTANZA TERMICA TOTALE [Utotale]					0,31	
* Pignatta - UNI 10355					PERCENTUALE di guadagno	
** Sistema estensivo con spessore di sub strato medio pari a 13 cm						
					11,19%	

Figura 56. Descrizione della stratigrafia del tetto verde

Il flusso termico è stato calcolato con la relazione (i cui elementi chiave saranno dettagliati maggiormente nel capitolo flussi termici della parete verde (§2.3.1):

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

con:	Parametri tetto
Q = Flusso termico (kWh_t/m^2);	TS11 = temperatura superficiale tetto coperto.
U = Trasmittanza ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$);	TS12 = temperatura superficiale tetto scoperto.
S = Superficie (m^2);	T_{int} (temperatura interna) = 26°C .
ΔT = Differenza di temperatura tra	Differenza ($\text{TS11}-T_{\text{int}}$).
tetto scoperto e coperto ($^\circ\text{C}$);	Differenza ($\text{TS12}-T_{\text{int}}$).
t = Tempo (1 h).	Ora = 1.
	Trasmittanza termica tetto coperto = $0,31 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.
	Trasmittanza termica tetto scoperto = $0,35 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.
	Flusso termico tetto coperto (kWh_t/m^2).
	Flusso termico tetto scoperto (kWh_t/m^2).
	Variazione flusso termico (kWh_t/m^2).

I risultati mostrati nella Tabella 15 confermano la funzione isolante e protettiva esercitata dal verde pensile che ricopre il tetto dell'edificio. La vegetazione, infatti, riduce il riscaldamento della superficie del tetto da parte della radiazione solare, con conseguente minore trasmissione del flusso di calore verso il sottotetto. Si registra infatti una riduzione totale del flusso termico entrante di $4,68 \text{ kWh}_t/\text{m}^2$.

Tabella 15. Sommatoria dei flussi termici entranti calcolati per il tetto verde (tetto coperto verde) e per il tetto privo di copertura vegetale di controllo (tetto non coperto), nei mesi da maggio ad agosto nell'anno 2021. Nella colonna di destra è stata riportata la differenza (Δ) tra i due flussi termici.

Flusso termico specifico entrante (kWh_t/m^2) per il tetto verde, anno 2021			
Mesi	Tetto coperto verde	Tetto non coperto	Δ (Tetto non coperto-coperto)
maggio	0,07	0,40	0,33
giugno	0,20	1,37	1,18
luglio	0,36	1,96	1,60
agosto	0,58	2,15	1,57
Totale	1,20	5,88	4,68

In conclusione, l'analisi energetica relativa al periodo di fine primavera estate 2021, da maggio ad agosto, periodo in cui si verificano i maggiori flussi termici entranti, ha confermato la maggiore capacità isolante del tetto verde, alla quale corrisponde una riduzione dei consumi di energia elettrica per la climatizzazione estiva grazie alla riduzione di circa l'80% dei flussi termici entranti nell'edificio. La differenza tra i flussi termici, rilevata tra il tetto non coperto ($5,88 \text{ kWh}_t/\text{m}^2$) e quello verde ($1,20 \text{ kWh}_t/\text{m}^2$), è risultata pari a $4,68 \text{ kWh}_t/\text{m}^2$ che tenuto conto di un EER pari a 3,7 (preso come riferimento di un rendimento minimo di un climatizzatore) approssimativamente equivale a una riduzione di energia elettrica per il condizionamento estivo, da maggio ad agosto, di circa $1,26 \text{ kWh}_t/\text{m}^2$ e di CO_2 pari a $0,56 \text{ kg}/\text{m}^2$ ($444,4 \text{ g CO}_2/\text{kWh}_t$) [42]. Pertanto, l'applicazione della vegetazione migliora il *comfort* microclimatico degli ambienti sottostanti il tetto verde e riduce l'accensione dei condizionatori nel periodo primavera-estate, con un consumo minore di elettricità.

4 Serra bioclimatica

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

A valle degli studi effettuati nel 2019 e nel 2020 sull’evapotraspirazione (ET) delle specie vegetali (Report RDS 2019 e 2020 riferiti alle prime due annualità, LA2.1 e LA2.2), nel mese di giugno dell’anno 2021 si è proceduto ad inserire, all’interno della serra bioclimatica, presente nell’edificio F92 dell’area Capanna del CR Casaccia, un nuovo “allestimento vegetale” con lo scopo di approfondire gli studi dell’effetto dei processi evapotraspirativi delle piante sul raffrescamento dello spazio abitato, durante il periodo estivo, integrato con dell’illuminazione a LED. Visti i dati incoraggianti ottenuti nella campagna precedente (anno 2020), per il 2021 si è deciso di confermare le specie utilizzate nella sperimentazione del 2020. Il 23 giugno, sono state quindi inserite nella serra piantine di pomodoro, di sedano e di lattuga, acquistate presso un vivaio (Figura 57) e piante di vite che erano state utilizzate nel corso della sperimentazione del 2020 e mantenute nella serra durante l’anno. Al fine di aumentare le conoscenze anche su altre specie, nella serra sono state inserite piantine di peperoncino ottenute da semi di una varietà presente sulla parete verde dell’edificio F92 che ha dimostrato una buona adattabilità al luogo.



Figura 57. Allestimento delle piantine all’interno della serra bioclimatica

Le piante sono state irrigate utilizzando l'impianto di irrigazione costituito da tubi, gocciolatori e raccordi predisposto durante la campagna 2020 (Figura 58a). L'impianto è gestito da un programmatore d'irrigazione che 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 58b).

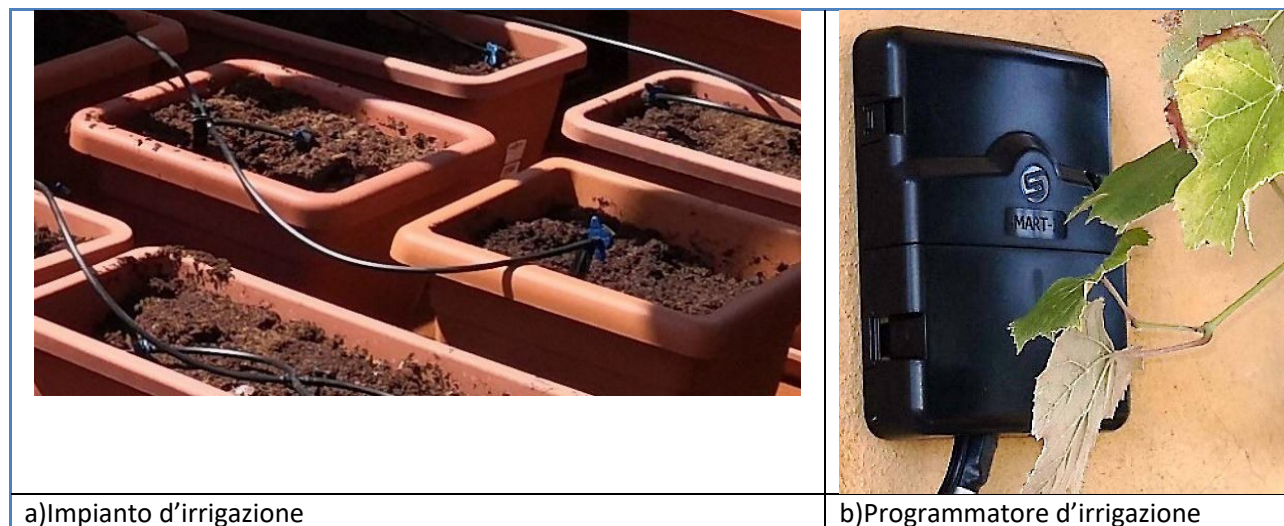


Figura 58. Impianto di irrigazione (a) e programmatore (b) inseriti all'interno della serra bioclimatica

La misura della quantità di acqua evapotraspirata è stata effettuata, come nel 2020, utilizzando bilance a celle di carico (Figura 59). La variazione di peso è stata calcolata in relazione al consumo idrico e alla capacità evapotraspirativa del sistema pianta-suolo in un tempo di 6 ore. In Figura 60 si vedono le piante posizionate all'interno della serra nel corso della sperimentazione del 2021.



Figura 59. Pianta di pomodoro durante la misura dell'evapotraspirazione. La pianta è posizionata sulla piattaforma (60x60 cm, e portata di 60 Kg (e=5g)) della bilancia a celle di carico e la variazione di peso è visualizzata sull'apposito indicatore (a sinistra).



Piante di lattuga, estate 2021



Piante di sedano, estate 2021



Piante di pomodoro, estate 2021



Piante di peperoni, estate 2021



Piante di vite, estate 2021

Figura 60. Specie vegetali scelte per la sperimentazione all'interno della serra bioclimatica, sperimentazione anno 2021.

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: n.3 repliche per la pianta di vite, n.6 repliche per la pianta di pomodoro, n.8 repliche per la pianta di sedano, n.12 repliche per la pianta di lattuga e n.2 repliche per la pianta di peperoncino. Quando nella serra è stato inserito il sistema di illuminazione a LED e aperte le tende oscuranti, tre dei sei vasi di pomodoro sono stati trasferiti sul tetto verde per una sperimentazione di ET in parallelo tra la serra bioclimatica ed il tetto verde, come descritto precedentemente nel paragrafo del capitolo tetto verde (§3.2).

Ciascuna replica è stata identificata con una sigla riportata di seguito:

Specie	Sigla
Pomodoro 1	P1
Pomodoro 2	P2
Pomodoro 3	P3
Pomodoro 4	P4
Pomodoro 5	P5
Pomodoro 6	P6
Peperone 1	Pep1
Peperone 2	Pep2
Vite 1	V1
Vite 2	V2
Vite 3	V3
Insalata 1-2	I 1-2
Insalata 3-4	I 3-4
Insalata 5-6	I 5-6
Insalata 7-8	I 7-8
Insalata 9-10	I 9-10
Insalata 11-12	I 11-12
Sedano 1	S1
Sedano 2	S2
Sedano 3	S3
Sedano 4	S4

L'allestimento dei vasi e delle specie vegetali in serra è schematizzato in Figura 61.

Disposizione e numero di piante per vaso nella Serra bioclimatica 2021

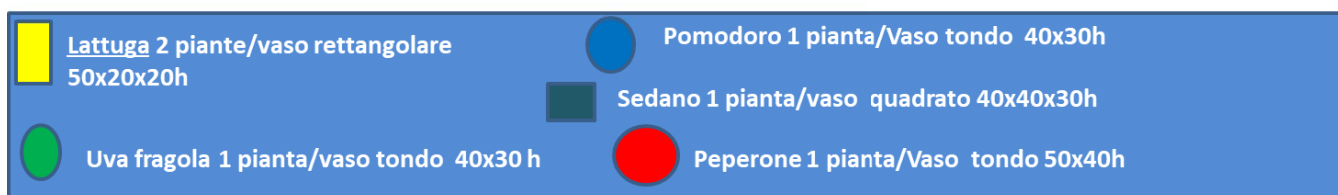
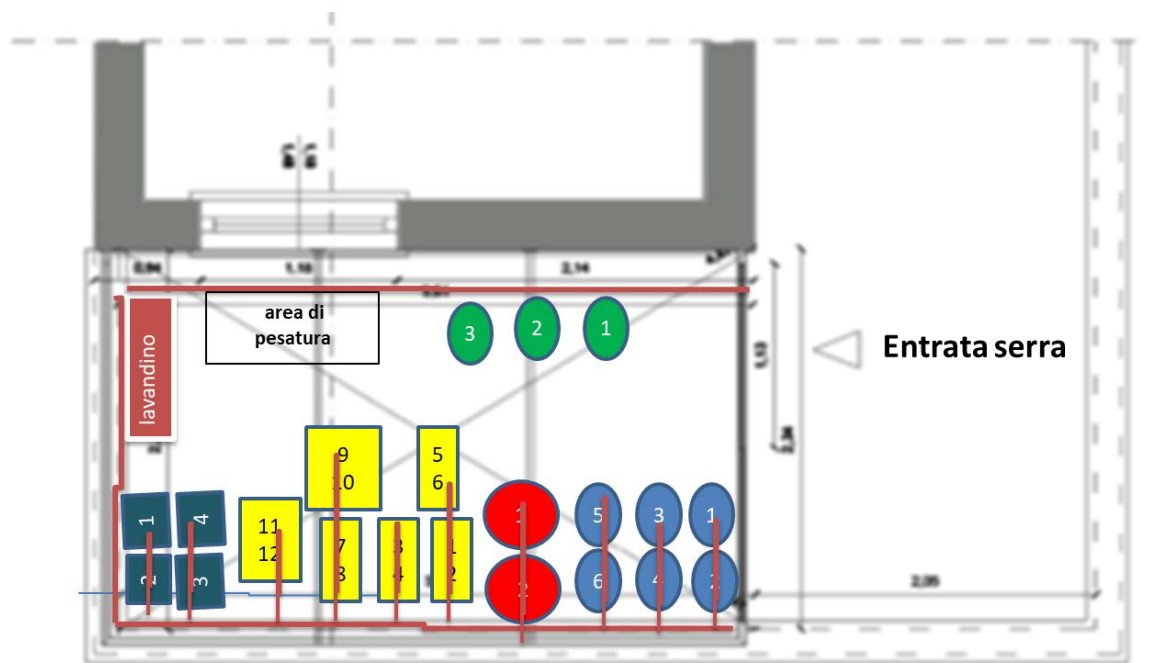


Figura 61. Allestimento anno 2021 del “sistema verde” in serra bioclimatica

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, diversamente dalla sperimentazione del 2020, è stata effettuata nel corso di 6 h, dalle ore 11:00 alle ore 17:00, nel periodo compreso tra l'8 luglio ed il 6 ottobre. Nella Figura 62 sono riportati degli scatti fotografici della serra bioclimatica che rappresentano diversi momenti di crescita della vegetazione, sia prima che dopo l'inserimento dell'impianto di illuminazione a LED. In entrambi i casi sono state lasciate semiaperte due finestre ad ovest e una a nord per favorire la ventilazione nella serra, così come era stato fatto nella sperimentazione del 2020.



Figura 62. Serra bioclimatica con il “sistema verde” fotografata in diversi momenti di crescita delle piante, prima e dopo l’inserimento del sistema di illuminazione a LED e l’abbassamento delle tende oscuranti.

4.2 Implementazione nella serra del sistema di illuminazione a LED

Lo scopo del sistema in oggetto è di integrare l'illuminazione di una serra adibita alla coltivazione di specie orticole per fini di ricerca, con l'impiego di lampade di nuova tecnologia a LED (Figura 63). Tale sistema è stato realizzato con l'impiego di due lampade a LED Antares di costruzione Ambra Elettronica da 325 W cadauna, alimentate da un sistema *inverter* con sorgente prioritaria da pannelli solari, e rete elettrica di back-up. Di seguito sono riportati le principali caratteristiche delle lampade a LED utilizzate nella serra:



Lampada Led

Alimentazione	100 ÷ 305 Vac 50 / 60Hz
Potenza utilizzata	325 W
Flusso di fotoni per lampada	730 $\mu\text{mol} / \text{s}$
Efficienza	2,40 $\mu\text{mol} / \text{J}$
Temperatura ambiente di lavoro	0 ÷ 45 °C
Dimensioni	570 x 360 x 60 mm
Grado di protezione	IP65
Peso	9 Kg
Protezioni	Corto circuito, sovracorrente, sovratensione, sovra temperatura
Diminuzione attesa dell'intensità di luce	10% @ 100.000 ore

Principali caratteristiche della lampada a led utilizzata per illuminare la serra bioclimatica



Figura 63. Serra bioclimatica con le lampade a LED installate.

La tipologia di lampada scelta non necessita di manutenzione particolare e periodica se non quella di pulizia della lastra in plexiglas tramite panno morbido utilizzando detergente non abrasivo per evitare graffi che possono alterare la fuoriuscita della luce. Il plexiglass utilizzato è specifico per evitare l'ingiallimento a causa dei raggi UV. Gli alimentatori installati su ciascuna lampada danno la possibilità di regolare la corrente di uscita, consentendo quindi di variare l'intensità luminosa sui piani di coltivazione. La regolazione della luce viene effettuata tramite un segnale di tipo 0 – 10Vdc (DIMMER), controllata da un potenziometro graduato presente sulla scatola.

Le percentuali di luce emessa nelle 4 fasce di lunghezze d'onda sono:

400-499 nm 18 %

500-599 nm 18 %

600-699 nm 62 %

700-760 nm 2 %

Dal 26 luglio 2021, e fino alla fine della sperimentazione della evapotraspirazione (6 ottobre 2021), nella serra bioclimatica l'impianto di illuminazione a LED è rimasto acceso per 8 ore al giorno (dalle ore 8:00 alle ore 20:00) e le tende oscuranti abbassate (serra ombreggiata).

4.3 Implementazione di pannelli fotovoltaici e di un inverter nell'edificio F92

Sul tetto dell'edificio F92 sono stati posizionati due pannelli solari da 80W ed un inverter che alimenta i sensori presenti sull'intero edificio F92 (tetto verde, parete verde, serra bioclimatica e stanze interne), oltre alle luci a LED e l'impianto di irrigazione posizionati nella serra bioclimatica, come da schema di seguito riportato (Figura 64 e Figura 65). Nella Figura 66, invece, è riportata una foto della serra bioclimatica con le luci a LED accese alimentate dai pannelli fotovoltaici.



**Figura 64. A -Inverter e sistema di collegamento posizionati nella stanza magazzino adiacente il tetto verde;
B -pannelli solari posizionati sul tetto verde dell'edificio F92**

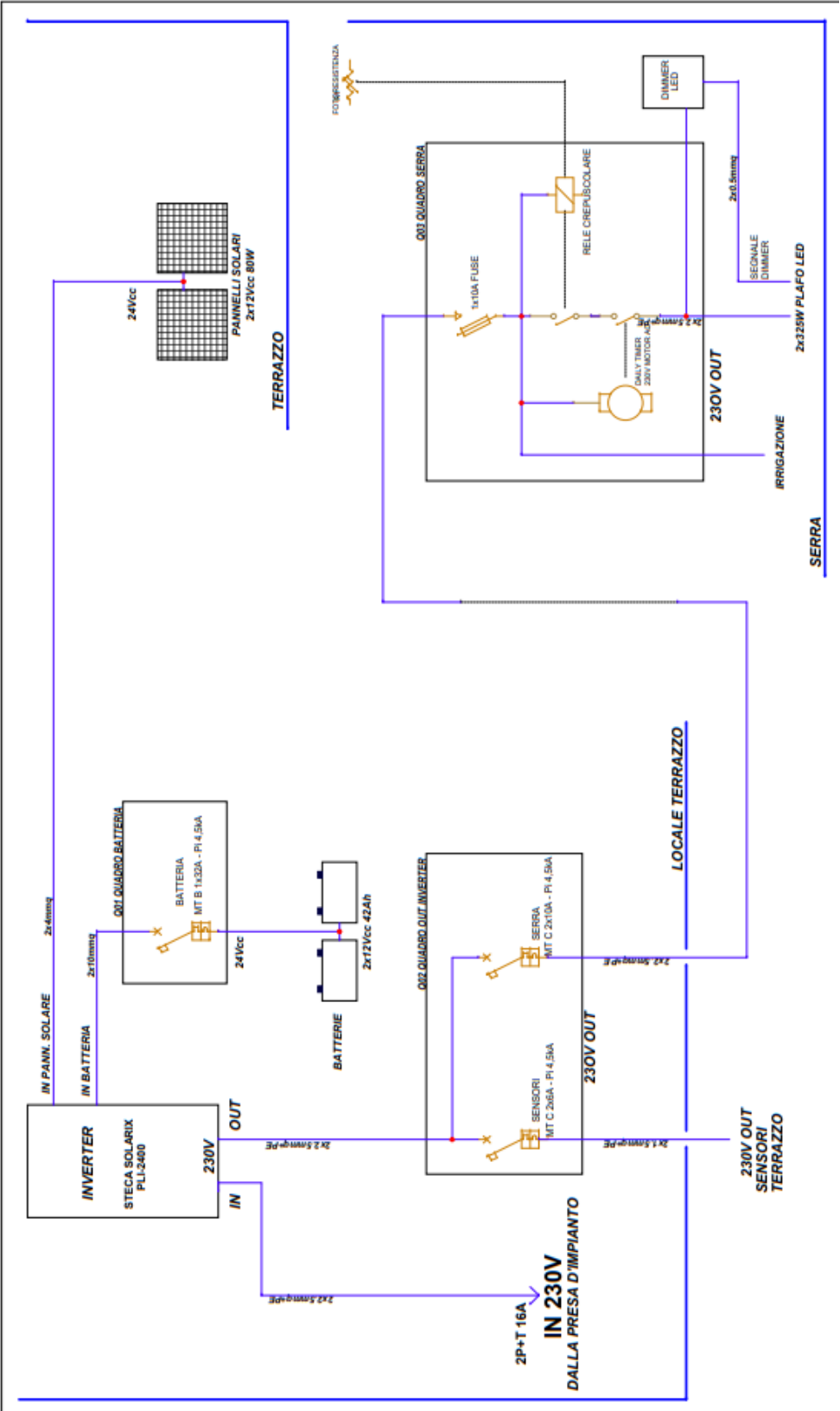


Figura 65. Schema impianto pannelli solari-edificio F92

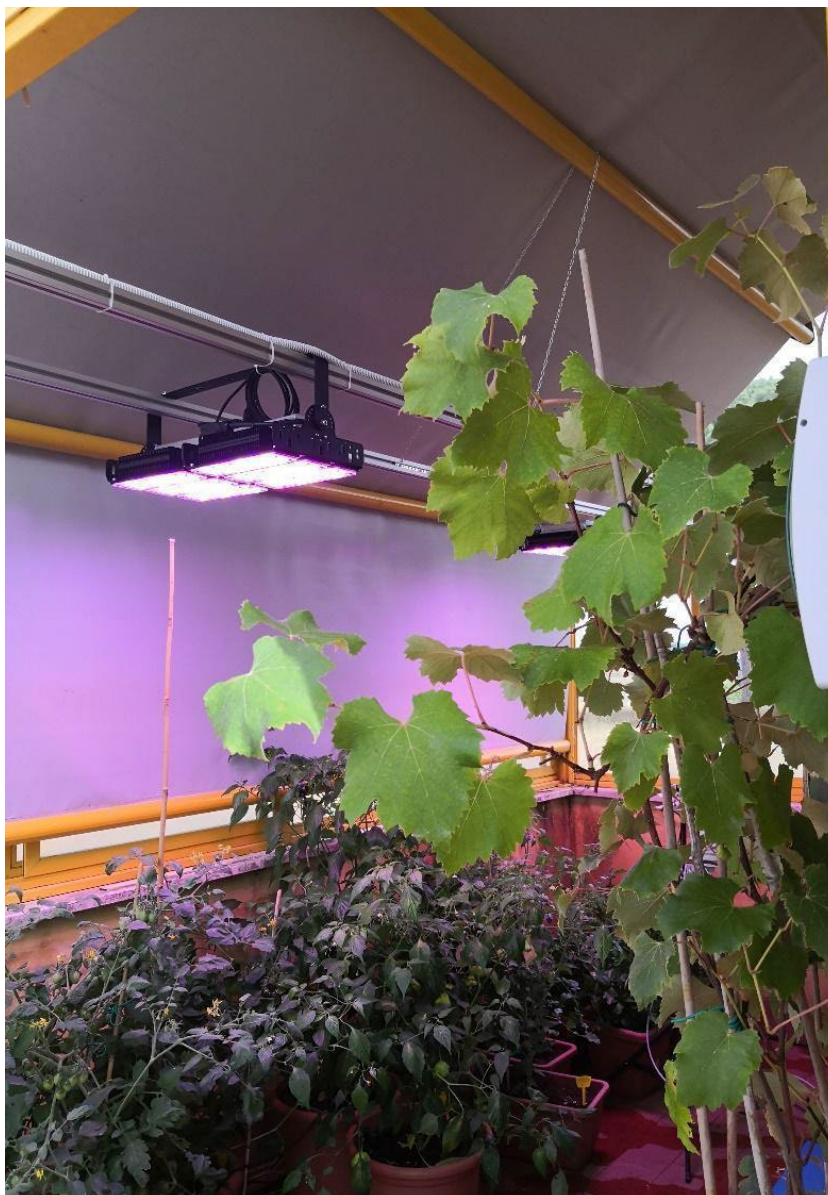


Figura 66. Serra bioclimatica con le lampade a LED accese e gli ombreggianti abbassati durante la sperimentazione nel 2021 (foto del 10 agosto 2021)

4.4 Misura della evapotraspirazione (ET) delle piante

La capacità evapotraspirativa delle specie vegetali è stata rilevata mediante la misura della variazione dei pesi dopo sei ore che il sistema pianta-suolo aveva raggiunto la capacità di campo. 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 16, hanno dimostrato 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 1,12 Kg durante le 6 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 da ciascuna pianta durante le giornate monitorate (6 h di sperimentazione) nel periodo luglio-ottobre 2021

Quantità media di acqua ET (kg) per pianta																		
	08-lug	09-lug	13-lug	14-lug	19-lug	20-lug	27-lug	03-ago	04-ago	13-ago	25-ago	31-ago	01-set	08-set	15-set	20-set	04-ott	06-ott
Sedano	-	-	-	-	-	-	0,25	0,27	0,29	0,44	0,33	0,35	0,36	0,29	0,31	0,24	0,19	0,04
Lattuga	0,33	0,40	0,18	0,35	0,48	0,45	0,17	0,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pomodoro	0,38	0,55	0,31	0,62	0,96	0,79	0,85	1,02	1,12	0,93	0,51	0,51	0,52	0,30	0,27	0,26	0,29	0,10
Vite	0,41	0,26	0,26	0,62	0,61	0,56	0,44	0,64	0,99	0,74	0,62	0,66	0,73	0,73	0,57	0,55	0,25	0,10
peperone	0,52	0,60	0,30	0,52	0,83	0,61	0,71	0,62	0,67	1,05	0,44	0,53	0,47	0,51	0,36	0,24	0,33	0,20

I valori massimi di acqua evapotraspirata nelle condizioni sperimentali della serra nel 2021, evidenziati in grassetto nella Tabella 16, sono stati di circa 1 kg di acqua evapotraspirata/pianta per le piante di pomodoro, vite e peperone e di circa 0,5 kg di acqua evapotraspirata/pianta per le piante di sedano e lattuga.

Dalla esperienza della sperimentazione condotta nel 2020, in cui le specie avevano mostrato basse capacità evapotraspirative allo stadio di piantina (circa prime due settimane dall'acquisto), per il 2021 si è deciso di aspettare che le piantine crescessero di circa due settimane prima di iniziare la misura dell'evapotraspirazione. Pertanto, l'inserimento delle piantine nella serra è avvenuto il 23 giugno 2021 mentre il monitoraggio dell'evapotraspirazione è iniziato a partire dall'8 luglio 2021 e si è protratto fino al 6 ottobre.

Le piante di lattuga, avendo dei cicli di sviluppo più corti rispetto alle altre specie, sono state monitorate per un periodo più breve e rimosse dalla serra in anticipo rispetto alle altre piante. Infatti, la sperimentazione iniziata il 23 giugno 2021 ha riguardato inizialmente le piante di pomodoro, vite, peperoncino e lattuga, ed è proseguita fino al 6 ottobre per tutte le piante tranne che per quelle di lattuga, per le quali il monitoraggio è stato interrotto il 3 agosto avendo queste terminato il loro ciclo di sviluppo. Il 27 luglio nella serra bioclimatica, e contemporaneamente anche sul tetto verde, sono stati inseriti 4 vasi di sedano che sono stati monitorati insieme alle altre piante fino al termine della sperimentazione e tre, dei sei, vasi di pomodoro sono stati spostati dalla serra bioclimatica sul tetto verde. Le date di presenza/assenza delle specie vegetali nella serra bioclimatica si possono dedurre dalla Tabella 16.

In Tabella 17, è riportata la quantità di acqua totale evapotraspirata in serra bioclimatica da ciascuna specie, tenendo in considerazione il numero dei vasi presenti nella serra (vedi 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 19 luglio, 12,19 Kg di acqua evapotraspirata nel corso delle 6 ore di osservazione. La ET ottenuta nel 2021 confrontata a quella ottenuta durante la sperimentazione eseguita nel corso del 2020, dimostra, nelle condizioni sperimentate, una capacità evapotraspirativa del sistema vegetale maggiore durante il 2021 (valore massimo: 2kg ET/h) rispetto al 2020 (valore massimo: 1,49 kg ET/h, vedi [5]). In Tabella 18, si riporta un confronto, tra il monitoraggio del 2020 e del 2021, della quantità massima di acqua mediamente evapotraspirata da ciascuna specie vegetale.

Tabella 17. Acqua evapotraspirata dal “sistema verde” nella serra bioclimatica in un tempo di 6 ore nelle giornate indicate

	Quantità di acqua ET (kg) per specie in serra bioclimatica																	
	08-lug	09-lug	13-lug	14-lug	19-lug	20-lug	27-lug	03-ago	04-ago	13-ago	25-ago	31-ago	01-set	08-set	15-set	20-set	04-ott	06-ott
Sedano	-	-	-	-	-	-	0,98	1,06	1,17	1,76	1,30	1,40	1,44	1,17	1,23	0,94	0,76	0,16
Lattuga	1,98	2,40	1,10	2,12	2,86	2,70	1,04	1,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pomodoro	2,26	3,27	1,84	3,74	5,76	4,74	2,56*	3,06*	3,36*	2,80*	1,52*	1,54*	1,56*	0,90*	0,82*	0,78*	0,86*	0,30*
Vite	1,24	0,78	0,78	1,86	1,84	1,68	1,32	1,92	2,96	2,22	1,86	1,98	2,18	2,18	1,70	1,64	0,74	0,30
peperone	1,04	1,20	0,60	1,04	1,66	1,22	1,42	1,24	1,34	2,10	0,88	1,06	0,94	1,02	0,72	0,47	0,66	0,40
Totale (kg)	6,52	7,65	4,32	8,76	12,12	10,34	7,32	8,46	8,83	8,88	5,56	5,98	6,12	5,27	4,47	3,83	3,02	1,16

Note: * dal 27 luglio 2021 nella serra bioclimatica le piante di pomodoro sono n.3 invece che n.6 (tre vasi di pomodoro sono stati trasferiti sul Tetto Verde)

Tabella 18 . Confronto tra il monitoraggio del 2020 e 2021 della quantità massima di acqua mediamente evapotraspirata da ciascuna pianta

Massima quantità di acqua ET (kg) da ciascuna pianta in serra bioclimatica		
	anno 2021	anno 2020
Sedano	0.44	0.29
Lattuga	0.48	0.27
Pomodoro	1.12	0.39
Vite	0.99	0.57
peperone	1.05	-

4.5 Influenza del processo biologico di ET del sistema verde nei confronti del microclima della serra

Per esaminare l'Influenza del processo naturale di ET, del sistema verde, nei confronti del microclima della serra, si riportano di seguito gli andamenti delle temperature registrate nelle giornate in cui veniva monitorata l'ET del sistema verde nella serra, ossia nei giorni in cui le piante venivano irrigate fino al raggiungimento della loro capacità di campo consentendo di ottenere un elevato potenziale evapotraspirativo e quindi di svolgere al meglio la funzione termoregolatrice nella serra.

Nella Figura 67, si riportano gli andamenti delle temperature dell'aria registrate all'interno della serra ed all'esterno nei giorni in cui veniva effettuato il monitoraggio dell'ET, tra le 11:00 e le 17:00, nel periodo compreso tra l'8 luglio e il 26 luglio, all'interno della serra senza ombreggianti e con le finestrate parzialmente aperte; mentre nella Figura 68, si riportano gli andamenti delle temperature nel periodo compreso tra il 27 luglio ed il 6 ottobre cioè quando nella serra sono stati abbassati gli oscuranti (serra ombreggiata) per rendere il microclima all'interno della serra più fresco, e accese le luci LED, con il fine di migliorare l'illuminazione a disposizione del processo fotosintetico delle piante nella serra ombreggiata.

I dati mostrano che:

- *nella serra non ombreggiata*, la temperatura dell'aria interna alla serra risulta nella maggior parte della giornata più elevata rispetto alla temperatura dell'aria esterna, con differenze interno-esterno comprese tra $\Delta T = 0,33^\circ\text{C}$ e $\Delta T = 4,8^\circ\text{C}$, e picchi massimi tra le 14:00 e le 16:00.

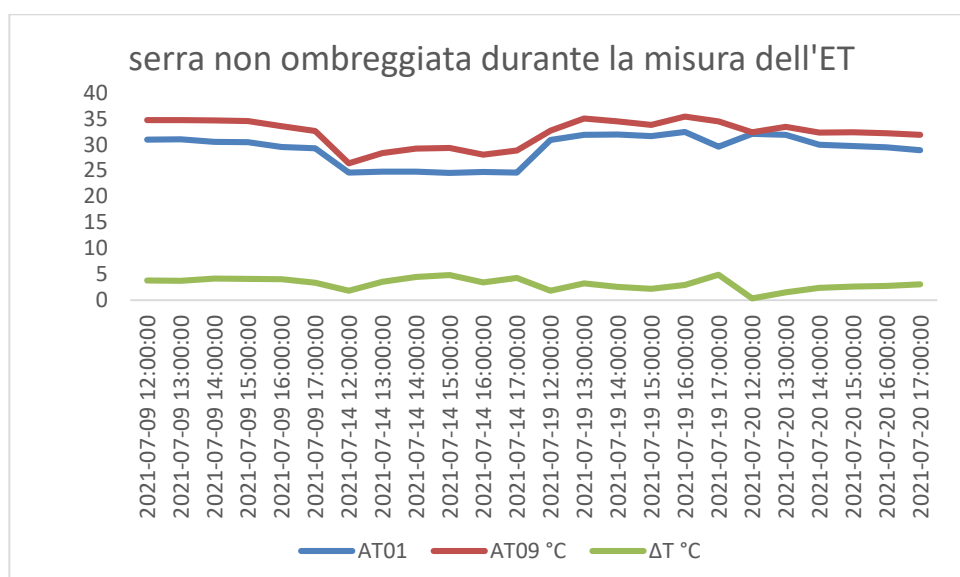


Figura 67. Serra bioclimatica con la vegetazione in assenza degli oscuranti

- *nella serra ombreggiata*, la differenza di temperatura dell'aria tra interno/esterno alla serra varia tra $\Delta T = -4^\circ\text{C}$ e $\Delta T = +1,6^\circ\text{C}$. Il 27 luglio è stata la giornata in cui nella serra la temperatura dell'aria è stata 4°C al di sotto di quella esterna (alle ore 12:00 all'interno della serra c'erano $29,15^\circ\text{C}$ quando all'esterno c'erano $33,22^\circ\text{C}$ ($\Delta T = -4^\circ\text{C}$); il 25 agosto è la giornata in cui nella serra la temperatura dell'aria ha superato di $1,6^\circ\text{C}$ la temperatura esterna, infatti alle ore 15:00 all'interno della serra la temperatura era $29,12^\circ\text{C}$ mentre all'esterno era $27,49^\circ\text{C}$ ($\Delta T = +1,6^\circ\text{C}$);

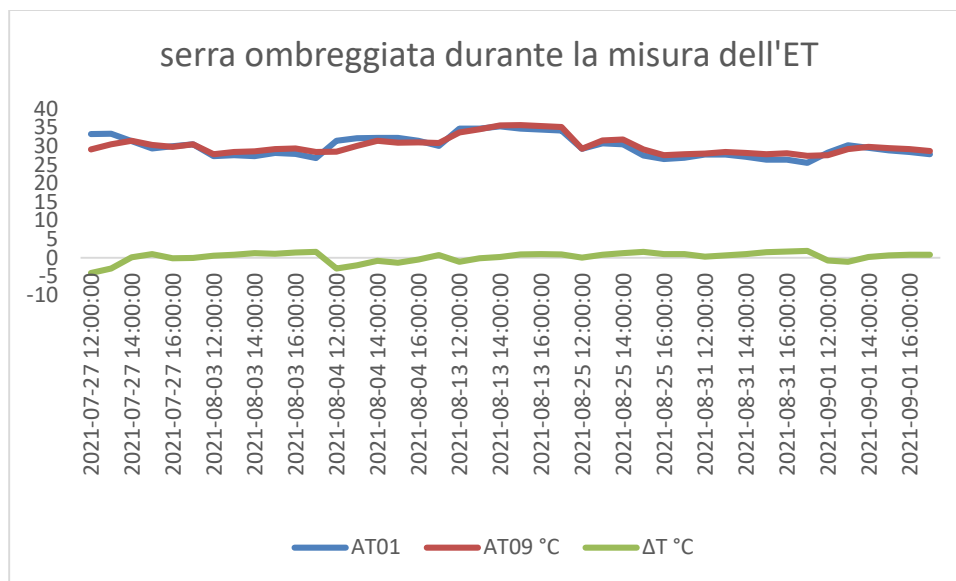


Figura 68. Serra bioclimatica con la vegetazione, oscuranti abbassati e luci LED accese

4.6 Efficienza di assorbimento della radiazione luminosa da parte del sistema vegetale

Per calcolare quanto l'evapotraspirazione delle piante possa contribuire a migliorare il microclima interno alla serra intercettando la radiazione luminosa, di seguito si riporta l'andamento della temperatura interna ed esterna alla serra in una giornata in cui si è ottenuta la massima ET con gli ombreggianti chiusi e una giornata in cui la massima ET è stata ottenuta con gli ombreggianti aperti e le luci a LED accese. Come mostrato in Tabella 10, l'ET massima ottenuta nelle condizioni di illuminazione solare (serra non ombreggiata dalle tende oscuranti), durante le 6 h di sperimentazione, è stata di 2 kg ET/h e si è verificata nella giornata del 19 luglio 2021 e questa rappresenta anche la massima ET ottenuta nell'intero periodo di osservazione. Mentre, nella serra con gli oscuranti abbassati e le luci a LED accese l'evapotraspirazione massima si è verificata nel periodo compreso tra il 3 agosto ed il 13 agosto. In Figura 69 sono riportate le foto scattate nella serra nelle due diverse situazioni: ombreggianti chiusi (19 luglio) e ombreggianti aperti e luci a LED accese (4 agosto).



Figura 69. A sinistra, la serra bioclimatica è senza ombreggianti (19 luglio 2021); a destra, la serra è ombreggiata con le tende oscuranti e le luci a LED sono accese (4 agosto 2021). In entrambe le giornate le finestre sono parzialmente aperte

Considerando 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, per fare evapotraspirare 2 kg di acqua/h che corrispondono a 0,24 kg ET/m²/h è rapportabile ad una potenza media pari a 0,17 kW/mq. Dunque, 170 Watt/mq è l'irraggiamento stimato utilizzato dal sistema verde nelle 6 h di osservazione per il processo di ET nella giornata del 19 luglio.

Nel periodo tra il 3 agosto ed il 13 agosto, l'ET nella serra è oscillata tra 1,41 kg ET/h e 1,48 kg ET/h corrispondenti a 0,17 kg ET/m²/h che sono rapportabili a una potenza media pari a 0,12 kW/mq (Tabella 19).

Tabella 19. Irraggiamento assorbito [kW/m²] dal sistema vegetale nella serra bioclimatica

Irraggiamento assorbito [kW/m ²] dal sistema vegetale nella serra bioclimatica																		
	08-lug	09-lug	13-lug	14-lug	19-lug	20-lug	27-lug	03-ago	04-ago	13-ago	25-ago	31-ago	01-set	08-set	15-set	20-set	04-ott	06-ott
ET (kg) totale del sistema vegetale	6,52	7,65	4,32	8,76	12,12	10,34	7,32	8,46	8,83	8,88	5,56	5,98	6,12	5,27	4,47	3,83	3,02	1,16
kg ET/h	1,09	1,28	0,72	1,46	2,02	1,72	1,22	1,41	1,47	1,48	0,93	1,00	1,02	0,88	0,75	0,64	0,50	0,19
kg ET/m ² /h	0,13	0,15	0,08	0,17	0,24	0,20	0,14	0,17	0,17	0,17	0,11	0,12	0,12	0,10	0,09	0,08	0,06	0,02
Irraggiamento assorbito [kW/m ²]	0,09	0,10	0,06	0,12	0,17	0,14	0,10	0,12	0,12	0,12	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,02

L'irraggiamento totale a disposizione del sistema verde in queste giornate è riportato di seguito:

- *nella serra non ombreggiata* (19 luglio), la potenza solare media incidente e trasmessa alle piante è stata di circa 670 W/mq, media nelle 6 ore di monitoraggio (Figura 70); pertanto, la presenza del sistema verde ha assorbito il 25 % della potenza solare incidente, generando un carico termico latente anziché sensibile.

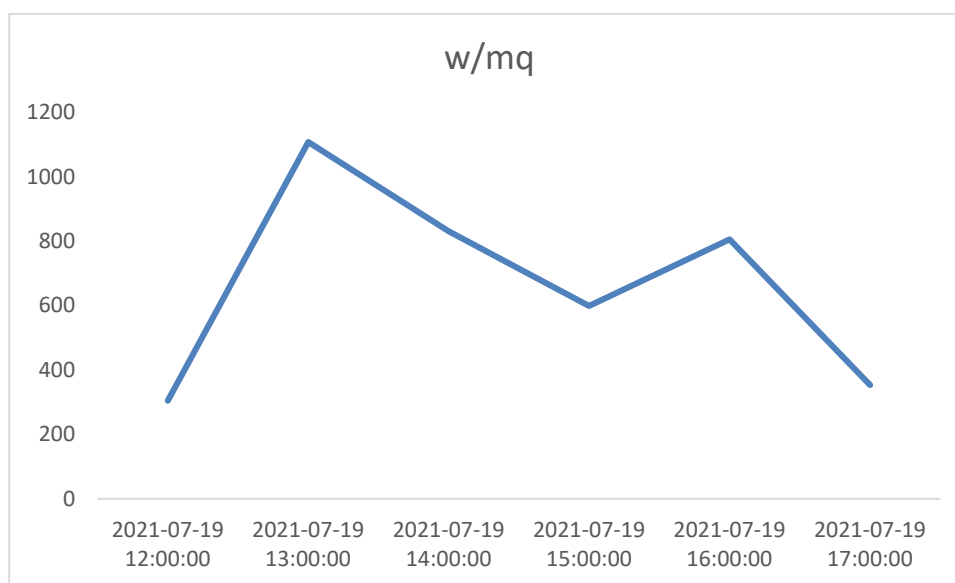


Figura 70. Potenza solare incidente e trasmessa alle piante il 19 luglio 2021

La temperatura dell'aria interna alla serra ha mostrato valori sempre maggiori rispetto alla temperatura dell'aria misurata all'esterno della serra, con differenze che oscillano tra 2°C e 4,9°C, durante le 6 h di osservazione (Figura 71). La massima differenza di temperatura si è registrata alle ore 17:00 ed è stata di 4,87°C.

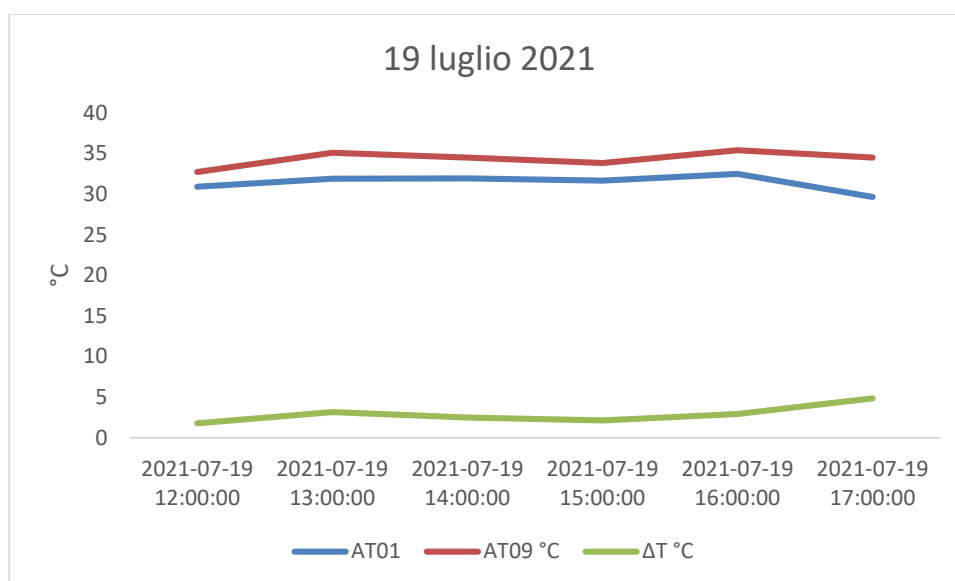


Figura 71. Differenze delle temperature dell'aria tra l'interno (AT09) e l'esterno (AT01) della serra bioclimatica senza ombreggianti il giorno 19 luglio (B)

- *nella serra ombreggiata* dalle tende oscuranti, la cui illuminazione è stata integrata con le luci a LED, la potenza media di luce è stata pari a 151 W/mq (Figura 72), media nelle 6 ore di monitoraggio; quindi, in questo caso, rispetto alla situazione precedente, la presenza del sistema verde ha assorbito circa l'80 % della potenza luminosa incidente.

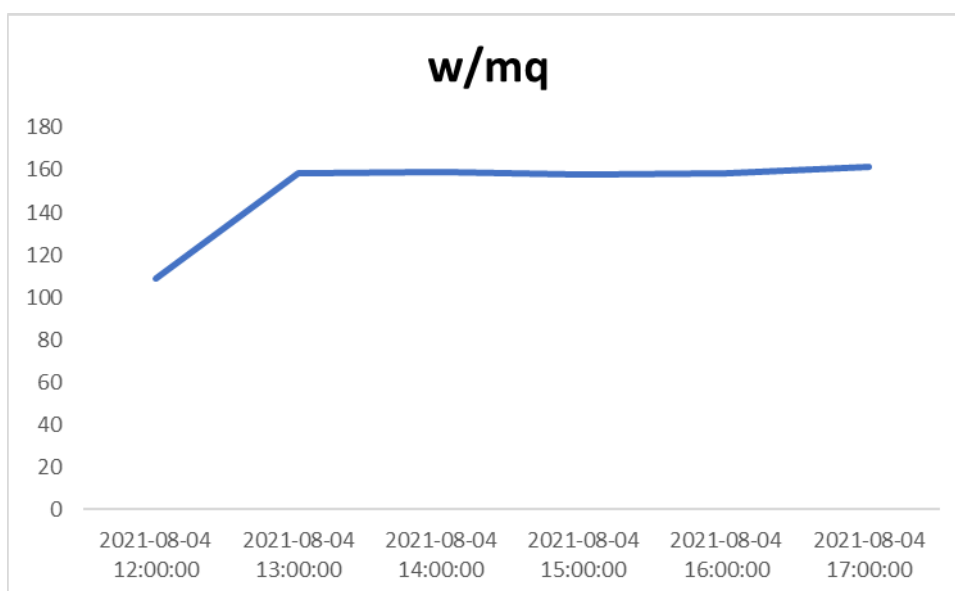


Figura 72. Potenza luminosa incidente e trasmessa alle piante il 4 agosto 2021 nella serra con le luci a LED accese

In questo caso, rispetto al 19 luglio, la temperatura dell'aria interna alla serra ha mostrato, durante le 6 h di osservazione, valori inferiori o uguali alla temperatura dell'aria misurata all'esterno della serra (Figura 73). La massima differenza di temperatura è stata registrata alle ore 12:00, quando nella serra la temperatura dell'aria era di 28,5°C e all'esterno era di 31,4 °C, facendo registrare un $\Delta T = -3^{\circ}\text{C}$ tra interno/esterno della serra. Anche

nelle ore più calde della giornata la serra si è mantenuta a temperature più basse rispetto all'esterno, infatti alle ore 15:00 la temperatura dell'aria esterna era 32,25°C mentre all'interno della serra era 30,89°C, $\Delta T = -1,36$ °C.

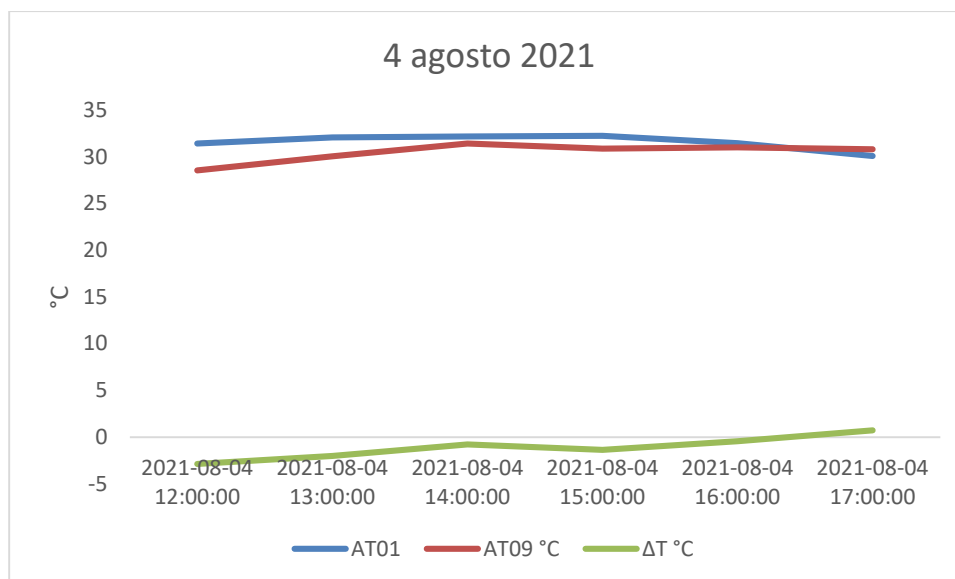


Figura 73. Differenze delle temperature dell'aria tra l'interno (AT09) e l'esterno (AT01) della serra bioclimatica con gli ombreggianti aperti (serra ombreggiata) e illuminazione a luce LED, il giorno 4 agosto 2021

4.7 Valutazione dei parametri microclimatici in relazione ai periodi di chiusura/apertura dei serramenti e del sistema di ombreggiamento nel periodo estivo, con e senza vegetazione

Regolazione aperture/chiusure finestre nella serra non ombreggiata e **senza piante**

- **Finestre chiuse** (Figura 74). Nel periodo di osservazione, tra le 14:00 e le 20:00 si registra una temperatura dell'aria interna alla serra sempre maggiore rispetto alla temperatura dell'aria esterna, con differenze interno/esterno che oscillano in media dai 14°C ai 16°C ed in alcuni casi arrivano anche a 18°C (es. il 19 maggio alle ore 18:00 la temperatura interna alla serra era 36,91°C mentre quella esterna era di 18,68°C).

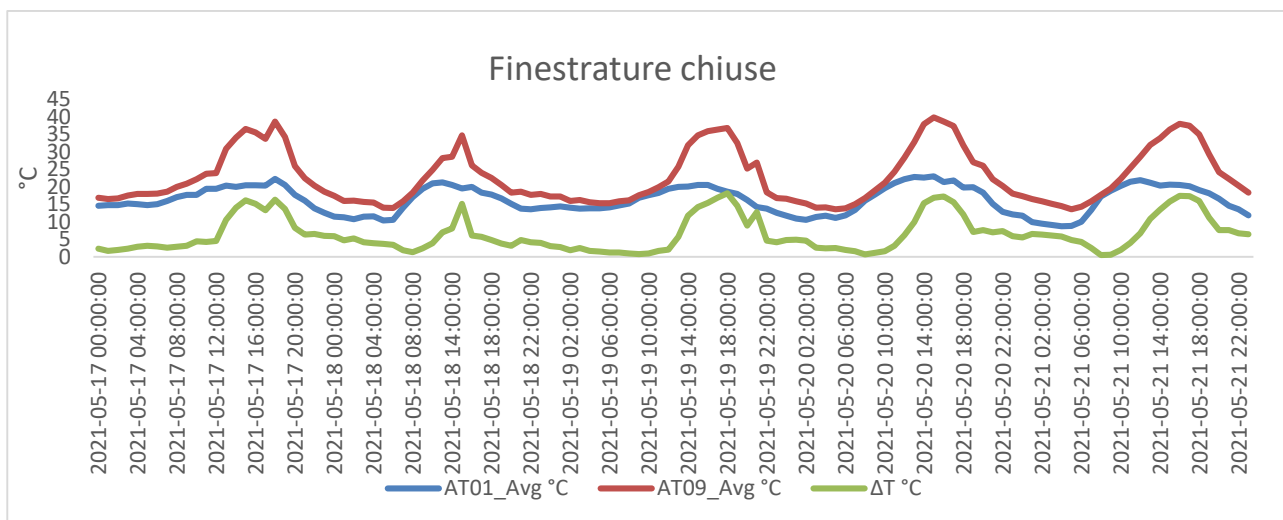


Figura 74. Finestre chiuse, tende chiuse (non ombreggianti) e senza piante. La finestra di collegamento con la stanza adiacente è chiusa. (AT01 =temperatura tetto, AT09= temperatura serra, AT10= temperatura stanza adiacente). Dati 2021

Gli andamenti osservati nel 2021 confermano quelli registrati nel 2020 come evidenziato in Figura 75 in cui si riporta l'andamento delle differenze di temperatura dell'aria tra interno della serra ed esterno tra i due anni. Il confronto riguarda i monitoraggi delle giornate del 6 luglio 2020 e del 17 maggio 2021 in cui si osservano, tra le 14:00 e le 20:00, differenze interno/esterno di circa 16°C.

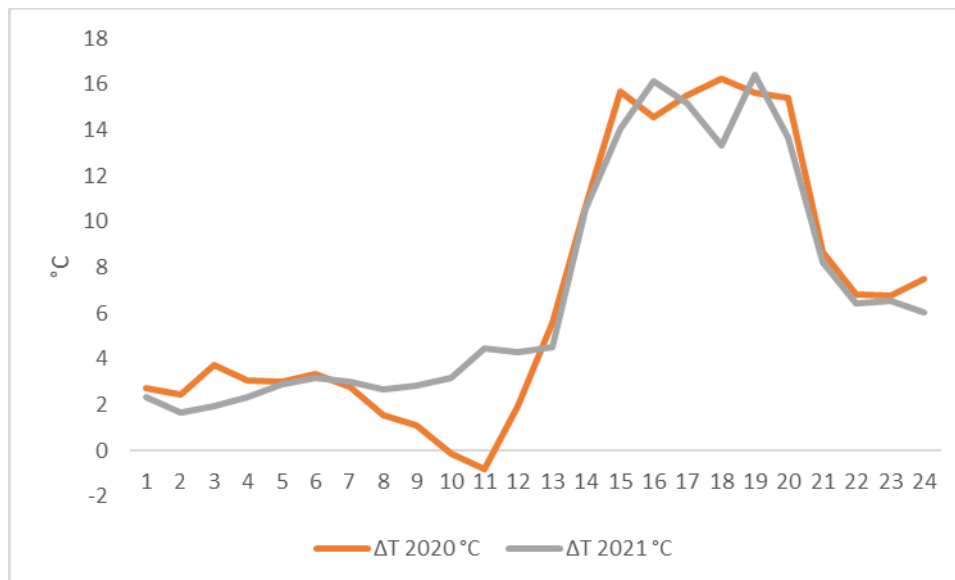


Figura 75. Confronto 2020/2021 tra le differenze di temperatura dell'aria interno/esterno serra, in condizione di finestre chiuse, tende chiuse (non ombreggianti) e senza piante. La finestra di collegamento con la stanza adiacente è chiusa. ($\Delta T = AT_{09} - AT_{01}$ dove AT_{01} =temperatura dell'aria esterna alla serra, AT_{09} = temperatura dell'aria nella serra.

- **Finestre aperte** (Figura 76). Nel periodo di osservazione si osserva una temperatura dell'aria interna alla serra sempre maggiore della temperatura dell'aria esterna, con differenze costanti, di circa 4,5-5°C nell'arco delle 24h. Gli andamenti misurati il 16 maggio 2021 mostrano che la massima differenza di temperatura è stata di 5,3 °C alle ore 12:00 e alle ore 20:00.

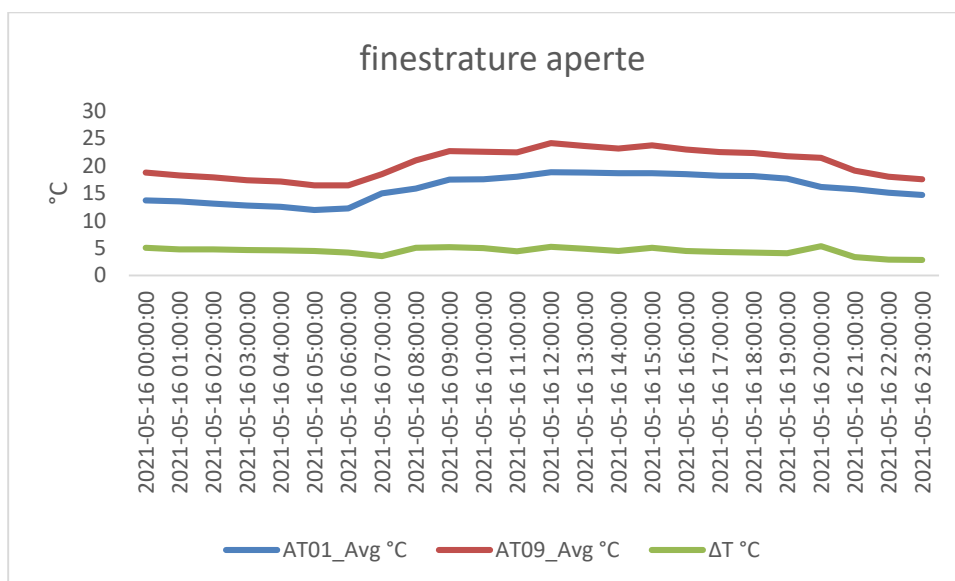


Figura 76. Finestre aperte, tende chiuse (non ombreggianti) e senza piante. La finestra di collegamento con la stanza adiacente è chiusa. (AT_{01} =temperatura tetto, AT_{09} = temperatura serra, AT_{10} = temperatura stanza adiacente). Dati 2021

Regolazione della chiusura/apertura degli ombreggianti **con le piante e finestre aperte**

- **Tende ombreggianti alzate (serra non ombreggiata).** Come descritto in precedenza (Figura 67) nella condizione di serra non ombreggiata ma con le finestre aperte la temperatura dell'aria all'interno della serra rimane di qualche grado più alta di quella all'esterno. Nel grafico riportato di seguito si vede però che queste differenze di temperatura tra l'interno e l'esterno della serra sembrano essere dipendenti dallo stadio di crescita della pianta. Infatti, si osservano minori differenze tra la temperatura dell'aria interna alla serra e quella esterna nelle giornate del 20-21-22 luglio paragonate alle differenze riscontrate durante le giornate del 9 e 14 luglio quando le piante sono più giovani. In particolare, a fine luglio le differenze si mantengono contenute entro massimo 3 °C (dalle 11:00 alle 17:00) rispetto a quanto osservato nelle giornate del 9 e 14 luglio in cui le differenze sono anche di 4.8°C tra interno/esterno della serra (Figura 77).

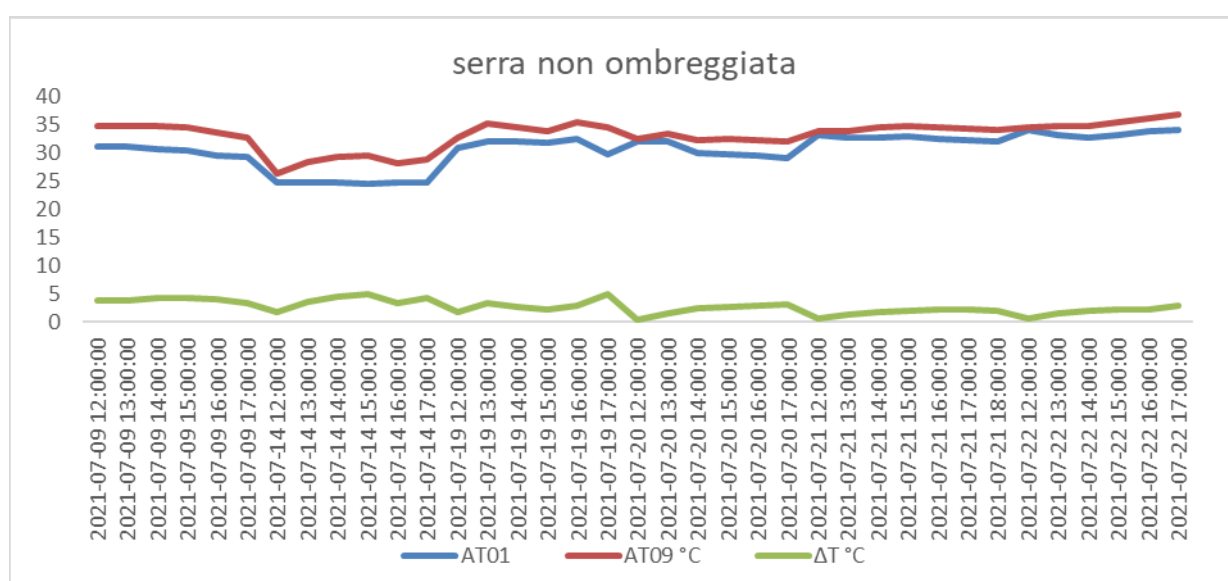


Figura 77. In alto: Serra bioclimatica in assenza degli oscuranti. In basso: Andamento delle temperature dell'aria all'interno della serra (AT09) e all'esterno della serra bioclimatica (AT01), durante l'estate del 2021.

- **Tende ombreggianti abbassate (serra ombreggiata).** Nel corso del 2021, l'integrazione nella serra dell'illuminazione a LED ha consentito di abbassare gli oscuranti fino a toccare il davanzale (**Figura 78** in alto a dx) e questo ha permesso un ulteriore contenimento delle temperature interne rispetto a quanto ottenuto nel corso del 2020 in cui gli oscuranti non coprivano completamente le finestre lato ovest (**Figura 78** in alto a sx). Infatti, come descritto in precedenza, l'abbassamento delle tende fino al davanzale ha consentito di contenere la temperatura interna alla serra con differenze di temperatura dell'aria tra interno/esterno variabili tra $\Delta T = -4^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T = +1,6^{\circ}\text{C}$ nelle ore di osservazione tra le 12:00 e le 17:00 (**Figura 68**) pertanto questa risulta essere la situazione più favorevole, in termini termici, all'uso della serra nel periodo estivo.

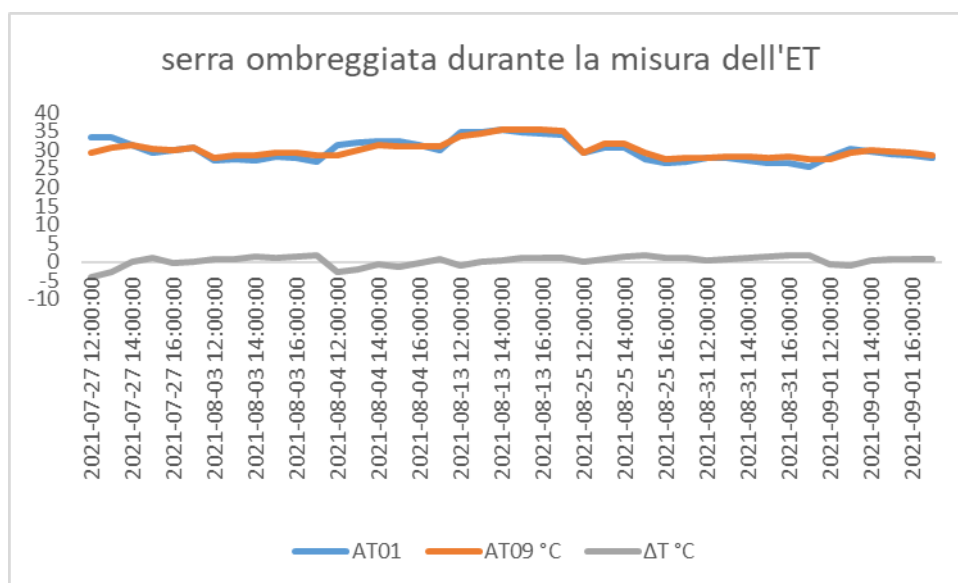
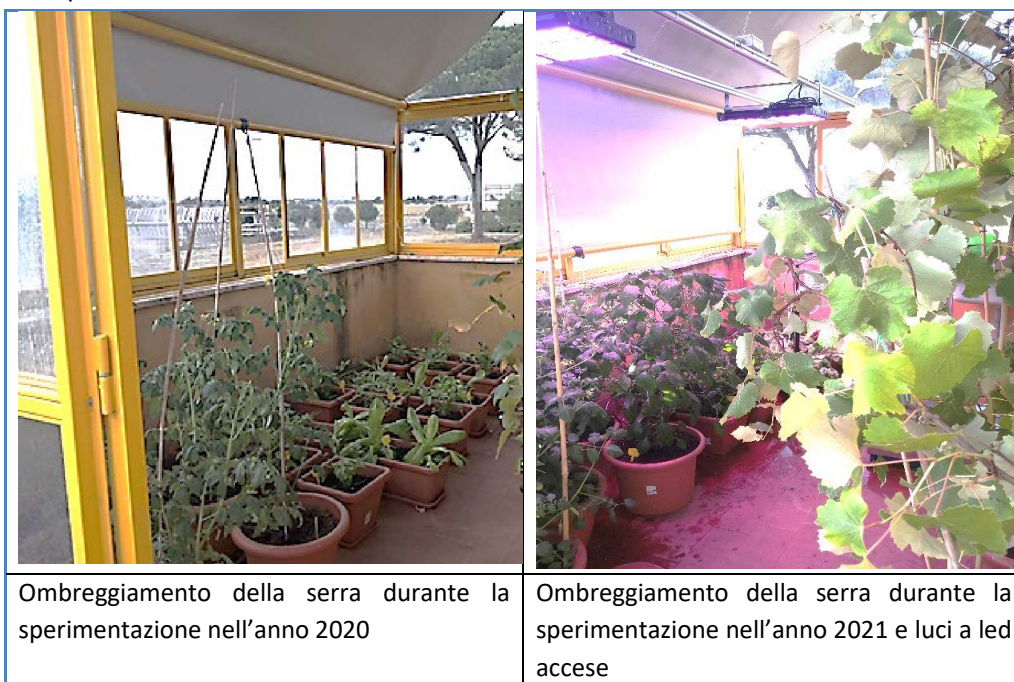


Figura 78. In alto: Serra bioclimatica con gli oscuranti abbassati nel 2020 e nel 2021. In basso: è riportato il grafico di **Figura 68** sull'andamento delle temperature dell'aria all'interno della serra (AT09) e all'esterno della serra bioclimatica (AT01), durante l'estate del 2021.

In conclusione, la serra ha per sua natura una temperatura dell'aria interna maggiore di quella esterna, nell'estate del 2021 queste differenze hanno oscillato tra 14 e 18°C, confermando i dati del 2020. La sola apertura delle finestrate, per favorire la ventilazione, riduce queste differenze a circa 4,5-5 °C. L'introduzione della vegetazione riduce ulteriormente queste differenze portandole, in determinati momenti della giornata, quasi ad annullarle, il 20 luglio, ad esempio, alle ore 12:00 la differenza di temperatura era $\Delta T=0,3^{\circ}\text{C}$ (vedi Figura 67). L'introduzione del sistema di illuminazione a LED e l'abbassamento totale degli oscuranti ha consentito di ribaltare la differenza di temperatura dell'aria tra interno ed esterno della serra portandola fino a 4°C al di sotto di quella esterna ($\Delta T=-4^{\circ}\text{C}$).

4.8 Studio dello scambio convettivo tra l'ambiente serra e l'ambiente interno della stanza adiacente, dovuti alla presenza del sistema verde, nel periodo estivo

Nella serra bioclimatica durante il mese di luglio, in presenza delle finestrate aperte, sono state fatte sperimentazioni di chiusura/apertura della finestra di collegamento tra la serra, senza e con gli ombreggianti, e la stanza adiacente, nei seguenti periodi:

- dal 15 luglio al 18 luglio 2021, nella serra senza gli ombreggianti e la finestra di collegamento tra la serra e la stanza adiacente mantenuta chiusa. In queste condizioni sperimentali si osserva che la temperatura dell'aria nella stanza adiacente alla serra rimane costante durante le 24h con valori intorno ai 27°C (Figura 79, A).
- dal 20 luglio al 26 luglio, nella serra senza gli ombreggianti e la finestra di collegamento tra la serra e la stanza adiacente aperta (Figura 79, B);
- dal 27 luglio fino al 6 ottobre, nella serra con gli ombreggianti abbassati e le luci a LED accese e la finestra di collegamento tra la serra e la stanza adiacente aperta (Figura 79, C).

Gli andamenti riportati nelle Figura 79 B e Figura 79 C mostrano che quando la serra è messa in comunicazione con l'ambiente interno essa permette un apporto termico positivo all'interno della stanza con un andamento notte/giorno simile a quello che viene registrato nella serra ed all'esterno ma con temperature che nelle ore estive più calde rimangono circa 2°C al di sotto di quelle all'interno della serra e simili a quelle esterne; di notte, invece, le temperature rimangono più alte di quelle nella serra ed esterne. L'utilizzo degli oscuranti consente di abbassare la temperatura all'interno della serra di qualche grado rispetto all'esterno come già visto in Figura 68 e questo si riflette anche all'interno della stanza in cui le temperature si abbassano rispetto alla temperatura esterna. Ad esempio, il 28 luglio alle ore 15:00 la temperatura dell'aria esterna era 33,86°C, mentre all'interno della serra era 31,96 °C e nella stanza adiacente 29,58°C. Durante la notte (circa dalle 20:00-21:00 e fino alle 5:00-6:00) la temperatura all'interno della stanza adiacente alla serra rimane sempre più alta sia della temperatura dell'aria nella serra che di quella all'esterno, ma le differenze sono inferiori se la finestra di collegamento è aperta e la serra è ombreggiata rispetto a quando la finestra è chiusa e la serra non ombreggiata.

In conclusione, i risultati del 2020 e del 2021 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.

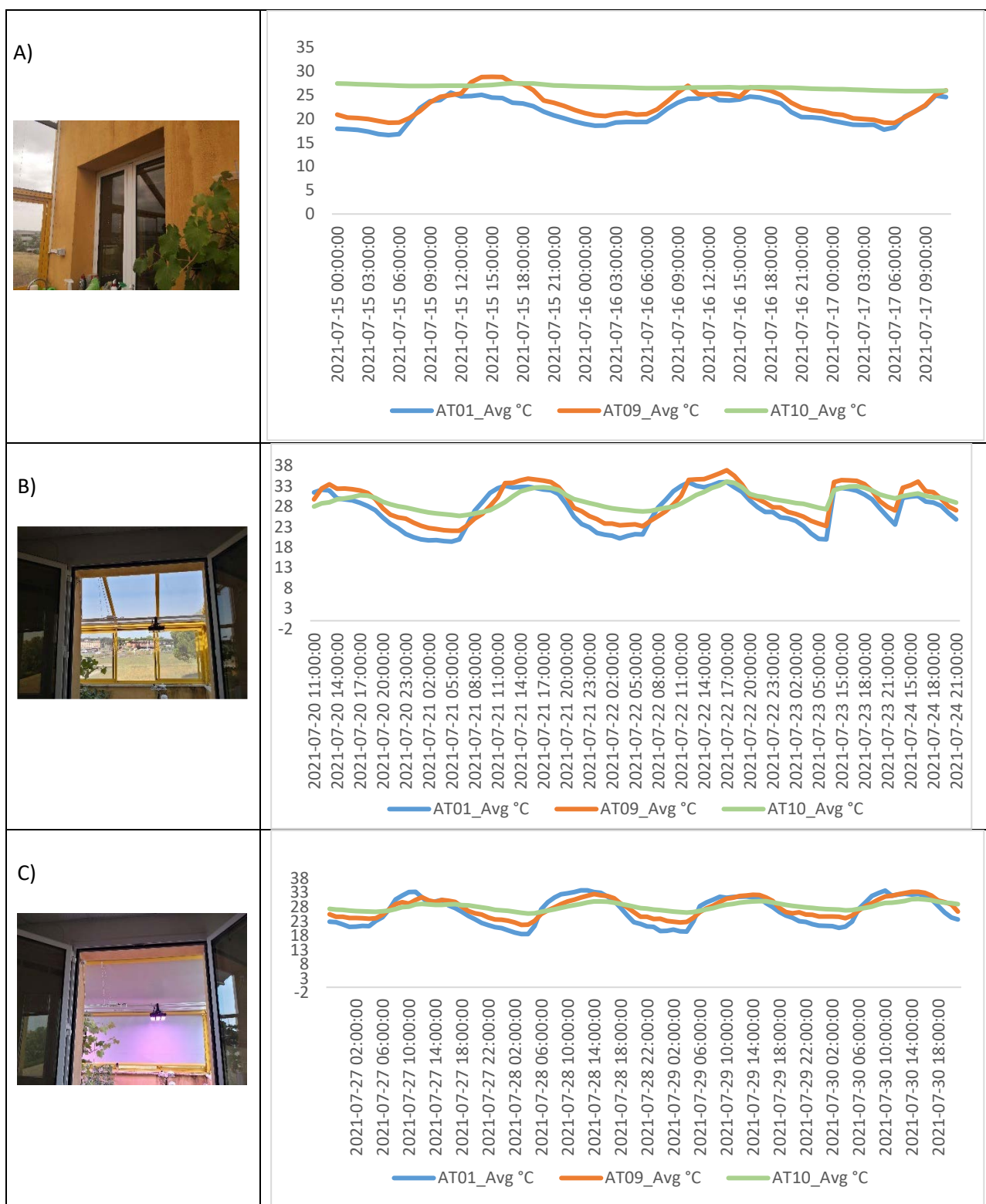


Figura 79. Andamento delle temperature dell'aria all'interno della serra (AT09), all'esterno della serra bioclimatica (AT01) e nella stanza adiacente la serra (AT10) durante l'estate del 2021. A) la finestra di collegamento, tra la serra non ombreggiata e la stanza adiacente è chiusa; B) la finestra di collegamento, tra la serra non ombreggiata e la stanza adiacente è aperta; C) la finestra di collegamento è aperta e la serra ombreggiata.

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

5.1 Premessa

Le attività del 2019 - 2020, LA 1.1 - LA 2.1 e LA 1.3 - LA 2.3 rispettivamente [5] [21], hanno riguardato sia lo stato dell'arte sull'utilizzo del telerilevamento in generale (*remote sensing*) e del telerilevamento in particolare (*TIR*) nella valutazione dei benefici apportati dalle infrastrutture verdi nell'ottica di apportare miglioramenti ai parametri ambientali delle aree urbane (Figura 86) [43] [44], sia lo studio delle principali piattaforme di condivisione gratuite di immagini satellitari, esplorandone le risoluzioni spaziali (area minima registrabile sul terreno, Figura 80 e Figura 81) [45], radiometriche (minima differenza di intensità di radiazione elettromagnetica rilevabile, Figura 82) [45], spettrali (sensibilità alle diverse lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico, Figura 83, Figura 84, Figura 85) [46] e temporali (tempo intercorrente tra rilevamenti successivi della stessa area); successivamente si è iniziata la raccolta di scene satellitari di interesse.



Figura 80. Immagini *Landsat 7* (a sinistra, risoluzione spaziale a 30 m) e *Quickbird* (a destra, risoluzione spaziale a 2.62 m).

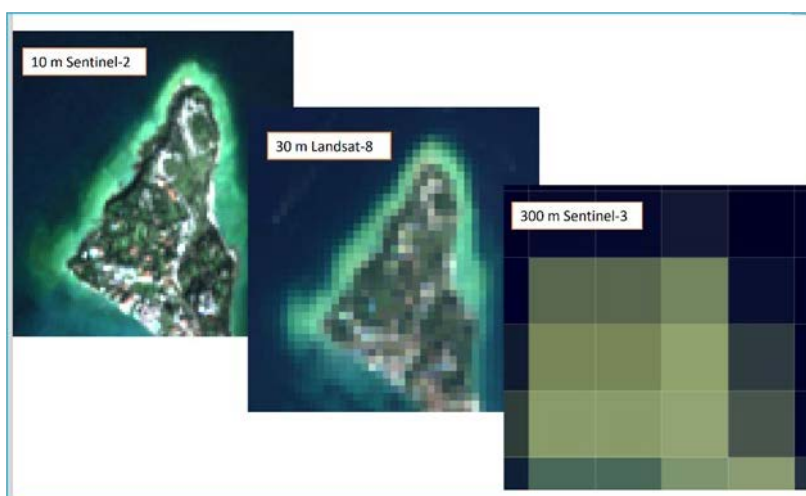


Figura 81. Risoluzioni spaziali a confronto per i sensori più utilizzati.

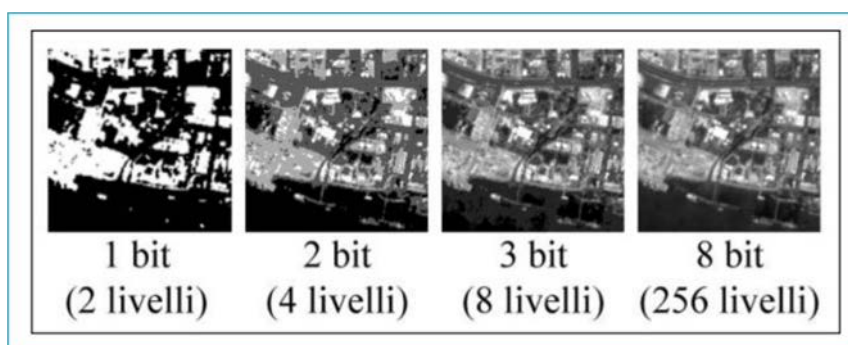


Figura 82. Esempio di varie risoluzioni radiometriche con dettagli differenti.

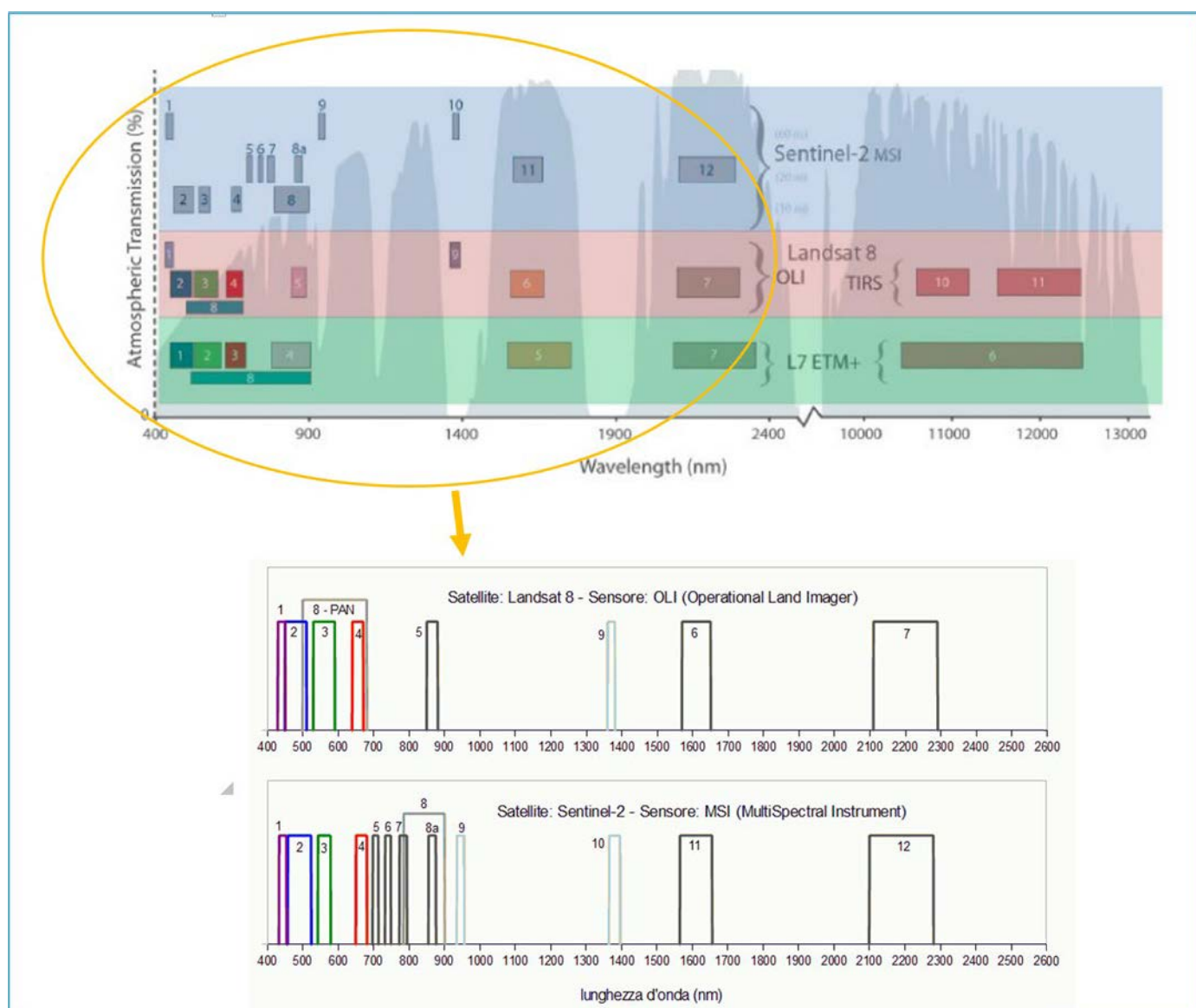


Figura 83. Comparazione tra diversi sensori (*ETM + della missione Landsat 7, OLI-TIRS della missione Landsat 8 e MSI della missione Sentinel-2*) per risaltare le differenze di sensibilità delle bande in base alla zona dello spettro elettromagnetico.

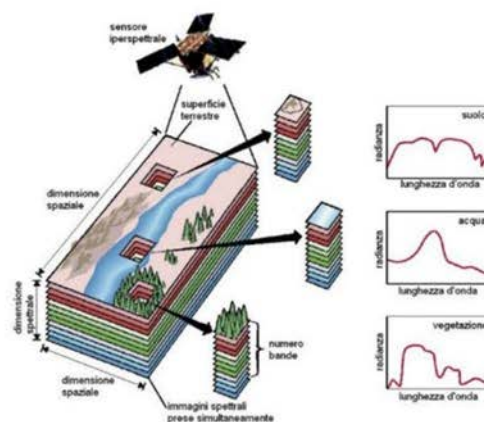
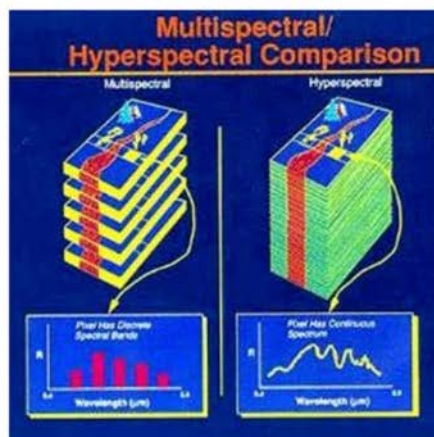


Figura 84. Confronto tra *Multispectral* e *Hyperspectral Imaging*: ogni elemento dell'immagine (*pixel*) non è costituito da un semplice valore monocromatico (immagini pancromatiche o in scala di grigio), o da una terna di valori (immagini a colori *RGB*), ma da un insieme di valori appartenenti allo spettro elettromagnetico. La distinzione è basata sul numero di bande che vengono memorizzate, e sullo spettro di frequenze rappresentato. Un'immagine iperspettrale può dunque essere considerata come un cubo di dati, costituito da tanti piani quante sono le bande che compongono lo spettro telerilevato, e di larghezza e altezza pari alle dimensioni dell'area catturata. Se ci si sposta lungo la direzione spettrale, si ottengono valori e colorazioni diverse, e se si preleva una delle bande telerilevate, si ottiene un'immagine monocromatica. Prelevando le informazioni relative ad un singolo punto dell'immagine, si ottiene lo spettro continuo di quel determinato *pixel*.

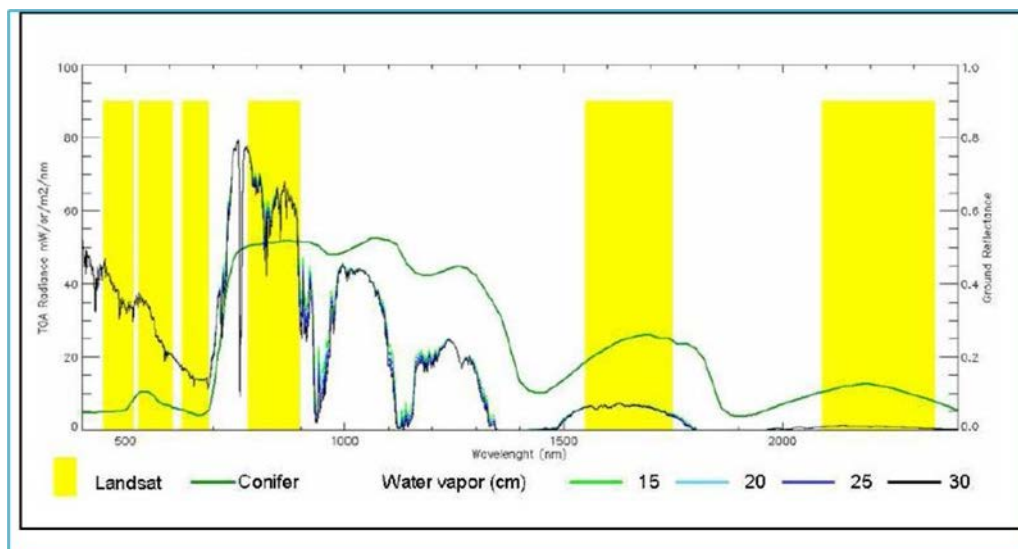


Figura 85. *PRISMA* è la prima missione iperspettrale in Europa con una tecnologia all'avanguardia nel campo dell'Osservazione della Terra: è caratterizzato da un numero di bande contigue elevato (66 *VNIR*, 171 *SWIR*) ed una larghezza di banda molto stretta (<12nm), pertanto le misure effettuate sono caratterizzate da una "firma" spettrale, che consente di rilevare, identificare e quantificare i materiali di superficie, nonché di dedurre processi biologici e chimici.

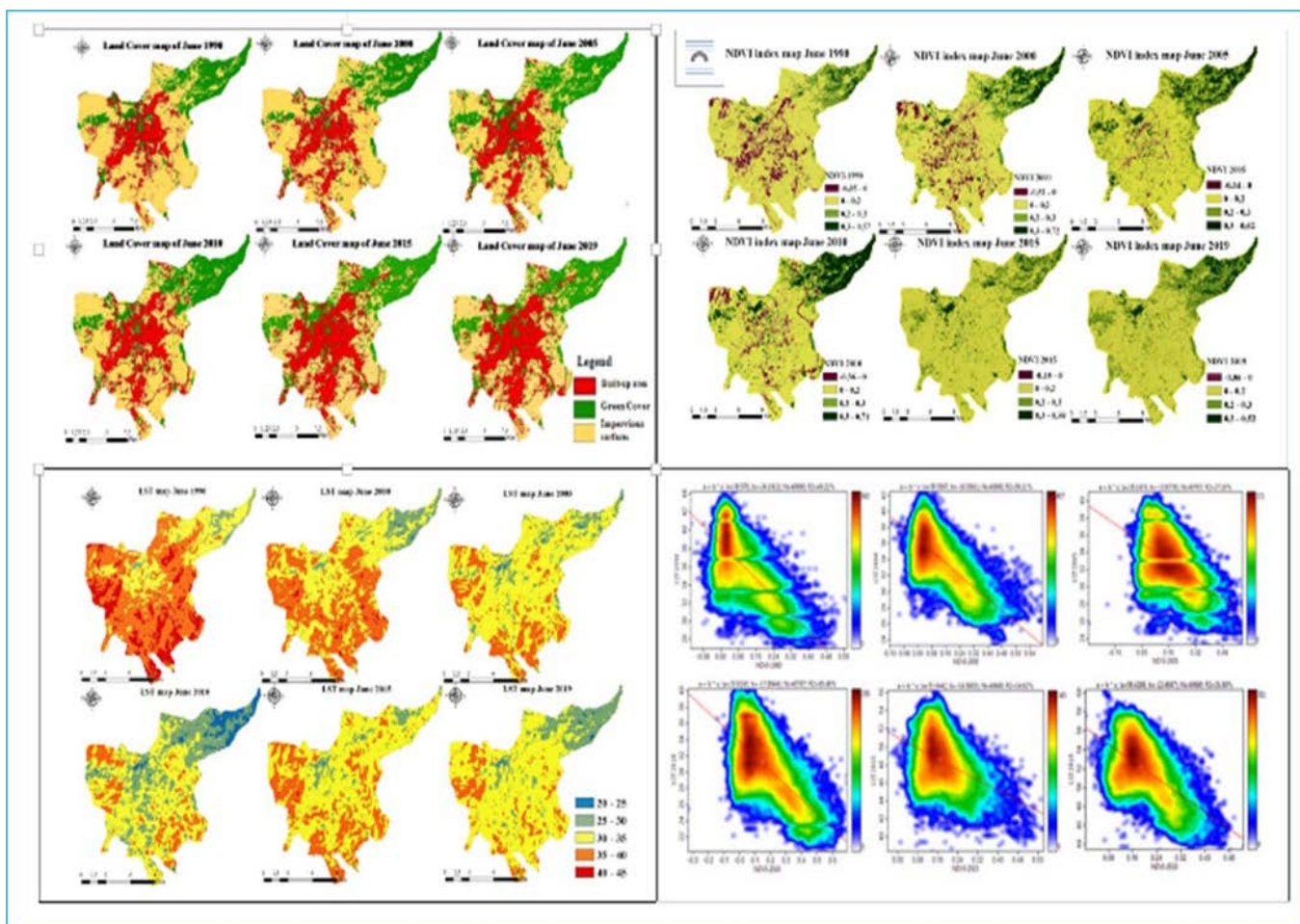


Figura 86. Lo stato dell'arte di alcuni benefici apportati dalle infrastrutture verdi ai parametri ambientali delle aree urbane: la LST (*Land Surface Temperature*) può ridursi all'aumentare delle aree di copertura a verde nel territorio urbano. Mappe tematiche di uso suolo, NDVI, LST e analisi statistica di regressione per un'area studio, *Costantine city, Algeria*, studiata dal 1990 al 2019 [43].

In merito alla LST, *Land Surface Temperature*, e della sua utilità per gli scopi della presente ricerca si è esposto nei precedenti rapporti tecnici [47]: può essere considerata come una sorta di temperatura di “pelle” ed è un importante parametro per comprendere l'ambiente termico urbano e le sue dinamiche; essa 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.

5.2 NDVI

Il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), indice di vegetazione della differenza normalizzata, deriva dall'elaborazione spettrale delle immagini trasmesse a terra dai satelliti per valutare se la zona osservata contiene della vegetazione viva.

L'NDVI sfrutta la diversa risposta della copertura vegetale alle bande spettrali del visibile (rosso) e del vicino infrarosso, e fornisce un valore numerico adimensionale, teoricamente compreso tra -1 e +1. Tale valore è stato dimostrato essere in stretta relazione con lo stato di salute della vegetazione, intesa come biomassa e area fogliare ed ai processi biochimici ad essa correlati (attività fotosintetica). La caratteristica del comportamento dei pigmenti delle foglie non sottoposte a stress è infatti quella di riflettere soltanto circa il 10% della radiazione ricevuta nella regione spettrale della luce visibile (rosso), ed allo stesso tempo di riflettere oltre il 40% di quella ricevuta nell'infrarosso vicino (Figura 87). Nelle mappe elaborate, valori bassi di NDVI si verificano in aree a bassa o assente copertura vegetale, o dove la vegetazione presente è senescente o sofferente, mentre gli alti valori dell'indice rispecchiano una situazione di forte attività fotosintetica e quindi elevata presenza di biomassa. Nella realtà osservata i valori di NDVI variano prevalentemente in un range compreso tra -0.2 e +0.6 sulle terre emerse, con i corpi d'acqua, la neve e le nubi che mostrano valori vicini allo zero o leggermente negativi (Tabella 20 e

Tabella 21).

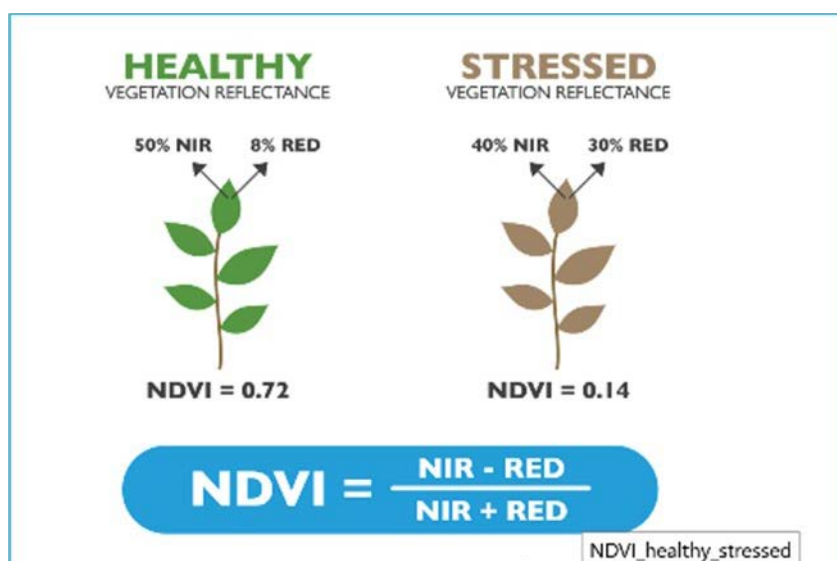


Figura 87. Principio fisico degli indici di vegetazione.

Tabella 20. NDVI Interpretazione

NDVI	INTERPRETAZIONE
<0.1	Suolo nudo o nuvole
0.1 – 0.2	Copertura vegetale quasi assente
0.2 – 0.3	Copertura vegetale molto bassa
0.3 – 0.4	Copertura vegetale bassa con vigoria bassa o copertura vegetale molto bassa con vigoria alta
0.4 – 0.5	Copertura vegetale medio-bassa con vigoria bassa o copertura vegetale molto bassa con vigoria alta
0.5 – 0.6	Copertura vegetale media con vigoria bassa o copertura vegetale medio-bassa con vigoria alta
0.6 – 0.7	Copertura vegetale medio-alta con vigoria bassa o copertura vegetale media con vigoria alta
0.7 – 0.8	Copertura vegetale alta con vigoria alta
0.8 – 0.9	Copertura vegetale molto alta con vigoria molto alta
0.9 – 1.0	Copertura vegetale totale con vigoria molto alta

Tabella 21. Valori osservabili di NDVI.

	<i>Conifère</i>	<i>Dico tylédon</i>	<i>Herbe</i>	<i>Béton</i>	<i>Sable</i>	<i>Limon</i>	<i>Argile</i>	<i>A. sèche</i>	<i>Aspha lte</i>	<i>Eau</i>	<i>Neige</i>
NDVI	0.83	0.83	0.81	0.08	0.23	0.22	0.14	0.24	0.15	0.06	0.05

5.3 Materiali selezionati e realizzazione di mappe di NDVI e di LST

Si è proseguita sul *web* la ricerca di immagini satellitari adatte allo scopo e al contesto applicativo dalle principali piattaforme di condivisione gratuite. In particolare, soffermandosi sui dati iperspettrali *PRISMA* e sui dati multispettrali *Landsat 8* comprensivi di acquisizioni nell'infrarosso termico (*TIR*).

5.3.1 Dati PRISMA

Finalmente il sensore iperspettrale della missione sperimentale *PRISMA* [48] [49] ha ripreso l'area in cui si trova il Lago di Bracciano: 4 acquisizioni nel 2021, il 20 luglio 2021, il 12 agosto 2021, il 03 ottobre 2021 e il 09 ottobre 2021. Un' acquisizione nel 2020, il 20 agosto 2020 (Figura 88 e Figura 89). La nuvolosità elevata (oltre il 90%) rende inutilizzabile l'immagine del 3 ottobre 2021 e del 20 agosto 2020.

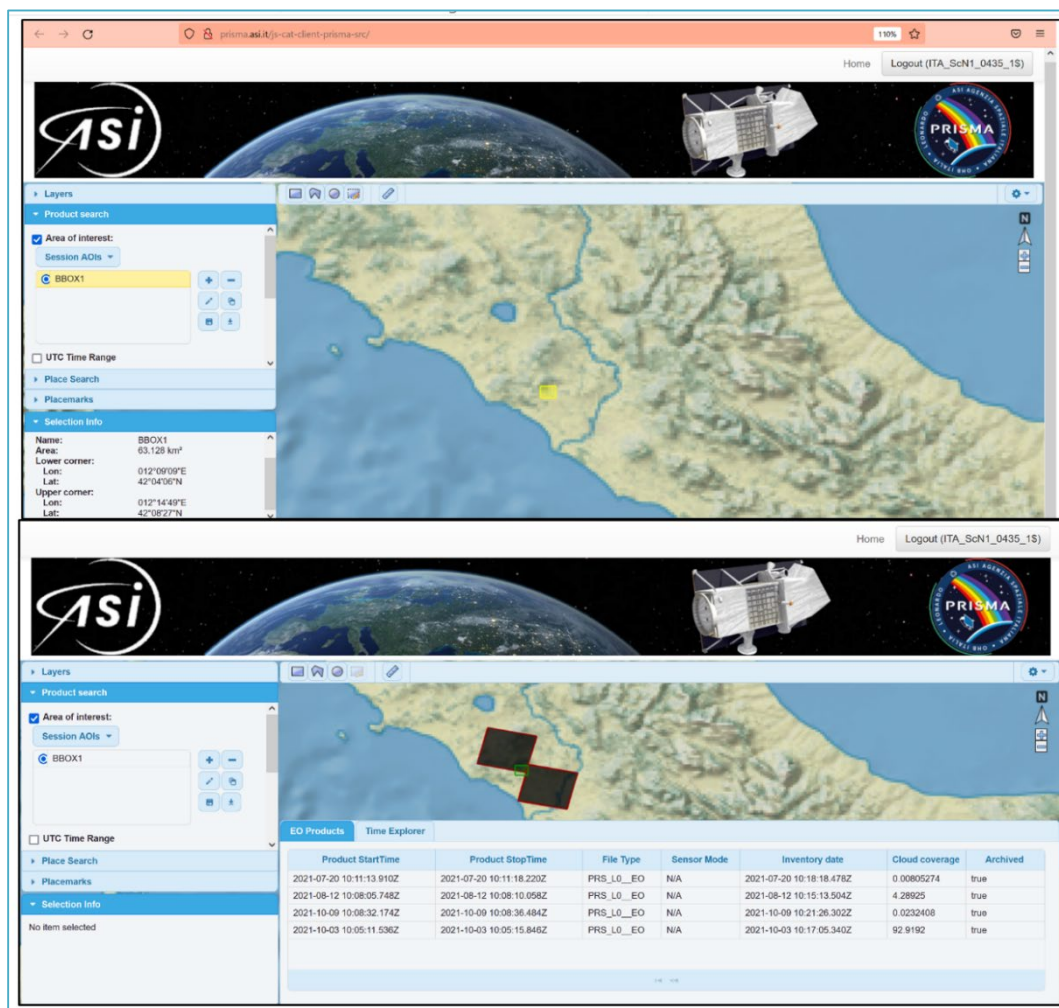


Figura 88. Maschera di ricerca web del dato iperspettrale PRISMA: area di interesse (quadrato giallo), periodo di acquisizione, tipologia di dato (livello di pre-processing), info metadati (data e ora di inizio e fine ripresa, numero di inventario, copertura nuvolosa; anteprima dell'immagine) [49].

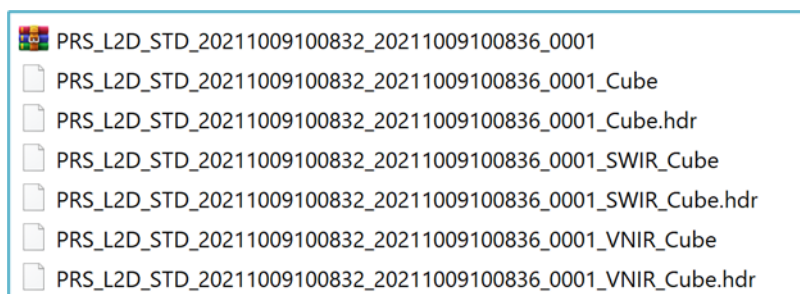


Figura 89. Struttura tipica del dato iperspettrale PRISMA.

PRISMA Mission Overview

Products

Level 0 (Hyperspectral / PAN)

- formatted data product with appended metadata, including ancillary data and file formatting information (Archived data) in proprietary format

Level 1 (Hyperspectral / PAN) radiometrically corrected and calibrated radiance data in physical units

- Top-of-Atmosphere Spectral Radiance
- Cloud mask
- Sun-glint Mask
- Calibration and characterization data
- Classification Mask

Level 2b Geolocated at Ground Spectral Radiance Product (Hyperspectral / PAN)

Level 2c Geolocated At-surface Reflectance Product (Hyperspectral / PAN)

- Aerosol Characterization Product (VNIR)
- Water Vapour Map Product (Hyperspectral)
- Cloud Characterization

Level 2d Geocoded version of the level 2c products (Hyperspectral / PAN)

L1 and L2 product are disseminated in HD5 format

The dataset is organized in a Cube format, i.e. a 3D dataset.

Figura 90. L'interfaccia web della missione sperimentale *PRISMA* consente di scegliere il livello di pre-processamento dell'immagine acquisita.

Si è scelto di scaricare immagini *PRISMA* di livello *L2D* perché sono in *UTM WGS 84*, che è una proiezione a differenza dell'*L2B* in *GCS WGS 1984*, cioè coordinate geografiche (quindi angoli), per poter attuare il *Pan sharpening* con l'algoritmo *Gram-Schmidt*, che solitamente realizza valori di accuratezza elevati [50].

La risoluzione spaziale delle acquisizioni di *PRISMA* è 30 m nel *VNIR* e *SWIR*, 5 m nel pancromatico. La 'fusione delle immagini' ('*pan-sharpening*') è una tecnica usata per integrare il dettaglio geometrico dell'alta risoluzione delle immagini pancromatiche e le informazioni derivanti dai colori delle immagini multispettrali solitamente a più bassa risoluzione (Figura 92)



.Figura 91. Immagine *pan sharpened* (pixel size 5m x 5m) del 9 ottobre con dettaglio di immagine *VNIR* originale (pixel size 30m x 30m) del Centro ricerche della Casaccia, Roma.

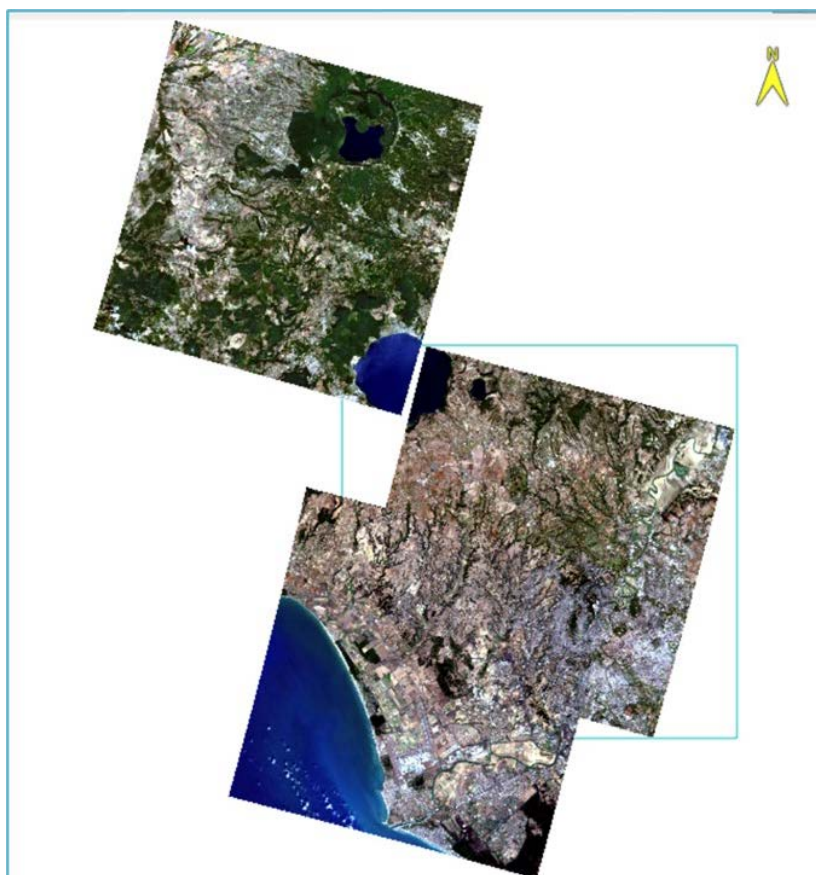


Figura 92. Immagini *PRISMA* 2021 e 2020 centrate sul Lago di Bracciano.

La visualizzazione attraverso *ENVI 5.6* ha evidenziato che delle 4 immagini valide, solo una, quella del 9 ottobre 2021, inquadrata in azzurro nella Figura 89, contiene il Centro ricerche della Casaccia e quindi l'edificio prototipo (Figura 94). Anche quella del 3 ottobre lo contiene ma la nuvolosità del 92% ne impedisce l'utilizzo (Figura 92, quadrato azzurro).

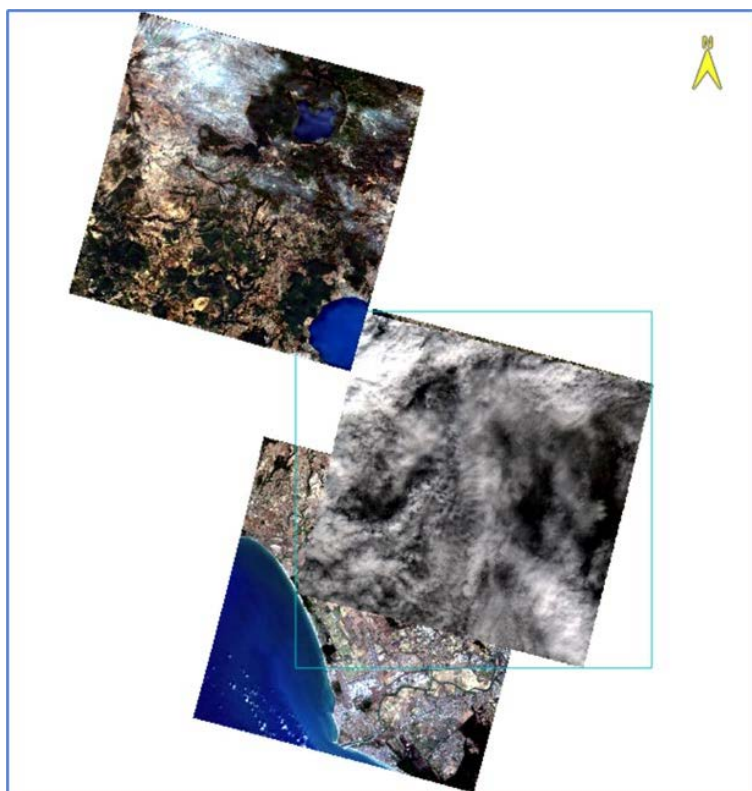


Figura 93. Immagini *PRISMA* 2021 e 2020 centrate sul Lago di Bracciano: la nuvolosità elevata rende inutilizzabile l'acquisizione del 3 ottobre 2021.

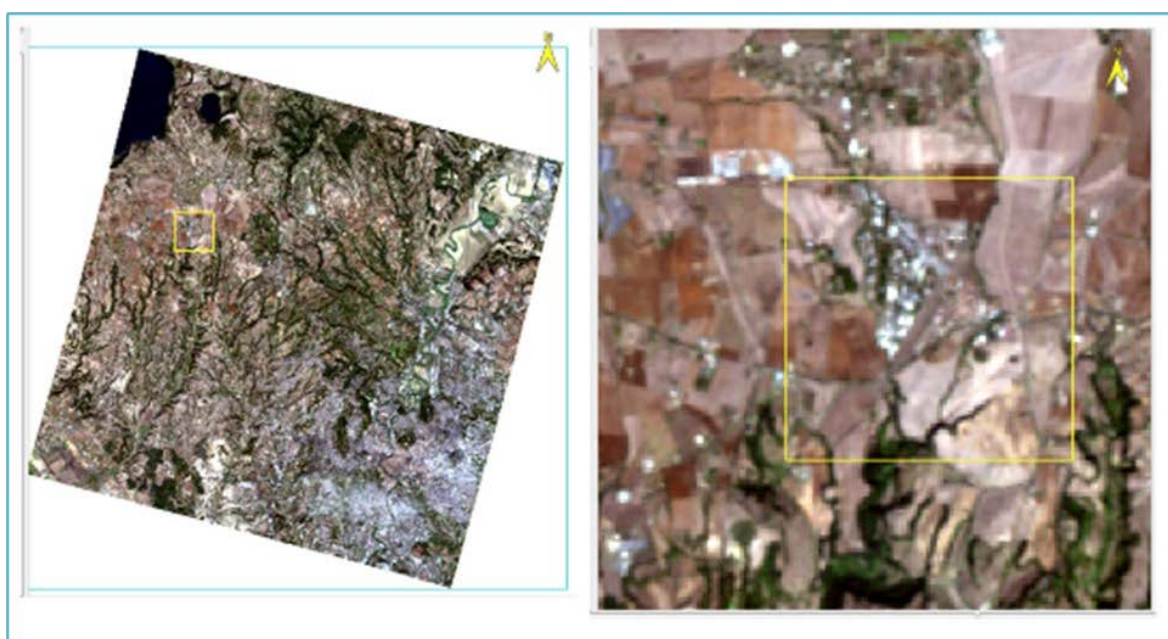


Figura 94. Immagine *PRISMA* del 9 ottobre 2021 con il Centro ENEA della Casaccia inquadrato in giallo.



Figura 95. Immagine PRISMA del 9 ottobre 2021 con l'edificio prototipo indicato da freccia a sinistra, immagine di Google earth a destra.

La fusione delle immagini attraverso il *pan sharpening* con la scalatura a 5 m di risoluzione spaziale consente una facile individuazione dell'edificio prototipo, indicato dalla freccia nell'immagine a sinistra, nonostante le dimensioni relativamente piccole delle pareti verdi e del tetto, dell'ordine dei 10 m e 10-12 m² rispettivamente. Il calcolo dell'*NDVI* attraverso l'algoritmo di *ENVI* che utilizza di *default* per i dati PRISMA la banda 31 per il rosso, 641.3333 nm, e la 51 per il vicino infrarosso, 844.4271 nm, conduce alla mappa riportata in Figura 96: l'operazione è stata realizzata su un *subset* dell'intera immagine ottenuta attraverso *resize* dell'immagine originale per ridurre l'onere.

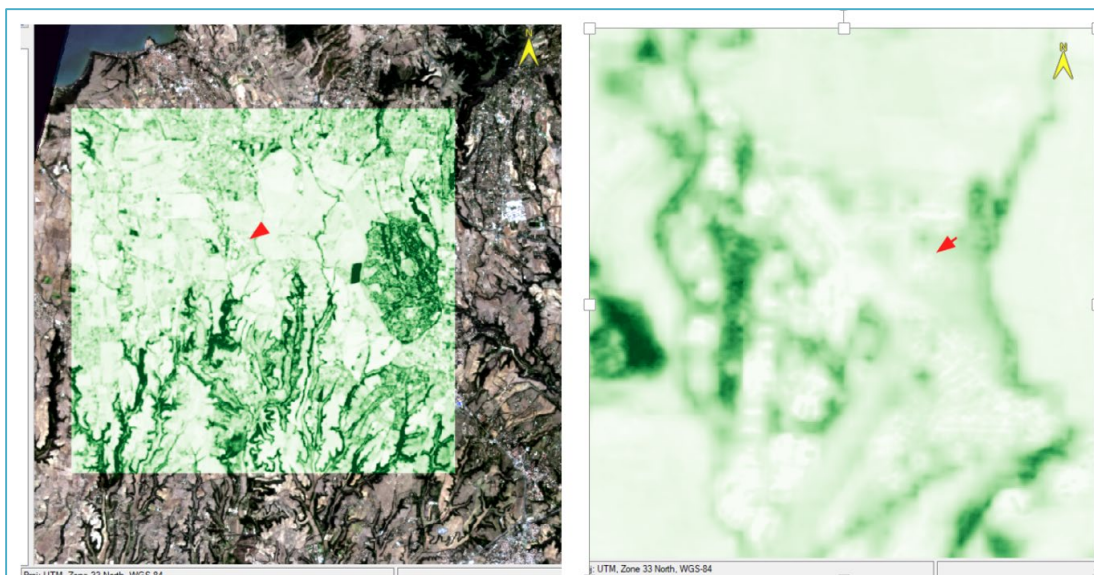


Figura 96. Mappa NDVI dell'immagine PRISMA del 9 ottobre 2021 con l'edificio prototipo indicato da freccia rossa.

Sulla base della scala dei valori dell'*NDVI* (Tabella 20) la mappa a video rivela presenza di verde in prossimità all'edificio prototipo come evidenziato dalla Figura 97.

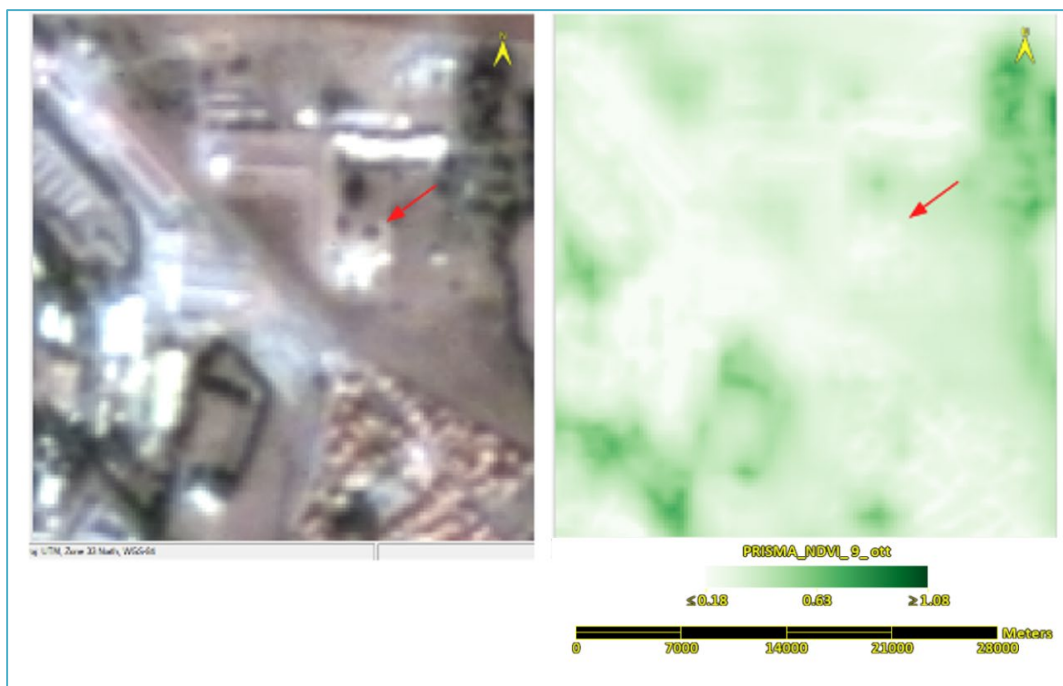


Figura 97. Mappa *NDVI* dell'immagine *PRISMA* del 9 ottobre 2021 a confronto dell'immagini a colori reali (sinistra).

PRISMA non consente di mappare la *LST* poiché non acquisisce nel *TIR* (*thermal infrared* da 3000 nm), giungendo fino allo *SWIR* (*short wave infrared* 2500 nm).

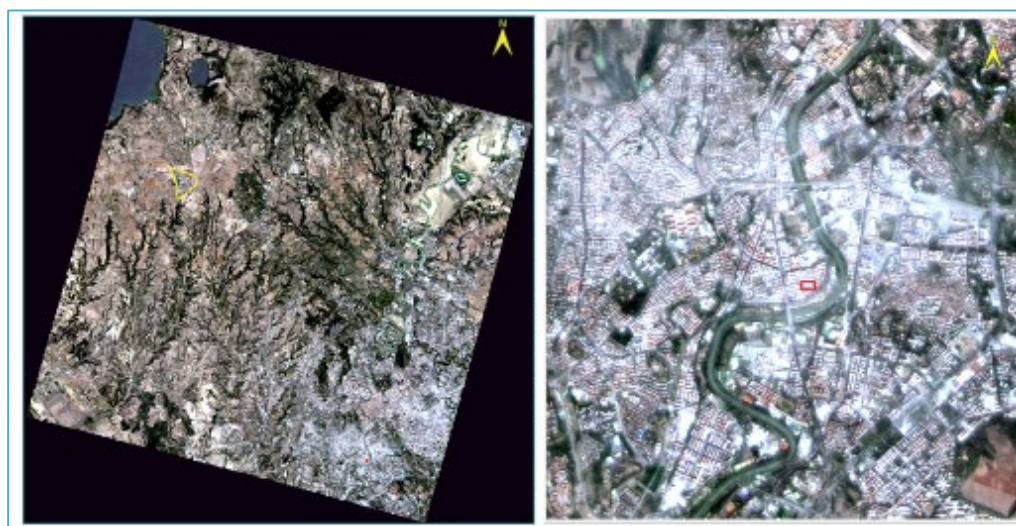


Figura 98. Immagine *PRISMA* del 9 ottobre 2021 con l'edificio del Liceo Scientifico *Keplero* di Roma, puntino rosso nell'immagine a sinistra, rettangolo rosso a destra; C.R. ENEA Casaccia in giallo a sinistra.

Il tetto della palestra del L.S. *Keplero* in via Silvestro Gherardi 87 Roma (la prima scuola d'Italia con il giardino sul tetto, vincitrice del premio internazionale *Echotechgreen*) nel Luglio 2016 è stato trasformato in tetto verde estensivo. La superficie totale di circa 200 m² è stata suddivisa in due zone: su un'area di circa 150 m² è stato realizzato un sistema multistrato dallo spessore totale di circa 11 cm: originariamente composta da specie del gen. *Sedum*, attualmente arricchita con l'introduzione di specie della flora mediterranea. Nei restanti 50 mq è

stata attrezzata un'area, con spessore totale di circa 15 cm, per effettuare una sperimentazione scientifica pluriennale volta a indagare le caratteristiche termiche, idrauliche ed agronomiche di una copertura vegetale nelle condizioni dell'ambiente mediterraneo.

La ricerca per immagini ha condotto al reperimento di 4 immagini *PRISMA* del Liceo: 29 dicembre 2019, 8 marzo 2020, 3 ottobre 2021 e 9 ottobre 2021 (Figura 98).

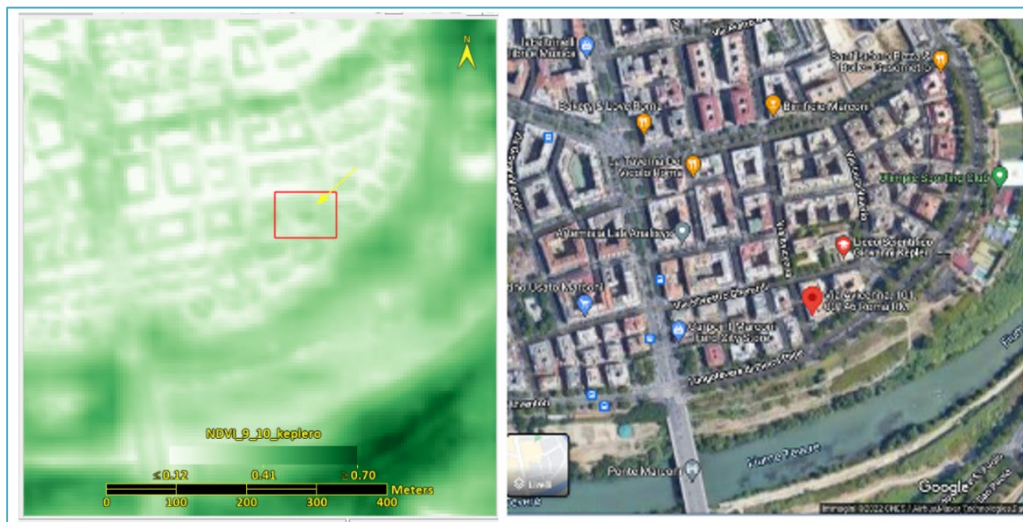


Figura 99. Mappa *NDVI* del 9 ottobre 2021 con l'edificio del Liceo Scientifico *Keplero* di Roma, freccia gialla nel rettangolo.

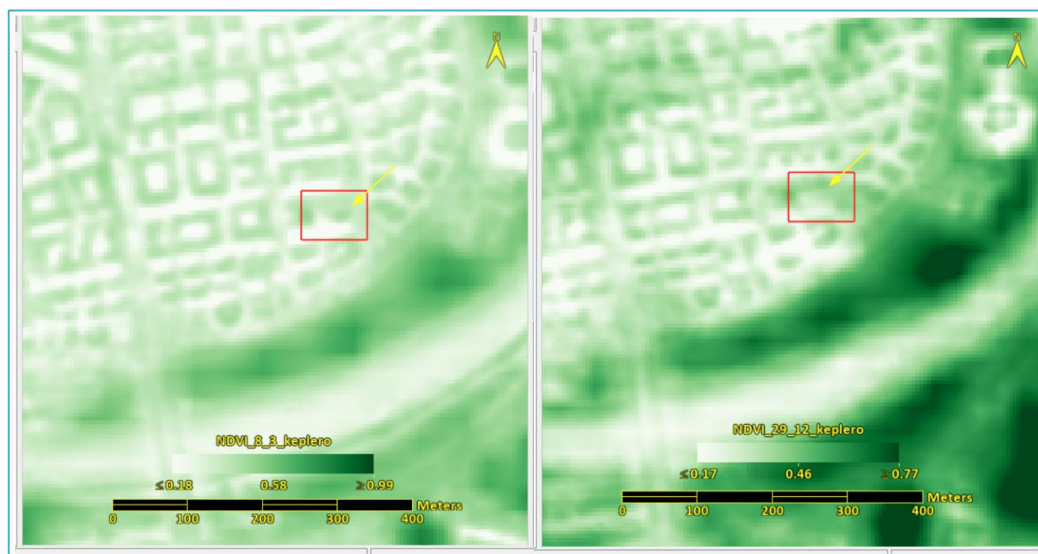


Figura 100. Mappa *NDVI* dell'8 marzo 2020, a sinistra, 29 dicembre 2019, a destra, con l'edificio del Liceo Scientifico *Keplero* di Roma nel rettangolo rosso, freccia gialla.

Le mappe di *NDVI* mostrano la vegetazione in modo molto dettagliato come peraltro l'immagine a colori reali mostra, essendo la risoluzione spaziale spinta fino a 5 metri.

5.3.2 Dati LANDSAT 8

Landsat 9 è stato lanciato il 27 settembre 2021 dalla base di *Vandenberg* in California. Le sue immagini sono state rese disponibili gratuitamente per il *download* la mattina del 10 febbraio 2022. Collaborando in orbita con *Landsat 8*, *Landsat 9* garantirà una continua rivisitazione terrestre e costiera per otto giorni [51].

Landsat 9 rileva differenze più sottili rispetto al suo predecessore, specialmente su aree più scure come l'acqua o fitte foreste. Con questa risoluzione radiometrica migliorata, *OLI-2* di *Landsat 9* può differenziare 16.384 sfumature di una data lunghezza d'onda. In confronto, *Landsat 8* fornisce 4.096 sfumature. *Landsat 9* prende il posto di *Landsat 7*, che ha solo 256 sfumature. *TIRS-2*, nel frattempo, ha ridotto significativamente la luce diffusa, consentendo una migliore correzione atmosferica per misurazioni più accurate della temperatura superficiale.

L'accesso alle immagini può avvenire attraverso le piattaforme *USGS Earth Explorer* [52] (Figura 102), *Machine to Machine (M2M)* [53] e *LandsatLook*.

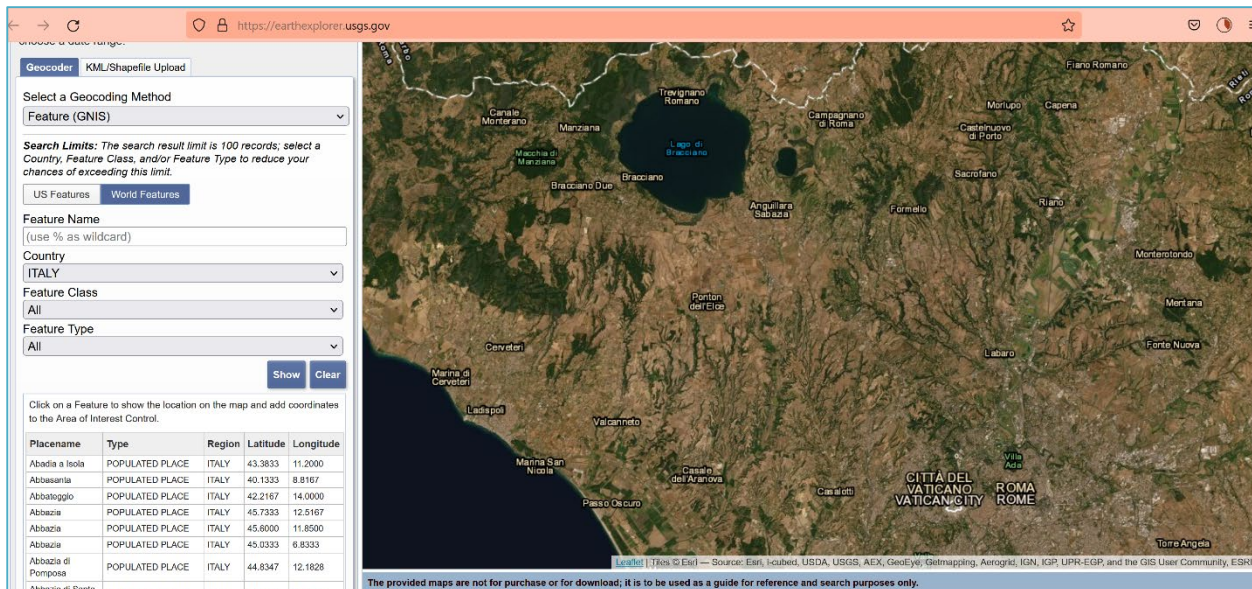


Figura 101. Piattaforma USGS EarthExplorer per la ricerca, visualizzazione, scelta del dato e download dei dati Landsat.

La ricerca per l'area di studio ha evidenziato la disponibilità di immagini *Landsat 8 collezione 2* sia *pre* sia *post* realizzazione edificio prototipo, avvenuta nel 2017:

- LC08_L2SP_191031_20140815_20200911_02_T1
- LC08_L2SP_191031_20160601_20200906_02_T1
- LC08_L2SP_191031_20160617_20200906_02_T1
- LC08_L2SP_191031_20160703_20200906_02_T1
- LC08_L2SP_191031_20160804_20200906_02_T1
- LC08_L2SP_191031_20210311_20210317_02_T1
- LC08_L2SP_191031_20210615_20210622_02_T1
- LC08_L2SP_191031_20210701_20210708_02_T1
- LC08_L2SP_191031_20210802_20210811_02_T1
- LC08_L2SP_191031_20210818_20210827_02_T1
- LC08_L2SP_191031_20210919_20210925_02_T1

La composizione del nome dei dati *Landsat* segue la regola illustrata nella Tabella 22. Tabella esplicativa della composizione convenzionale dei nomi dei file del *Landsat* 8

Tabella 22. Tabella esplicativa della composizione convenzionale dei nomi dei file del *Landsat* 8.

LXSS_LLLL_PPPRRR_YYYYMMDD_yyyymmdd_CC_TX	
L	Landsat
X	Sensor ("C" = OLI/TIRS combined, "O" = OLI-only, "T" = TIRS-only)
SS	Satellite ("08" = Landsat 8)
LLLL	Processing correction level (L1TP/L1Gt/L1Gs)
PPP	WRS path
RRR	WRS row
YYYYMMDD	Acquisition year (YYYY)/Month(MM)/Day(DD)
yyymmdd	Processing year (yyyy)/ Month (mm)/ Day (dd)
CC	Collection number (01, 02,...)
TX	Collection category ("RT" = Real-Time, "T1" = Tier 1, "T2" = Tier 2)
Example:	LC08_L1GT_029030_20151209_20160131_01_T1

Nel 2016, l'*USGS* ha riorganizzato l'archivio *Landsat* in una struttura di gestione della raccolta a più livelli intitolata *Landsat Collection* 1. Questa struttura garantisce che tutti i prodotti *Landsat Level-1* forniscano un archivio coerente della qualità dei dati nota, controllando al contempo il miglioramento continuo dell'archivio e l'accesso a tutti i dati man mano che vengono acquisiti. La raccolta 1 contiene tutti i dati di livello 1 acquisiti dal 1972 ad oggi da *Landsat* 1-8. *Landsat* 9 è disponibile solo nella Collezione 2 [54].

Landsat Collection 2 segna il secondo importante evento di rielaborazione dell'archivio *USGS Landsat Level-1*, con il risultato di numerosi miglioramenti del prodotto che sfruttano i recenti progressi nell'elaborazione dei dati, nello sviluppo di algoritmi e nelle capacità di accesso e distribuzione dei dati.

L'elaborazione a termine basata su *Landsat Collection* 1 è terminata il 31 dicembre 2021, in concomitanza con l'elaborazione a termine basata su *Landsat Collection* 2. A partire dal 1 gennaio 2022, tutte le nuove acquisizioni *Landsat* verranno elaborate solo nella struttura dell'inventario *Collection* 2.

Landsat 8 L2SP contiene [55]:

- *Surface Reflectance (SR)* derivato dai dati *Landsat* 8 *Collection* 2 *Level 1 Operational Land Imager (OLI)*
- Temperatura superficiale (*ST*) derivata dai dati del sensore a infrarossi termici (*TIRS*) *Landsat* 8 *Collection* 2 *Livello 1*
- Bande intermedie utilizzate nel calcolo dei prodotti *ST*
- Maschere di valutazione della qualità (*QA*) che indicano l'utilità dei dati dei *pixel*.

I prodotti *Landsat* 8 *SR* sono creati con il *Land Surface Reflectance Code (LaSRC)*. I prodotti *Landsat* 8 *ST* sono creati con un algoritmo a canale singolo creato congiuntamente dal *Rochester Institute of Technology (RIT)* e dal *Jet Propulsion Laboratory (JPL)* della *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*.

Una caratteristica principale dei dati della Raccolta 2 è l'implementazione dell'immagine di riferimento globale (*GRI*) di *Sentinel* 2 nei punti di controllo a terra *Landsat* 8 *OLI* aggiornati per una migliore precisione geometrica. Il **livello (L) 2** è una certificazione riconosciuta a livello internazionale che assicura una maggiore interoperabilità dell'archivio *Landsat* sia nel tempo che con altri set di dati tele rilevati, come *Sentinel* 2. Inoltre, *Collection* 2 include fonti di modellazione dell'elevazione digitale globale aggiornate e aggiornamenti di calibrazione e convalida.

T1: contiene i dati *L1TP* (*Livello 1 Precision Terrain*) di massima qualità considerati adatti per l'analisi di serie temporali. La geo registrazione è coerente ed entro le tolleranze prescritte [errore quadratico medio <12 m (*RMSE*)].

T2 contiene scene *L1TP* che non soddisfano i criteri di livello 1 e tutte le scene *Systematic Terrain (L1GT)* e *Systematic (L1GS)*. Gli utenti interessati alle scene di livello 2 possono valutare l'*RMSE* L1TP e altre proprietà per determinare l'idoneità all'uso nelle loro applicazioni e studi.

Real-Time (RT) – Contiene scene *Landsat 8* appena acquisite, che richiedono un periodo di valutazione e regolazione della calibrazione dopo l'acquisizione, ma vengono elaborate immediatamente in base a coefficienti di calibrazione preliminari, assegnati al livello *RT* temporaneo e resi disponibili per il *download*.

La decompressione del dato scaricato fornisce i prodotti indicati in Tabella 23.

Tabella 23. Specifiche della banda dei prodotti scientifici di livello 2 della raccolta (C2) (L2SP).

Band Designation	File Format	Band Name	Data Type	Units	Data Range	Valid Range	Fill Value	Multiplicative Scale Factor	Additive Scale Factor
ProductID_SR_B1	TIF	Band 1 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65455	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_SR_B2	TIF	Band 2 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65455	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_SR_B3	TIF	Band 3 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65455	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_SR_B4	TIF	Band 4 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65455	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_SR_B5	TIF	Band 5 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65455	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_SR_B6	TIF	Band 6 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65535	1 - 65535	0	0.0000275	-0.2
ProductID_SR_B7	TIF	Band 7 SR	UINT16	Reflectance	1 - 65455	7273 - 43636	0	0.0000275	-0.2
ProductID_ST_B10	TIF	Band 10 ST	UINT16	Kelvin	1 - 65535	1 - 65535	0	0.00341802	149
ProductID_QA_PIXEL	TIF	Level 2 Pixel Quality Band	UINT16	Bit Index	1 - 65535	21824 - 65534	1	NA	NA
ProductID_SR_QA_AEROSOL	TIF	Aerosol QA	UINT8	Bit Index	0 - 255	0 - 255	1	NA	NA
ProductID_QA_RADSAT	TIF	Radiometric Saturation QA	UINT16	Bit Index	0 - 32768	0 - 3829	NA	NA	NA
ProductID_ST_QA	TIF	Surface Temperature Uncertainty	INT16	Kelvin	0 - 32767	0 - 32767	-9999	0.01	NA
ProductID_ST_TRAD	TIF	Thermal Band in Radiance	UINT16	$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m) / DN$	0 - 22000	0 - 22000	-9999	0.001	NA
ProductID_ST_URAD	TIF	Upwelled Radiance	UINT16	$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m) / DN$	0 - 28000	0 - 28000	-9999	0.001	NA
ProductID_ST_DRAD	TIF	Downwelled Radiance	UINT16	$W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m) / DN$	0 - 28000	0 - 28000	-9999	0.001	NA
ProductID_ST_ATRAN	TIF	Atmospheric Transmittance	UINT16	Unitless	0 - 10000	0 - 10000	-9999	0.0001	NA
ProductID_ST_EMIS	TIF	Emissivity estimated from ASTER GED	UINT16	Unitless	0 - 10000	0 - 10000	-9999	0.0001	NA
ProductID_ST_EMSD	TIF	Emissivity standard deviation	UINT16	Unitless	0 - 65535	0 - 10000	-9999	0.0001	NA
ProductID_ST_CDIST	TIF	Pixel distance to cloud	UINT16	Kilometers	0 - 24000	0 - 24000	-9999	0.01	NA
ProductID_MTL	txt and xml	Level 1 Metadata file	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

I prodotti scientifici *Landsat 8 Surface Reflectance (SR)* sono generati da un *software* specializzato chiamato *Land Surface Reflectance Code (LaSRC)*. *LaSRC* genera la riflettanza *Top of Atmosphere (TOA)* e la temperatura di luminosità *TOA (BT)* utilizzando i parametri di calibrazione dai metadati. Le routine di correzione atmosferica vengono quindi applicate ai dati di riflettanza *TOA Landsat 8*, utilizzando dati di *input* ausiliari come vapore acqueo, ozono e spessore ottico dell'aerosol (*AOT*) recuperati dallo spettroradiometro di *imaging* a risoluzione moderata (*MODIS*) e l'elevazione digitale derivata da *GTOPO5* per generare la superficie Riflessione. Il risultato viene fornito come prodotto dati *Landsat Surface Reflectance*.

Il prodotto *Landsat Surface Temperature (ST)* è generato dalle bande dell'infrarosso termico *Landsat Collection 2 Level 1* utilizzando *Top of Atmosphere (TOA) Reflectance*, *TOA Brightness Temperature (BT)*, *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Emissivity Database (GED)*, dati *ASTER*

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e profili atmosferici di altezza geopotenziale, umidità specifica e temperatura dell'aria estratti dai dati di rianalisi.

ST band contiene la temperatura della superficie terrestre in gradi *Kelvin*: il passaggio a gradi centigradi si ottiene moltiplicando per un fattore di scala, 0,00341802 e aggiunta di un fattore additivo, 149 (Tabella 23).

Le bande termiche *TIRS/TIRS-2* originariamente acquisite ad una risoluzione spaziale di 100 metri vengono **ricampionate a 30 metri** per abbinamento alle bande multispettrali acquisite in contemporanea.

Quest'ultimo aspetto ha determinato l'attenzione ad utilizzare i dati *Landsat* per ricavare mappe di *LST* per l'area oggetto di studio poiché *Sentinel 2* non acquisisce nel termico (*TIR*), fermandosi allo *SWIR*

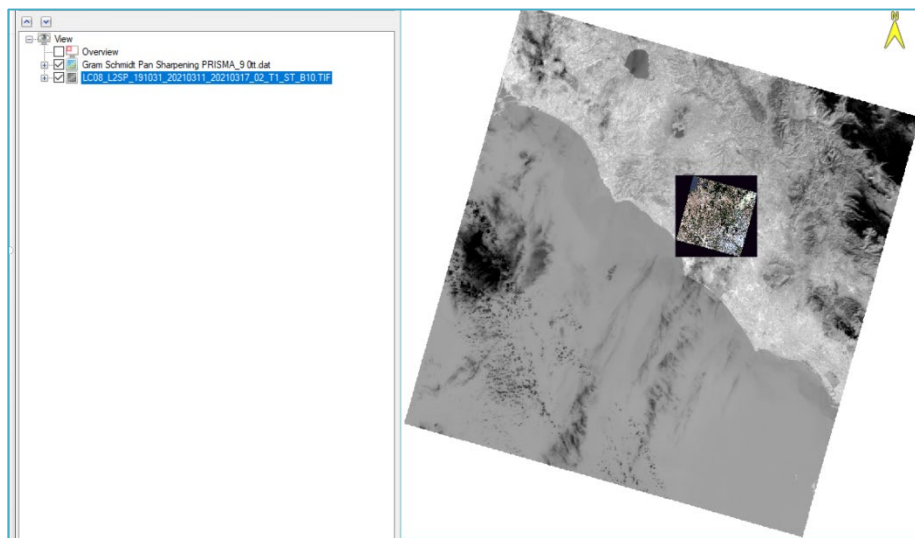


Figura 102. Immagine *Landsat 8* e *Prisma* a confronto attraverso software *ENVI*.

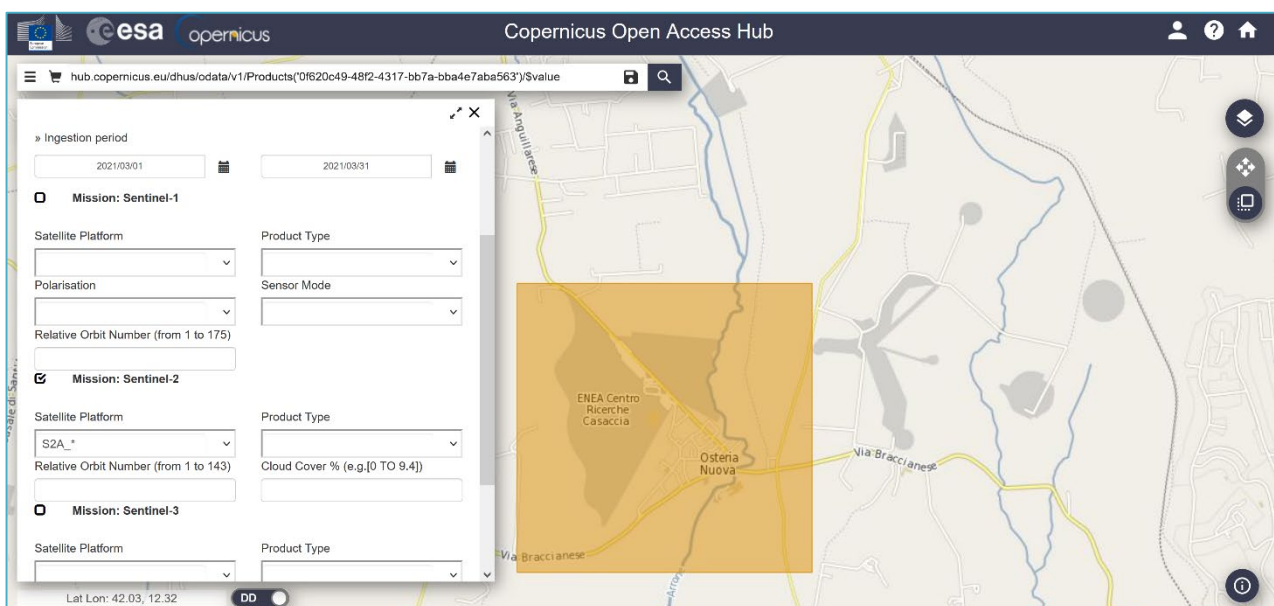


Figura 103. Piattaforma *SciHub Copernicus* dell'ESA (*European space agency*) per la ricerca e download di immagini *Sentinel*.

5.3.3 Dati Sentinel 2

I satelliti *Landsat* dispongono di sensori che forniscono anche una banda pancromatica, *B8*, ma non viene fornita nell'archivio della collezione 2 perché si può supplire con una banda pancromatica *Sentinel 2* sintetica: i due satelliti hanno lunghezze d'onda simili, offrendo un'eccellente opportunità per combinare i dati. Il loro utilizzo sinergico ha il vantaggio principale di aumentare la frequenza delle acquisizioni da 2 (*Landsat 8*) o 6 (*Sentinel 2*) a 8 al mese. Grazie alla differenza di risoluzione tra i sensori (30 m per *Landsat 8* 10 m per *Sentinel 2*) viene eseguito un *downscaling* delle immagini *Landsat 8* a una risoluzione di 10 m.

Pertanto si sono ricercate le acquisizioni *Sentinel 2* nelle stesse date selezionate per *Landsat 8*. Nelle Figura 104 lo schema di convenzione di denominazione compatta dei file di *Sentinel 2*; Figura 105 invece lo schema di denominazione convenzionale dei files contenuti nella cartella *GRANULE* di *Sentinel 2* ([47]).

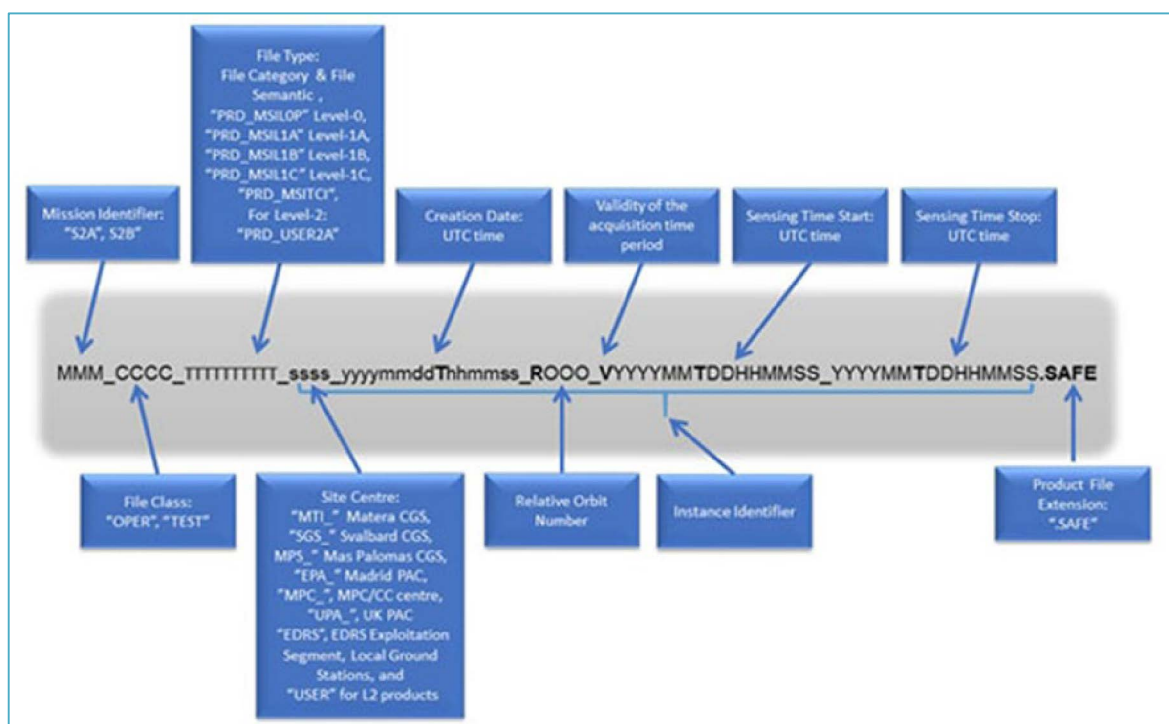


Figura 104. Convenzione di denominazione compatta dei files compressi di Sentinel 2.

La convenzione di denominazione compatta è organizzata come segue:

MMM_MSIXXX_YYYYMMDDHHMMSS_Nxxyy_ROOO_Txxxxx_<Discriminatore prodotto> SAFE

I prodotti contengono due date. La prima data (*AAAAAMGGDHHMMSS*) è l'ora di rilevamento dei dati. La seconda data è il campo "*<Product Discriminator>*", che è lungo 15 caratteri e viene utilizzato per distinguere tra diversi prodotti dell'utente finale dalla stessa acquisizione di dati. A seconda dell'istanza, il tempo in questo campo può essere precedente o leggermente successivo al tempo di rilevamento dei dati.

Gli altri componenti del nome del file sono:

- *MMM*: è l'ID missione (*S2A/S2B*)
- *MSIXXX*: *MSIL1C* indica il livello di prodotto di livello 1C/*MSIL2A* indica il livello 2A
- *AAAAAMGGDHHMMSS*: l'ora di inizio del rilevamento dei dati
- *Nxxyy*: il numero di base di elaborazione *PDGS* (ad es. N0204)
- *ROOO*: Numero di orbita relativa (R001 - R143)
- *Txxxxx*: campo Numero tessera
- *Safe*: Formato del prodotto (formato di archivio standard per l'Europa)

Pertanto, il seguente nome file

S2A_MSIL1C_20170105T013442_N0204_R031_T53NMJ_20170105T013443.SAFE

identifica un prodotto di livello *1C* acquisito da *Sentinel-2A* il 5 gennaio 2017 alle 01:34:42. È stato acquisito su *Tile 53NMJ(2)* durante *Relative Orbit* 031 ed elaborato con *PDGS Processing Baseline* 02.04.

Oltre alle modifiche di cui sopra, nella cartella *Tile* dei prodotti *Level-1C* in questo formato è inclusa una *TCI* (*True Color Image*) in formato *JPEG2000*.

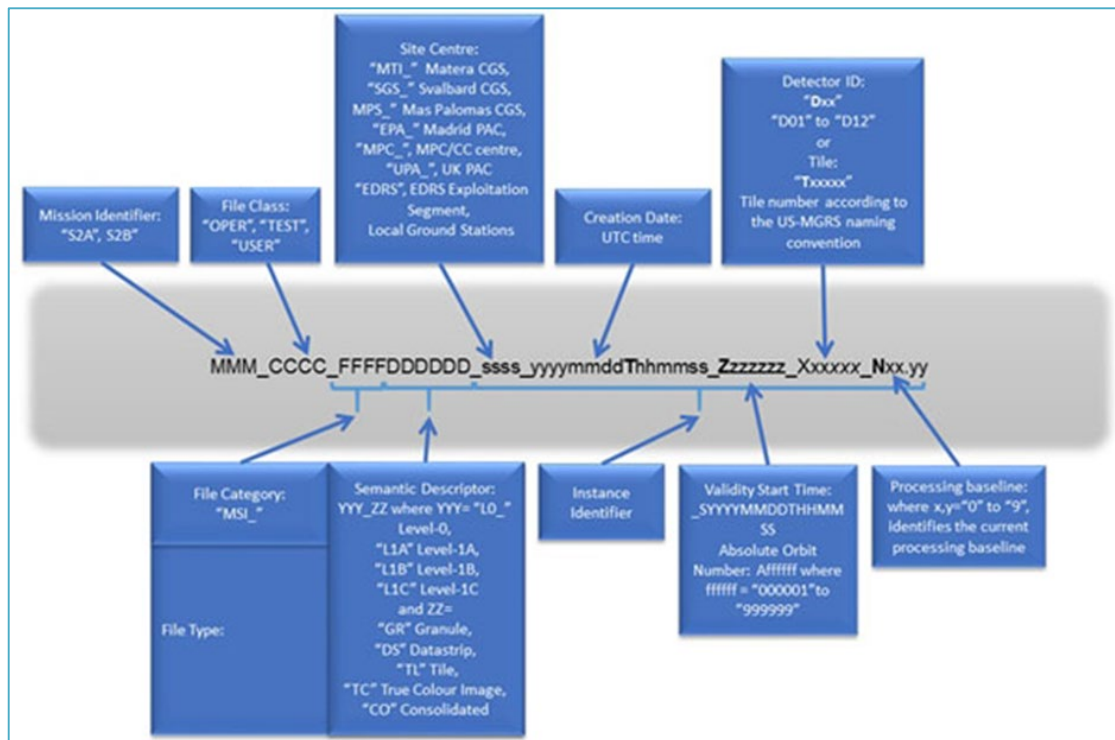


Figura 105. Convenzione di denominazione compatta delle cartelle GRANULE di Sentinel 2.

Convenzione di denominazione dei granuli (granuli e tessere) di *Sentinel 2* (Figura 105).

Mission Identifier (MMM) e *File Class* (CCCC) sono conformi alla convenzione di denominazione del prodotto.

Il tipo di *file* (TTTTTTTTT) è costituito dalla categoria del file e dalla semantica del *file*

TTTTTTTTT = FFFDDDDDD dove:

FFFF = Categoria di *file* e DDDDDD = Descrittore semantico.

La categoria *file* comprende 3 caratteri e un trattino di sottolineatura finale "_". Per Granuli questo valore è impostato su "MSI_". Il descrittore semantico DDDDDD = YYY_ZZ dove YYY può essere "L0_" per *Level-0*, "L1A" per *Level-1A*, "L1B" per *Level-1B*, "L1C" per *Level-1C* e ZZ può essere "GR" per *Granule*, "DS" per *Datastrip*, "TL" per *Tile*, "TC" per *True Color Image* o "CO" per *Consolidated*.

I componenti dell'identificatore di istanza variano leggermente rispetto alla convenzione di denominazione del prodotto e possono includere:

L'ora di inizio dell'applicabilità (_Zzzzzz) = _SYMMDDTHHMMSS aggiunge l'ora di inizio validità (granulo)

o

Il numero di orbita assoluta (_Zzzzzz) = _Affffff dove ffffff è il numero di orbita assoluta (riquadro)

L'ID del rivelatore (_Xxxxxx) = Dxx dove xx varia da 01 a 12 (granulo)

o

Numero del riquadro (_Xxxxxx) = _Txxxxx che rappresenta il numero del riquadro secondo la convenzione di denominazione US-MGRS (riquadro)

Il numero della linea di base dell'elaborazione (*Nxx.yy*) identifica la linea di base dell'elaborazione corrente in cui *x* e *y* possono essere una cifra compresa tra 0 e 9.

Denominazione del file:

Oltre ai campi sopra, i nomi dei file possono includere:

ID indice di banda (*Bxx*) dove *xx* è il numero di banda

ID completezza (*Wx*) dove *x* = F per Orbita completa *x* = P per Orbita parziale

ID degradazione (*Ly*) dove *y* = N per dati nominali *y* = D per dati degradati

Più estensioni di *file* di *.jp2* per file immagine in formato *JPEG2000*, *.xml* per file di metadati e *file .gml* o *Geographic Markup Language*.

I *files/Granuli Sentinel 2* scaricati attraverso la piattaforma *Scihub Copernicus* dell'*ESA* (Figura 106a) per la data dell'11 marzo 2021 e le successive del 12/6/21, 2/7/21, 1/8/21, 18/8/21 e 19/9/21 (Figura 107b):

- T33TTG_20210311T100031_B02_10m.jp2
- T33TTG_20210311T100031_B03_10m.jp2
- T33TTG_20210311T100031_B04_10m.jp2
- T33TTG_20210311T100031_B08_10m.jp2

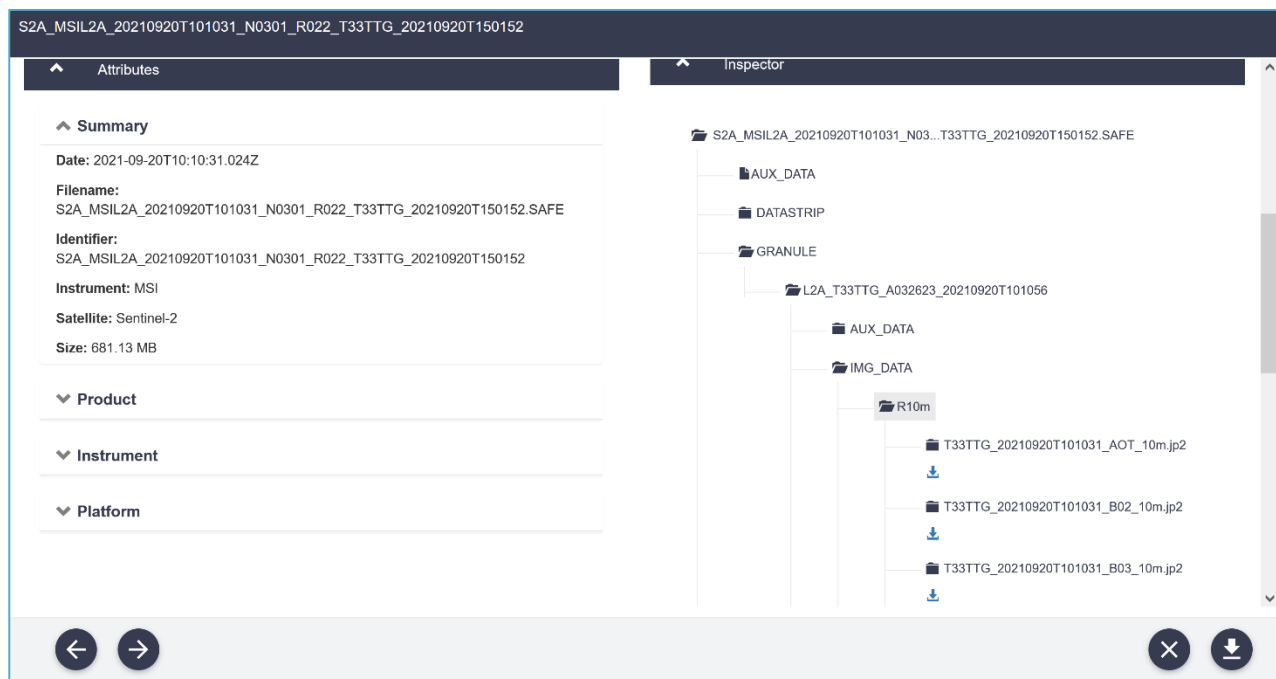


Figura 106. Struttura del dato *Sentinel 2 A* come da piattaforma *Scihub Copernicus* dell'*ESA*.

	S2A_MSIL2A_20210311T100031_N0214_R122_T33TTG_20210311T113558	14/03/2022 16:02	Archivio WinRAR ...	969.518 KB
	S2A_MSIL2A_20210612T101031_N0300_R022_T33TTG_20210612T131842	15/03/2022 17:15	Archivio WinRAR ...	772.088 KB
	S2A_MSIL2A_20210702T101031_N0301_R022_T33TTG_20210702T131254	15/03/2022 16:54	Archivio WinRAR ...	527.678 KB
	S2A_MSIL2A_20210801T101031_N0301_R022_T33TTG_20210801T121438	15/03/2022 18:38	Archivio WinRAR ...	716.606 KB
	S2A_MSIL2A_20210818T100031_N0301_R122_T33TTG_20210818T131658	15/03/2022 18:12	Archivio WinRAR ...	986.837 KB
	S2A_MSIL2A_20210920T101031_N0301_R022_T33TTG_20210920T150152	15/03/2022 17:30	Archivio WinRAR ...	0 KB

Figura 107. Dati *Sentinel 2 A* scaricati per il 2021 da piattaforma *Scihub Copernicus* dell'*ESA*.

Per generare una banda pancromatica sintetica di *Sentinel-2* L2A abbiamo utilizzato una semplice funzione di calcolo della media dalle bande 2, 3 e 4 (lo spettro coinvolto dalla banda pancromatica di *Landsat* 8, [Figura 83](#)) grazie all'algoritmo *band math* di *Envi* 5.6 ([Figura 108](#)).

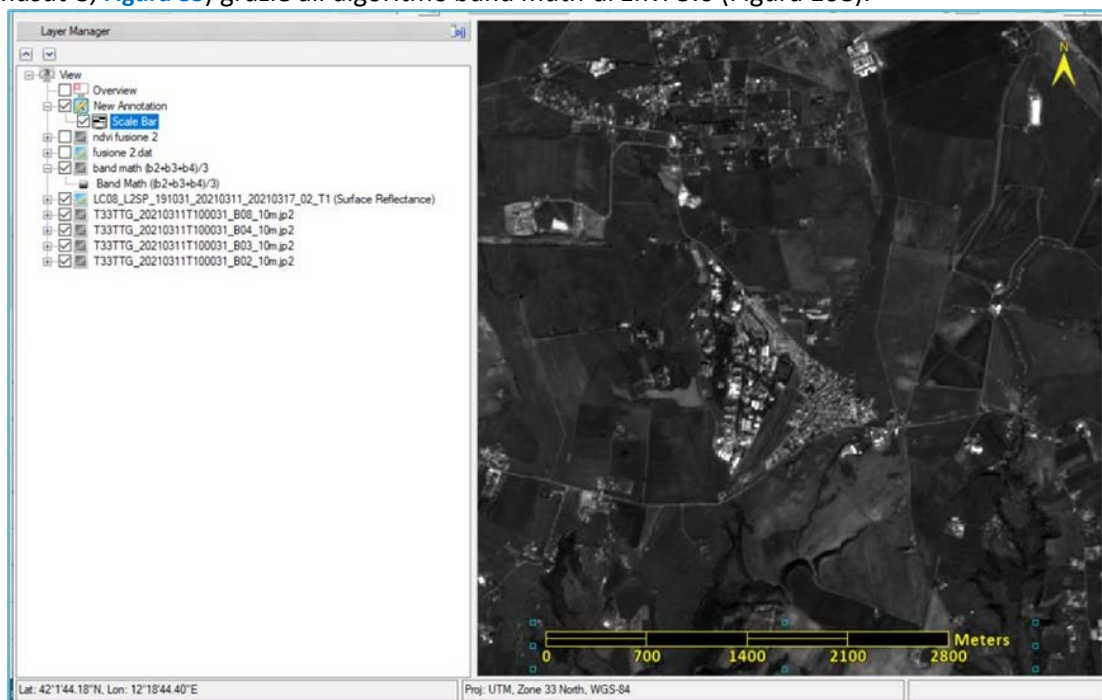


Figura 108. Costruzione della banda pancromatica sintetica di *Sentinel-2* dalle bande 2, 3 e 4.

La banda risultante, *band math (b2+b3+b4) /3*, è stata quindi combinata con il *surface reflectance* di *Landsat* 8 *LC08_L2SP_191031_2021....._2021...._02_T1_MTL* che contiene tutte le bande dalla *B1* alla *B7* tramite l'algoritmo *pan sharpening* (*Gram Schimdt pan sharpening*) ottenendo un'immagine *Landsat* 8 *Surface reflectance*, quindi *L2* collezione 2, *pan* affilato con *Sentinel* 2 L2A, acquisiti nella stessa data, 11 marzo 2021.

Un esempio per tutti di fusione di dati in [Figura 109](#) relativa alle acquisizioni dell'11 marzo 2021 sia *Landsat* 8 sia *Sentinel* 2 L2A.

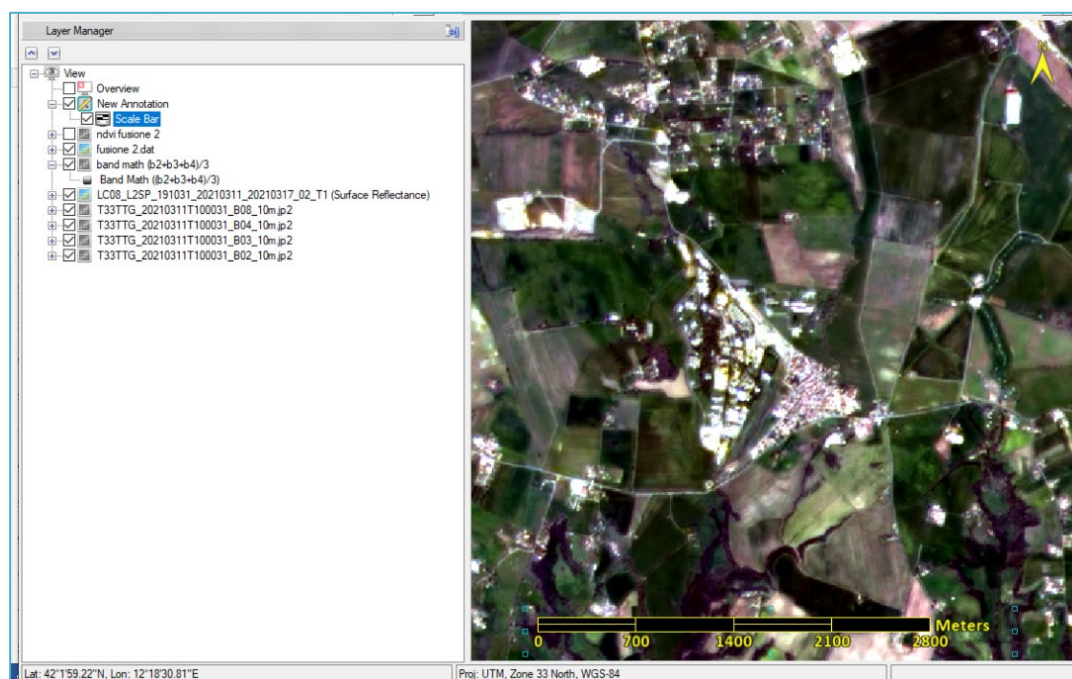


Figura 109: Immagine *Landsat* 8 *Surface Reflectance*, *LC08_L2*, *pan* affilata con *Sentinel* 2 L2A, 11 marzo 2021.

Nella Figura 110 il dato *LC08_L2SP_191031_20210311_20210317_02_T1_MTL* tal quale.

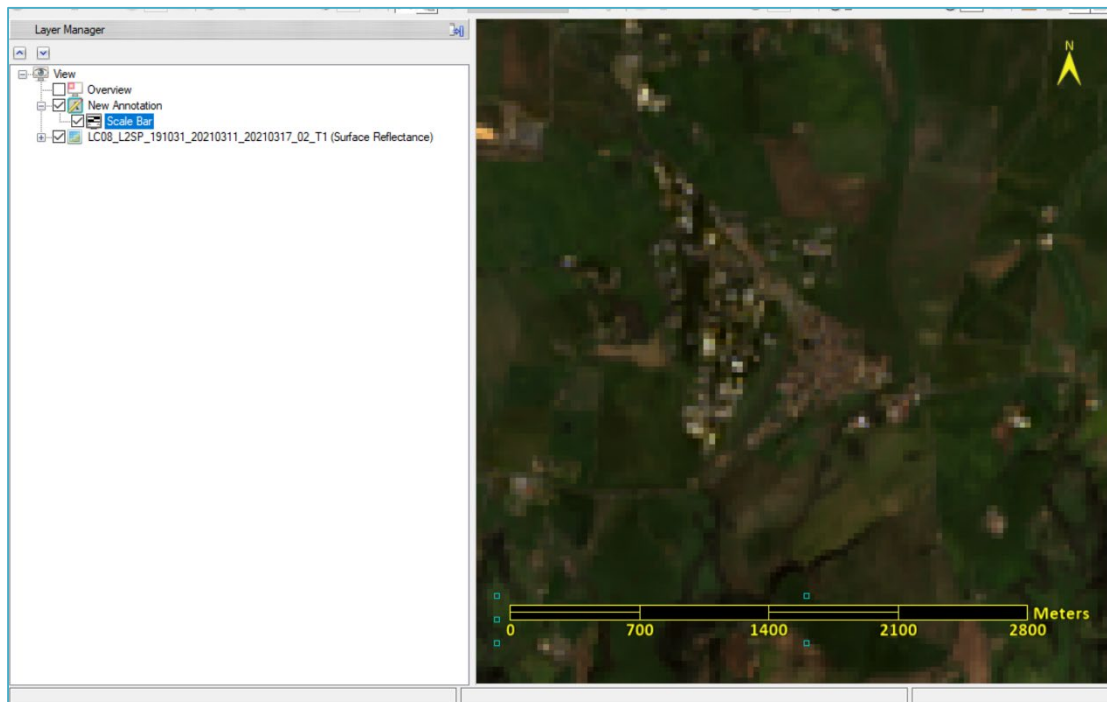


Figura 110. Immagine *Landsat 8 Surface Reflectance, LC08_L2*.

5.3.4 Mappe di NDVI

Successivamente per ciascuna nuova immagine *pan sharpened* di Landsat 8 si procede al calcolo dell'NDVI, Figura 111-Figura 117. NDVI da Landsat 8 del 14 agosto 2014 e da *Landsat 8* 8 giugno 2016 *pan* affilato con *Sentinel 2*.

Figura 118. La freccia gialla indica l'edificio prototipo ben evidenziato dal *pan sharpened* (sinistra) ma anche dall'indice (destra) nonostante le piccole dimensioni del tetto verde e delle due pareti verdi.

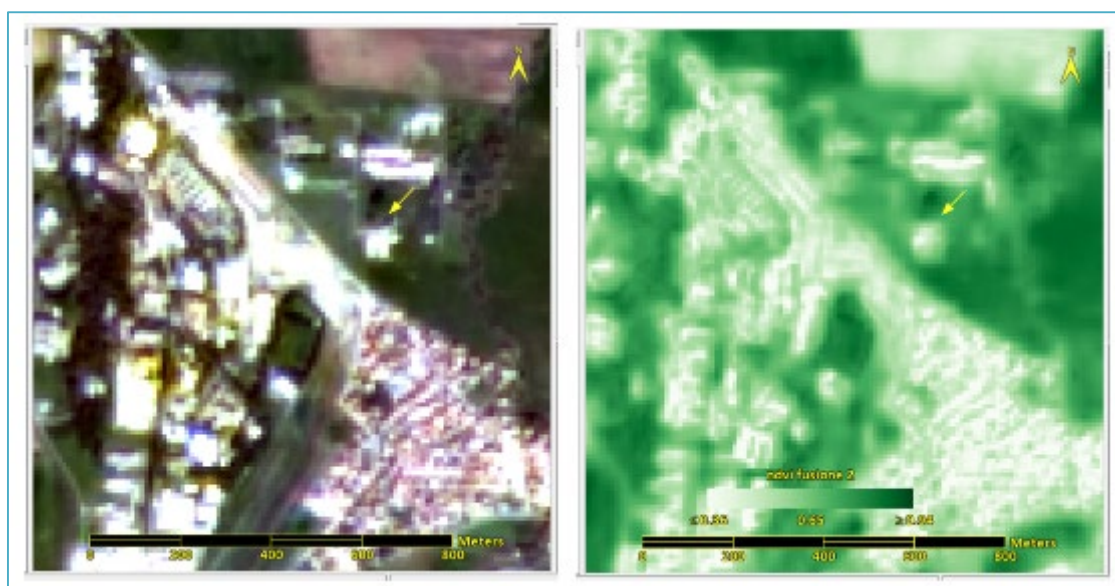


Figura 111. Immagine *NDVI* per l'area studio a partire da *Landsat 8 Surface Reflectance, LC08_L2, pan* affilato con *Sentinel 2 L2A*, 11 marzo 2021.



Figura 112. Immagine NDVI per l'area studio a partire da *Landsat 8 Surface Reflectance, LC08_L2, pan* affilata con *Sentinel 2 L2A*, 12 giugno 2021.

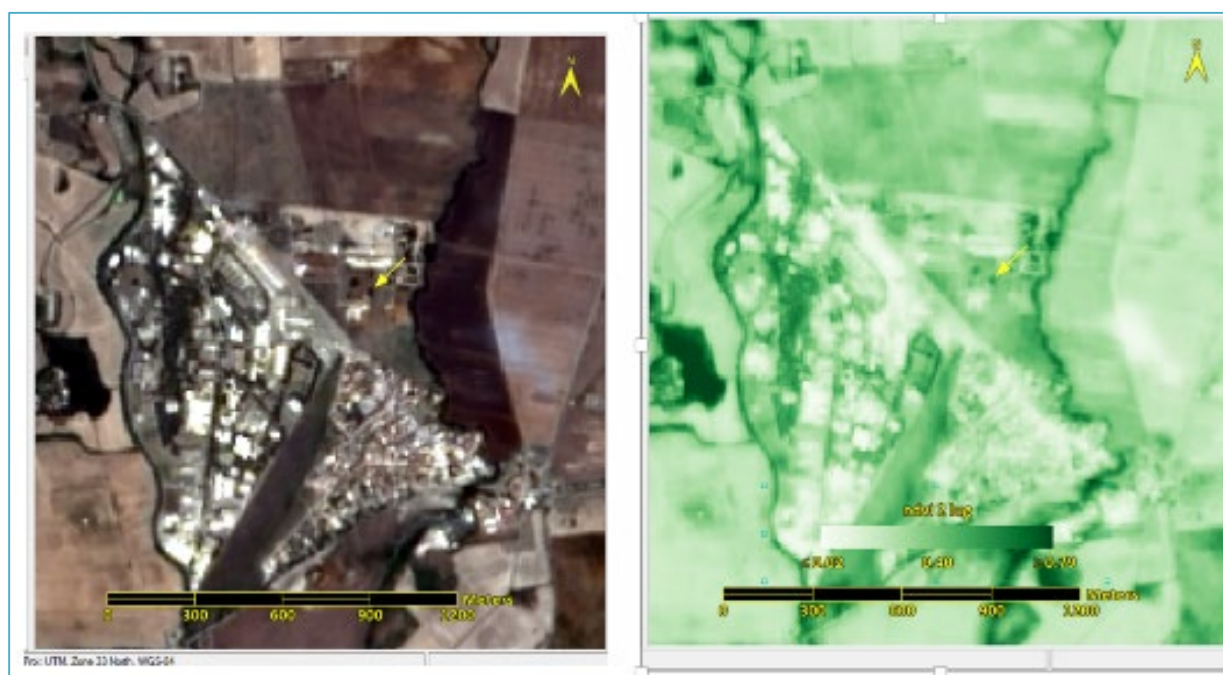


Figura 113. Immagine NDVI per l'area studio a partire da *Landsat 8 Surface Reflectance, LC08_L2, pan* affilata con *Sentinel 2 L2A*, 2 luglio 2021.

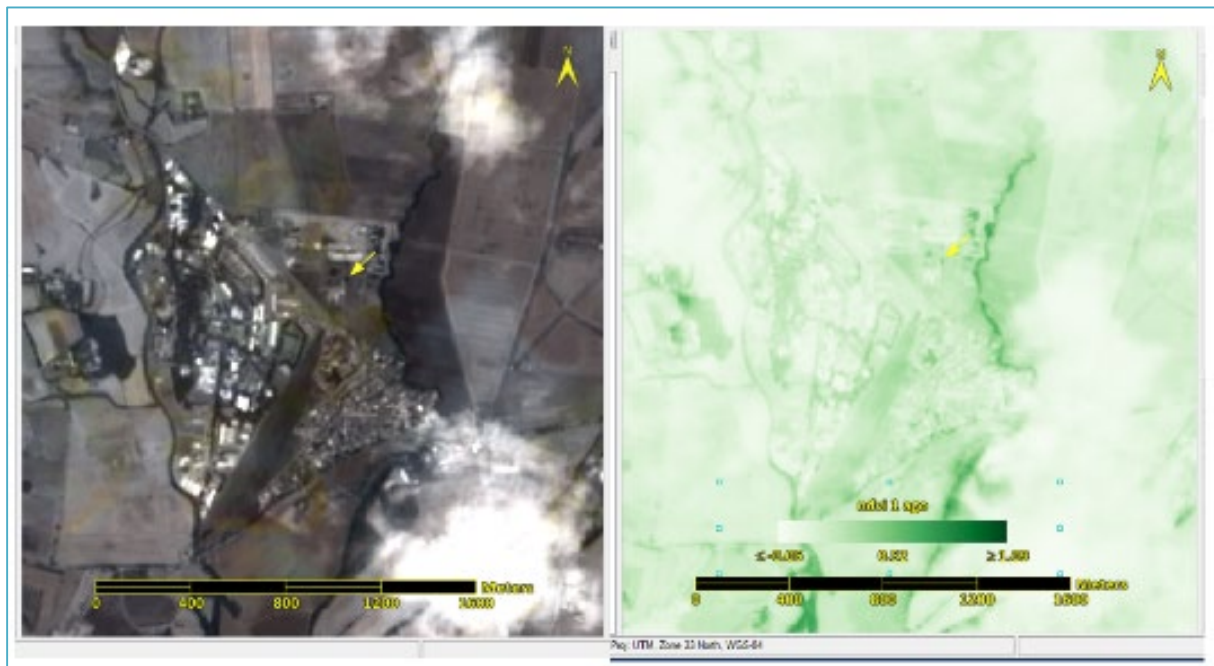


Figura 114. Immagine NDVI per l'area studio a partire da *Landsat 8 Surface Reflectance, LC08_L2*, pan affilata con *Sentinel 2 L2A*, 1 agosto 2021 (nuvoloso).

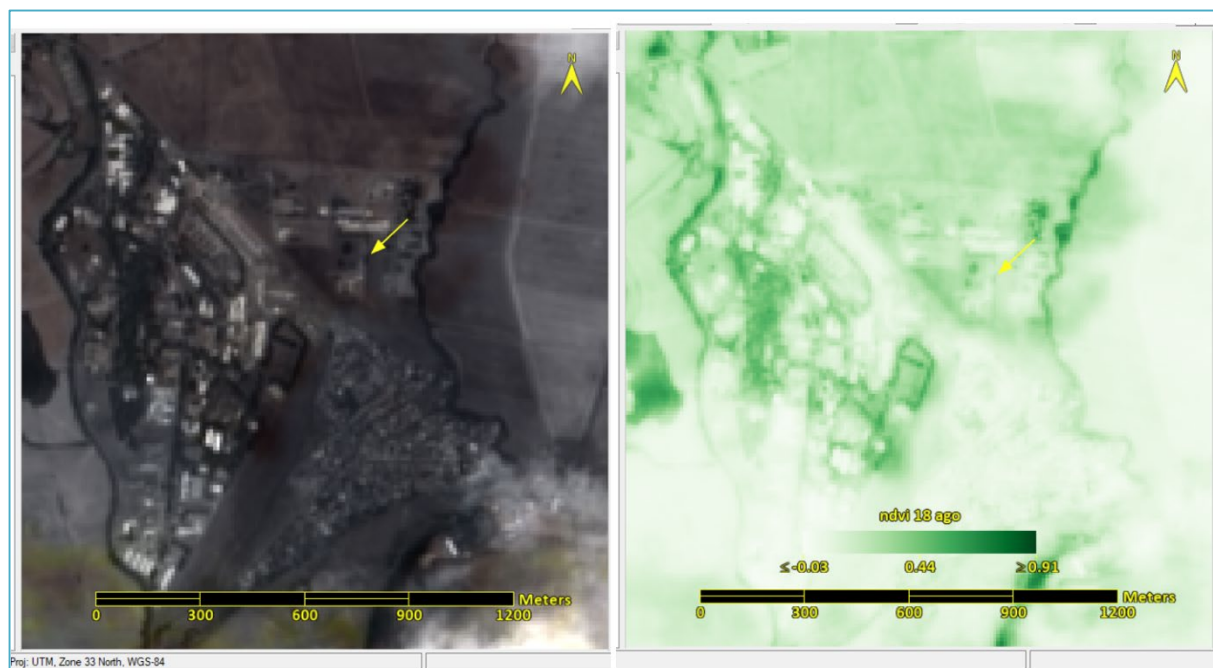


Figura 115. Immagine NDVI per l'area studio a partire da *Landsat 8 Surface Reflectance, LC08_L2*, pan affilata con *Sentinel 2 L2A*, 18 agosto 2021 (nuvoloso).

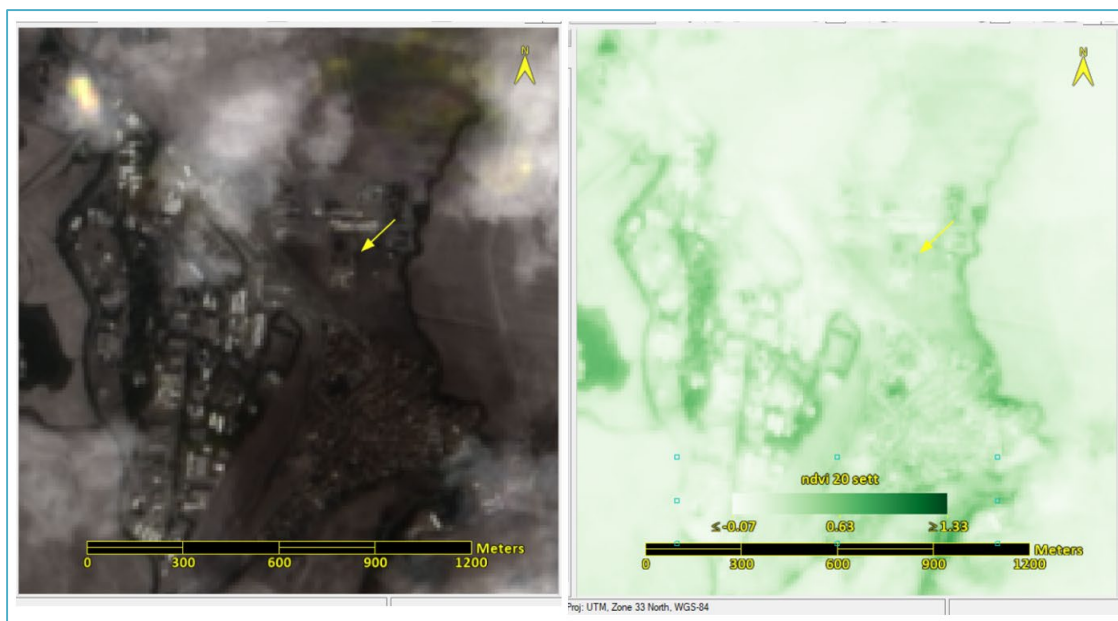


Figura 116. Immagine NDVI per l'area studio a partire da *Landsat 8 Surface Reflectance, LC08_L2, pan* affilata con *Sentinel 2 L2A*, 20 settembre 2021 (nuvoloso).

Per il periodo antecedente l'installazione del tetto e delle pareti verdi (2017) sull'edificio in Casaccia sono state individuate i seguenti dati *Sentinel 2*:

- S2A_MSIL1C_20160605T100032_N0202_R122_T33TTG_20160605T100650.SAFE
- S2A_MSIL1C_20160618T101032_N0204_R022_T33TTG_20160618T101515.SAFE

corrispondenti alle acquisizioni *Landsat 8*:

- LC08_L2SP_191031_20160601_20200906_02_T1
- LC08_L2SP_191031_20160617_20200906_02_T1

Tuttavia, l'elevata nuvolosità relativa all'acquisizione *Landsat 8* del 1 giugno ne ha reso impossibile l'utilizzo. Si è invece calcolato l'NDVI per una acquisizione *Landsat 8* dell'agosto 2014 (Figura 116)

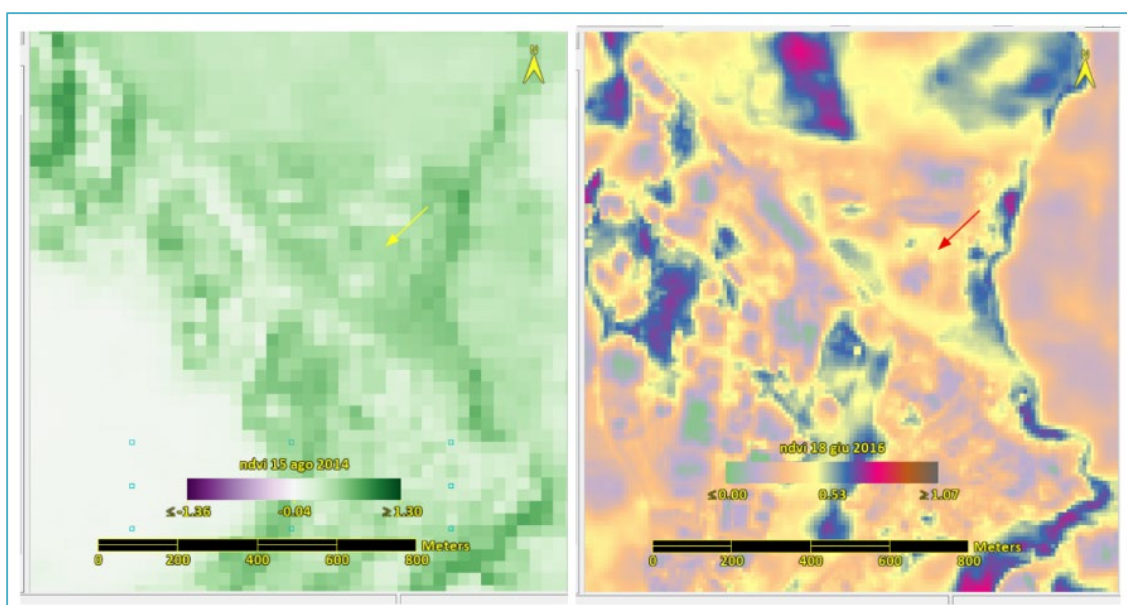


Figura 117. NDVI da *Landsat 8* del 14 agosto 2014 e da *Landsat 8* 8 giugno 2016 *pan* affilato con *Sentinel 2*.

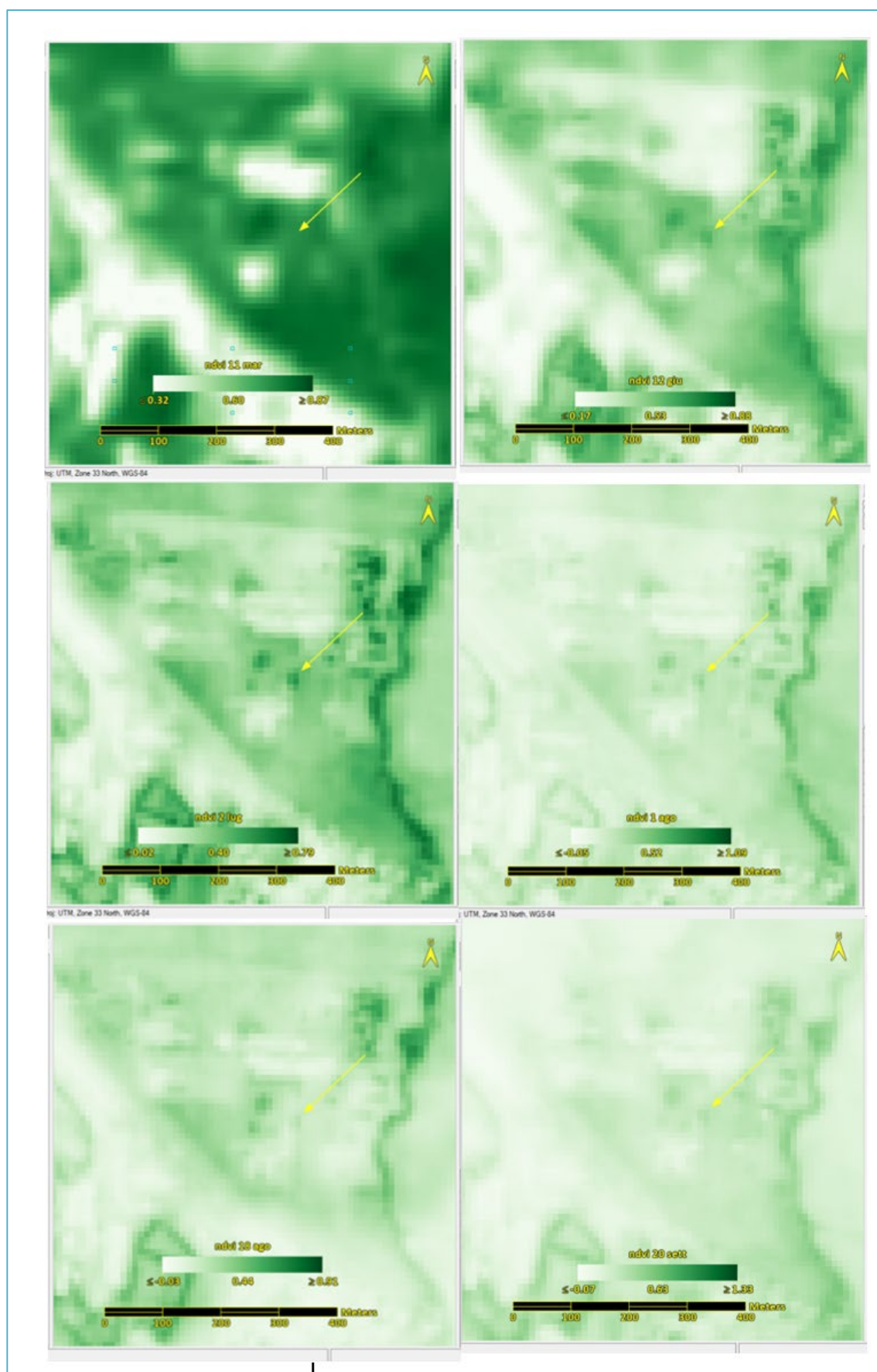


Figura 118. Mappe NDVI dell'area studio per il 2021.

5.3.5 Mappe di LST

Le acquisizioni *Landsat 8* di 2° livello collezione 2 , Figura 107, contengono il prodotto **ST B10** (*Landsat Surface Temperature*, banda 10) ovvero la temperatura della superficie terrestre ad una risoluzione spaziale di 30 metri (originariamente acquisite a 100 metri vengono ricampionate per abbinamento alle bande multispettrali acquisite in contemporanea): il passaggio in gradi *Kelvin* si ottiene moltiplicando per un fattore di scala, 0,00341802 e aggiunta di un fattore additivo, 149 (Tabella 23), utilizzando l'algoritmo *Band math* di *ENVI*. Il passaggio a gradi centigradi previa sottrazione di 273,15.

La *ST B10* del 15 agosto 2014 in scala di grigi e in scala di rosso *Red temperature*, adatta per visualizzare acquisizioni nel *TIR*, Figura 119. Mappe di *Land Surface Temperature* per tutte le acquisizioni *Landsat 8 pre e post* installazione tetto e pareti verdi: Figura 120, Figura 121 e Figura 122.

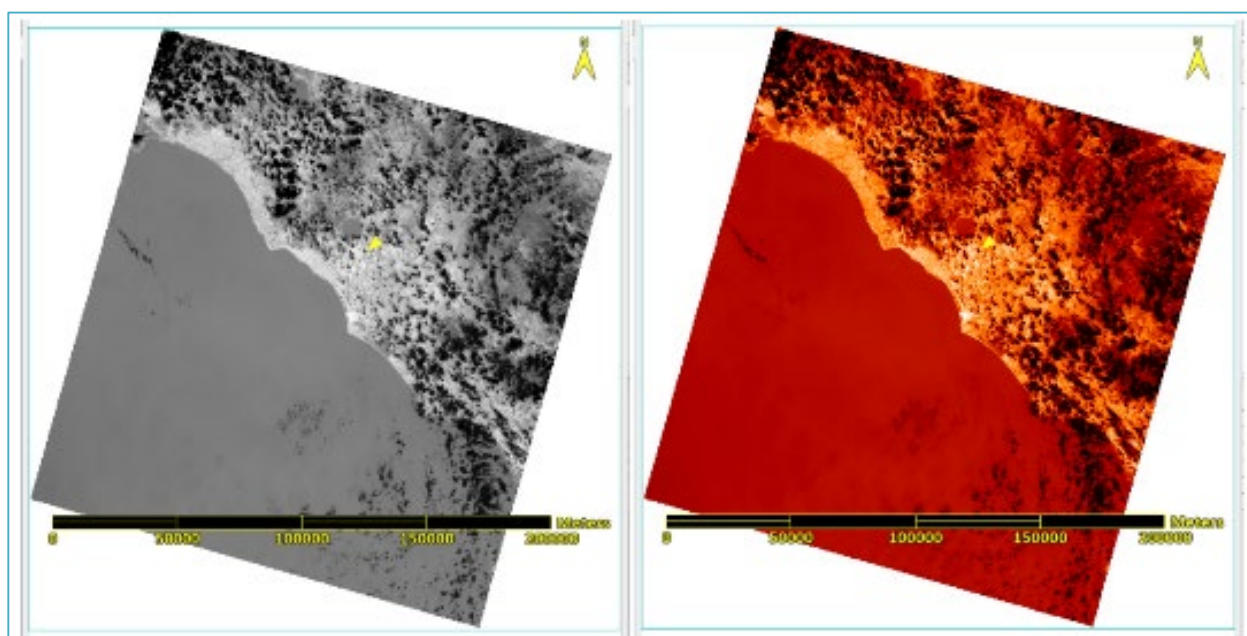


Figura 119. La *ST B10* del 15 agosto 2014 di *Landsat 8 LC08_L2SP*.

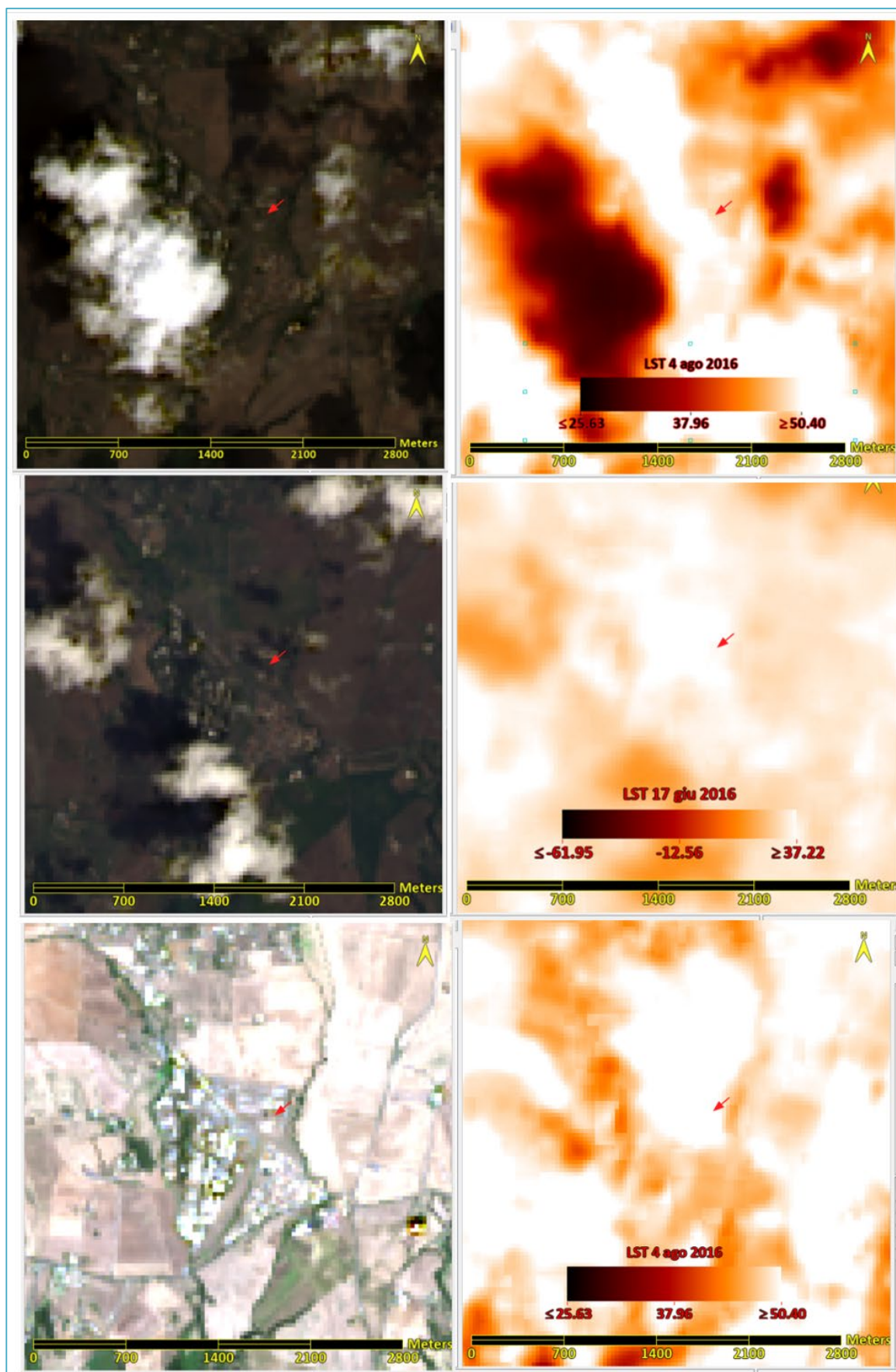


Figura 120. LST del del 15 agosto 2014, 17 giugno e 4 agosto 2016 centrata sull'area studio (C.R. ENEA Casaccia).

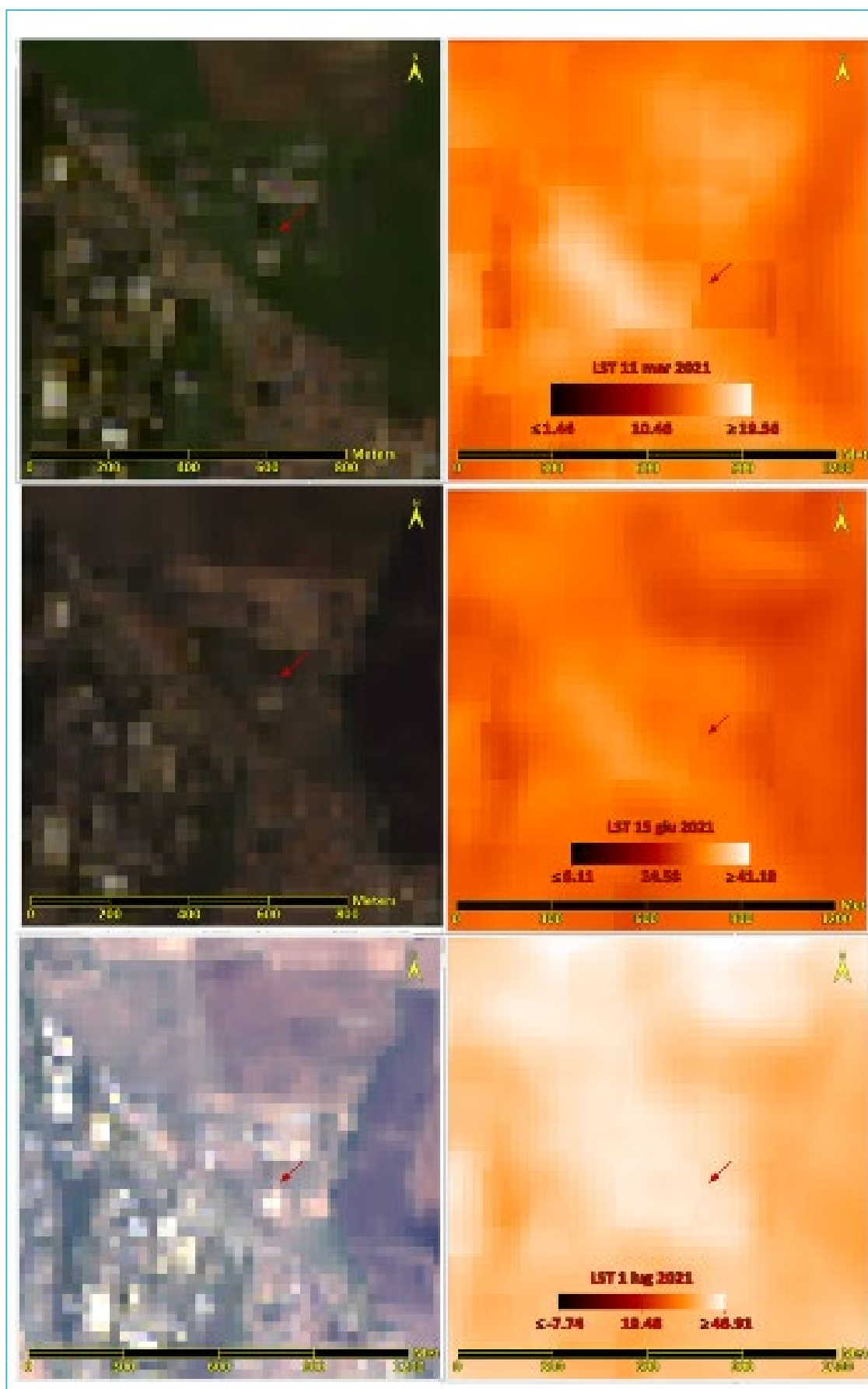


Figura 121. LST del del' 11 marzo, 15 giugno e 1 luglio 2021 centrata sull'area studio (C.R. ENEA Casaccia).

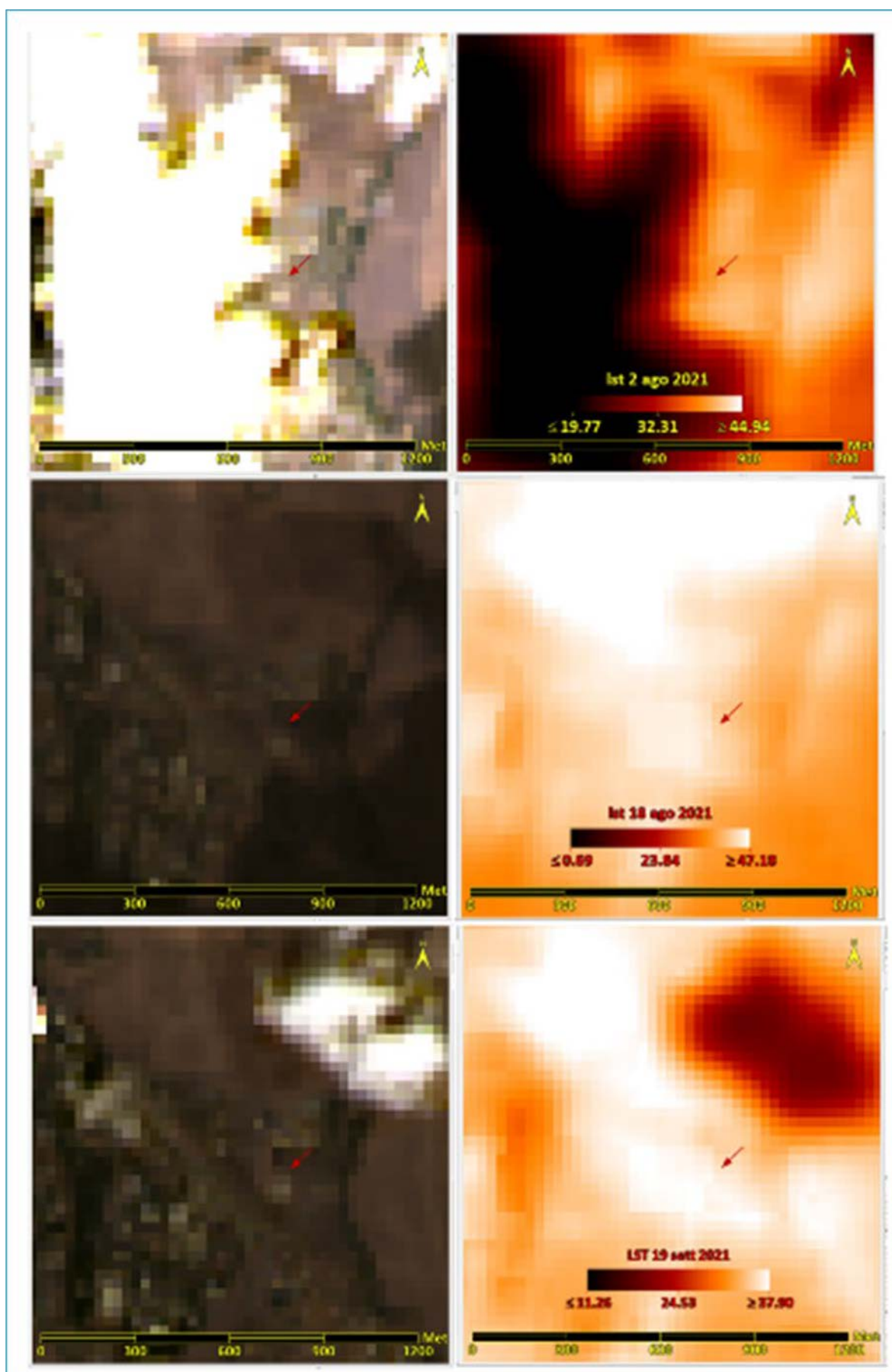


Figura 122. LST del 2 e 18 agosto, 19 settembre 2021 centrata sull'area studio (C.R. ENEA Casaccia).

Conclusioni

Si è proseguita sul *web* la raccolta ed analisi di scene satellitari dell'area in cui è collocato l'edificio prototipo, attingendo alle principali piattaforme di condivisione gratuite.

Lo studio dei due set di dati iperspettrali del 20 luglio e 12 agosto 2021 del satellite iperspettrale *PRISMA* ha permesso di verificare la potenza risolutiva dei moderni sensori commerciali: il *downscaling* mediante *pan sharpening* a 5 m di risoluzione spaziale è paragonabile ad un ortofoto, come le mappe di *NDVI* evidenziano nelle Figura 96, Figura 97, Figura 99 e Figura 100. Ciò implica la assoluta affidabilità di questi strumenti per intercettare e soddisfare i fabbisogni su scala territoriale in termini di pianificazione urbanistica con obiettivi di efficientemente energetico.

Tuttavia, la mancanza di acquisizioni nel campo del termico, *TIR (Thermal infrared)*, attesta ancora una volta la superiorità delle missioni *Landsat*, le uniche a coprire anche questo settore spettrale in regime di condivisione gratuita. In aggiunta la recente rielaborazione, Febbraio 2022, della collezione di *Landsat 8* livello 2 ha reso poi la disponibilità dei dati termici scalati a 30 metri di risoluzione spaziale: una opportunità formidabile per tutti gli studi sperimentali che naturalmente devono fare i conti con le dimensioni delle installazioni. La fusione dei dati (*Data fusion*) espande ulteriormente queste possibilità combinando le misurazioni di diversi sensori, fornendo informazioni arricchite rispetto allo sfruttamento individuale delle stesse fonti di dati.

La fusione dei dati tra *Landsat 8* e *Sentinel 2* ha consentito di sviluppare mappe di *NDVI* con risoluzione spaziale di 10 m, intercettando l'infrastruttura verde prototipo oggetto di indagine, come evidenziato dalle Figura 111, Figura 112, Figura 113, Figura 115, Figura 116, Figura 117e Figura 118.

Le mappe di *LST* ante, Figura 121, e *post* installazione delle infrastrutture verdi sull'edificio prototipo, e Figura 122, hanno 'visualizzato' l'effetto *cooling* del tetto e delle pareti verdi benché minimale: le *color bar* all'interno delle figure consentono di cogliere le differenze di segnale in ciascuna mappa che si accompagna sempre all'immagine in colori reali per consentirne una più facile individuazione.

Certamente dimensioni sperimentali più estese e/o multiple avrebbero rappresentato una base dati tale da consentire una analisi statistica puntuale e acclarare quantitativamente la relazione causa/effetto.

Ad ogni modo come evidenziato dalla recente letteratura scientifica [44] [43] la relazione tra l'indice *NDVI* e la *LST* è statisticamente negativa: all'aumentare del primo la seconda si riduce. Densi spazi verdi con elevati valori di *NDVI* hanno un effetto raffrescante maggiore sul clima circostante [56] [57] [58]: è stata stimata una riduzione media di circa 4°C [59].

Pertanto, gli strumenti di *remote sensing* & *GIS* possono contribuire efficacemente nella pianificazione territoriale in chiave di efficientamento energetico. Con il progredire della tecnologia e l'interoperabilità sempre più spinta tra le piattaforme disponibili questi strumenti sono destinati ad avere un ruolo sempre più fondante.

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 (LA2.3) ha considerato le infrastrutture verdi (tetto verde, parete verde e serra bioclimatica) 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 nel corso del terzo anno di sperimentazione RdS sono riportati di seguito.

A livello di **parete verde** l'andamento della concentrazione della CO₂ osservato nel 2021 ha confermato l'azione positiva delle pareti verdi sul controllo della concentrazione della CO₂ nell'ambiente circostante l'edificio ma anche l'influenza delle caratteristiche ambientali locali sulla concentrazione del gas in oggetto, in particolare l'importanza della velocità del vento e della vegetazione circostante. La sperimentazione per la quantificazione dei composti organici volatili appartenenti al gruppo dei BTEX dimostra che sia le pareti che i tetti verdi, attraverso l'assorbimento da parte della vegetazione, possono fornire un importante beneficio ambientale ai cittadini, quale quello della riduzione di inquinanti nell'aria. È auspicabile focalizzare la ricerca sulle specie vegetali più adatte, l'effetto della vegetazione su altri COV e negli ambienti interni. È stata sviluppata una semplice metodologia per stimare la trasmissione dei flussi termici che si è dimostrata valida e applicabile; è opportuno sottolineare, inoltre, che la relazione relativa al flusso termico entrante attraverso la parete protetta si potrebbe configurare come uno strumento di indagine utile all'operatore per selezionare la specie vegetale più idonea alle caratteristiche dell'edificio sul quale viene inserita la coltre vegetale ai fini del risparmio energetico associato alla riduzione di energia elettrica per il condizionamento estivo. Nelle ricerche future sarebbe auspicabile approfondire il tema della selezione di specie vegetali adatte a crescere in sistemi verdi verticali, con caratteristiche fogliari rispondenti all'obiettivo di massimizzare l'attenuazione dei flussi termici quando integrate nel tessuto costruttivo degli edifici di cui si potrà calcolare e approfondire anche il parametro Kv*.

A livello di **tetto verde** l'introduzione di una serie di piante opportunamente scelte sul tetto verde ha consentito di stimare la quantità di acqua evapotraspirata dalle piante, per vaso, per specie e per sistema complessivo verde e verificare che per tale processo il sistema verde assorbe una percentuale non indifferente (circa 30%) della potenza solare incidente, generando un carico latente anziché sensibile. Il monitoraggio dell'albedo del tetto verde, in relazione allo spessore della vegetazione, ha mostrato un andamento di tipo crescente: l'albedo aumenta all'aumentare dell'altezza del prato, passando da un valore pari a 20.5% nella situazione di prato appena tagliato ad un valore di 21.6% registrato a fine prova. Inoltre, quando l'altezza massima del prato si è mantenuta costante, ma nel tempo è aumentata la densità delle foglie l'albedo ha continuato ad aumentare. Nell'ambito della stessa specie, il monitoraggio ha messo in evidenza una differenza significativa di 1 punto percentuale (pp) dell'1% nel valore dell'albedo dovuta alla stagionalità e di conseguenza alla colorazione delle piante. Inoltre, tra i valori di albedo sul prato a Graminacee e quelli sul prato a *Sedum* rosso, misurati in periodi contigui ad inizio marzo 2021 (1-4 marzo per il prato a Graminacee e 6-9 marzo per il prato a *Sedum* rosso), è stata rilevata una differenza significativa di 4 pp. Tale differenza è ascrivibile all'ampia diversità esistente tra le due specie vegetali, incluse la loro colorazione e altre caratteristiche morfo-fisiologiche, tra le quali la tipologia dello strato ceroso che ricopre i tessuti vegetali delle piante delle due specie.

Le coperture vegetali, secche in estate, sarebbero da privilegiare in tutte quelle aree mediterranee dove il risparmio idrico costituisce un'esigenza primaria. Purtroppo, nonostante un tetto verde a prato naturale, con senescenza estiva, offra vantaggi ambientali, idrici, energetici, oltre che di costi di impianto e manutenzioni, l'opinione pubblica nazionale è ancora piuttosto scettica nell'accettazione dell'ingiallimento di tale tipologia di prato in estate. Il monitoraggio delle temperature superficiali misurate sul tetto durante questo triennio conferma con certezza che la presenza di un manto vegetale adagiato sulla superficie di un lastrico solare in estate limita significativamente il flusso di calore all'interno dell'edificio (più specificamente nell'ambiente adiacente sottostante), consentendo di risparmiare elettricità per il raffrescamento ed in inverno limita gli effetti degli sbalzi di temperatura dell'aria che si susseguono tra il giorno e la notte, mantenendo una temperatura più costante sulla superficie del tetto e di conseguenza all'interno dell'edificio (più specificamente nell'ambiente adiacente sottostante), consentendo di risparmiare energia per il riscaldamento. L'analisi energetica relativa al periodo di fine primavera estate 2021, da maggio ad agosto, periodo in cui si verificano i maggiori flussi termici entranti, ha confermato la maggiore capacità isolante del tetto verde, alla quale corrisponde una riduzione dei consumi di energia elettrica per la climatizzazione estiva grazie alla riduzione di circa l'80% dei flussi termici entranti nell'edificio. La differenza tra i flussi termici trasmessi, rilevata tra il tetto non coperto ($5,88 \text{ kWh}_t/\text{m}^2$) e quello verde ($1,20 \text{ kWh}_t/\text{m}^2$), è risultata pari a $4,68 \text{ kWh}_t/\text{m}^2$, che approssimativamente rappresenta una riduzione di energia elettrica per il condizionamento estivo di circa $101,18 \text{ kWh}_{el}$ sull'intera superficie di 80 m^2 . L'attività sperimentale ha evidenziato che i tetti verdi costituiscono una strategia utile per migliorare la sostenibilità energetica e ambientale degli edifici.

La **serra bioclimatica** ha per sua natura una temperatura dell'aria interna maggiore di quella esterna, nell'estate del 2021 queste differenze hanno oscillato tra 14 e 18°C , confermando i dati del 2020. La sola apertura delle finestrature, per favorire la ventilazione, riduce queste differenze a circa $4,5$ - 5°C . L'introduzione della vegetazione riduce ulteriormente queste differenze portandole, in determinati momenti della giornata, quasi ad annullarle. Nel corso del 2021, l'integrazione nella serra dell'illuminazione a LED ha consentito di abbassare ulteriormente gli oscuranti fino a toccare il davanzale e questo ha permesso un ulteriore contenimento delle temperature interne, anche rispetto a quanto ottenuto nel corso del 2020 in cui gli oscuranti non coprivano completamente le finestre. Questo ha consentito di ribaltare la differenza di temperatura dell'aria tra interno ed esterno della serra portandola fino a 4°C al di sotto di quella esterna ($\Delta T = -4^\circ\text{C}$). L'uso degli oscuranti (serra ombreggiata) ha reso il microclima all'interno della serra più fresco, e l'accensione delle luci LED, ha consentito di migliorare l'illuminazione a disposizione del processo fotosintetico delle piante nella serra ombreggiata determinandone un vantaggio. L'introduzione delle luci a LED ha infatti permesso un maggior sviluppo delle piante rispetto al 2020 e quindi maggiore potere evapotraspirativo, pertanto, questa risulta essere la situazione più favorevole, in termini termici, all'uso della serra nel periodo estivo. In queste condizioni anche la capacità produttiva delle piante è paragonabile a quanto è stato ottenuto sul tetto verde in pieno sole. I risultati del 2020 e del 2021 dimostrano 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.

La fusione dei dati tra *Landsat 8* e *Sentinel 2* ha consentito di sviluppare mappe di *NDVI* con risoluzione spaziale di 10 m , intercettando l'infrastruttura verde prototipo oggetto di indagine. Le mappe di *LST* ante e post installazione delle infrastrutture verdi sull'edificio prototipo hanno 'visualizzato' l'effetto *cooling* del tetto e delle pareti verdi benché minimale. Certamente dimensioni sperimentali più estese e/o multiple avrebbero

rappresentato una base dati tale da consentire una analisi statistica puntuale e acclarare quantitativamente la relazione causa/effetto.

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 Riferimenti bibliografici

- [1] MATTM, «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, A. Latini e Mariani S, «Efficienza energetica eco-sostenibile per la rigenerazione delle città,» *Energia, Ambiente e Innovazione*, 3/2020, 2020.
- [3] L. Sturiale e A. Scuderi, «The role of green infrastructures in urban planning for climate change adaptation,» *Climate*, 2019, 7, 119.
- [4] F. Salvo, P. Piro, G. Nigro e M. De Ruggiero, «Modello economico di stima dei tetti verdi negli edifici residenziali,» *Valori e Valutazioni*, 2017, 18, 81-88.
- [5] C. Campiotti, P. De Rossi, G. Giagnacovo, A. Latini, S. Mariani, L. Nencini, S. Pace e M. Sperandei, «Infrastrutture "verdi" per edifici per migliorare l'efficienza energetica degli edifici e la qualità del microclima nelle aree urbane,» vol. Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PAR2020, 2020.
- [6] «Global Monitoring Laboratory – Earth System Research Laboratories. Trends in atmospheric carbon dioxide,» [Online]. Available: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>.
- [7] M. Manso e J. Castro-Gomes, «Green wall systems: A review of their characteristics,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41, 863-871. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>.
- [8] M. Marchi, R. Pulselli, N. Marchettini e F. Pulsell, «Carbon dioxide sequestration model of a vertical greenery system,» 2015, 306, 46-56. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.08.013>.
- [9] L. E. Mitchell, J. Lin, D. Bowling, D. Patak, . C. Strong, A. J. Schauer, R. Bares, S. Bush, B. B. Stephens, D. Mendoza, D. Mallia, L. Holland, . K. R. Gurney e . J. R. Ehleringer, «Long-term urban carbon dioxide observations reveal spatial and temporal dynamics related to urban characteristics and growth,» *PNAS*, 2018, 115, 2912-2917. doi/10.1073/pnas.1702393115.
- [10] I. A. Pérez, M. de los Ángeles García, M. L. Sánchez e N. Pardo, «Influence of Wind Speed on CO₂ and CH₄ Concentrations at a Rural Site,» *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021, 18: 8397. <https://doi.org/10.3390/ijerph18168397>.
- [11] E. David e V. Niculescu, «Volatile organic compounds (VOCs) as environmental pollutants: occurrence and mitigation using nanomaterials,» *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, 2021, 18: 13147.
- [12] S. Lee, M. Chiu, K. Ho, S. Zou e Xinming Wang, *Chemosphere*, 2002, 48: 375-382.
- [13] F. Bianchi e R. Carratù, La trasmissione del calore-Fisica tecnica applicata, Aracne Collana, 2005.
- [14] G. Parolin, A. Del Monaco e D. M. Fontana, «Fondamenti di fisica tecnica,» *Torino: UTET, XII*, 1983, 797.
- [15] F. Ariaudo, S. Corgnati, G. Fracastoro e D. Raimondo, Cooling load reduction by green walls: results from an experimental campaign., Researchgate, 2009.
- [16] Santamorius, «Cooling the cities – a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments,» *Solar Energy*, 2014, 103, 682-703.
- [17] M. Zinzi, «Cool materials and cool roofs: potentialities in Mediterranean buildings,» *Adv. Build. Energy Res*, 2010, 4, 201-266.
- [18] T. Theodosiou, «Green roofs in buildings: thermal and environmental behaviour,» *Adv. Build. Energy Res.*, 2011, 3, 271-288.
- [19] M. Simmons, B. Gardiner, S. Windhager e J. Tinsley, «Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate,» *Urban Ecosyst.*, 2008, 11: 339-48.
- [20] R. Berto, G. Cechet e C. Staival, «Capitolo 3. Le prestazioni connotanti delle coperture verdi,» in *Le*

coperture verdi. Implicazioni tecnologiche, strutturali, energetiche ed economico-sociali, Edizioni Università Trieste, 2015.

- [21] C. Campiotti, P. De Rossi, G. Giagnacovo, A. Latini, L. Nencini, S. Pace e M. Sperandei, «Infrastrutture “verdi” per migliorare l’efficienza energetica degli edifici e la qualità del microclima nelle aree urbane.,» vol. Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PAR2019/04, 2019.
- [22] ISPRA, «Piante e insetti impollinatori: un'alleanza per la biodiversità. Serie Rapporti 350/2021.,» 2021. [Online]. Available: https://development.isprambiente.gov.it/files2021/pubblicazioni/rapporti/rapporto-ispra-350_21.pdf.
- [23] L. Dicks, T. Breeze, H. Ngo, D. Senapathi, J. An, M. Aizen e e. al., «A global-scale expert assessment of drivers and risks associated with pollinator decline,» *Nat. Ecol. Evol.*, 2021, 5, 1453-1461.
- [24] W. Nicole, «Pollinator power: nutrition security benefits of an ecosystem service,» *Environ. Health Perspect.*, 2015, 123, A210–A215.
- [25] Commissione Europea, «Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities. Rapporto finale del gruppo di Esperti Horizon 2020 su “nature-based solutions and re-naturing cities”,» 2015.
- [26] Direttiva sui Tetti Verdi, «Dachbegrünungsrichtlinien. Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltungen von Dachbegrünungen.,» *FLL*, 2018.
- [27] Commissione Europea, «EU Biodiversity Strategy for 2030. Bringing nature back into our lives,» *COM/2020/380 final*, 2020.
- [28] S. Benvenuti e D. Bacci, «Initial agronomic performances of Mediterranean xerophytes in simulated dry green roofs.,» *Urban Ecosyst.*, 2010, 13, 349-363.
- [29] E. Oberndorfer, J. Lundholm, B. Bass, R. Coffman, H. Doshi, N. Dunnet, S. Gaffin, M. Köhler, K. Liu e B. Rowe, «Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions and services.,» *BioScience*, 2007, 57, 823-833.
- [30] D. Rowe, K. Getter e A. Durham, «Effect of green roof media depth on Crassulacean plant succession over seven years.,» *Landsc. Urban Plan.*, 2012, 104, 310-319.
- [31] C. Van Mechelen, «Nature as a template for a new concept of extensive green roofs.,» *Agricultural sciences, Université d’Avignon*, n. NNT: 2015AVIG0334, 2015.
- [32] C. Piggin, «The biology of Australian weeds. 8. *Echium plantagineum* L.,» *J. Australian Inst. Agric. Sci.*, 1982, 48, 3-16.
- [33] K. Klemow, D. Clements, P. Threadgill e Cavers PB, «*Echium vulgare* L.,» *Can. J. Plant Sci.*, 2002, 82, 235-248.
- [34] S. Pignatti, *Flora d’Italia*, Bologna: Edagricole, 1982.
- [35] ISPRA, *Specie erbacee spontanee Mediterranee per la riqualificazione di ambienti antropici. Serie Rapporti 86/2013*, ISBN 978-88-448-0590-6, 2013.
- [36] D. Hicks, P. Ouvrard, K. Baldock, M. Baude, M. Goddard e et al., «Food for pollinators: quantifying the nectar and pollen resources of urban flower meadows.,» *PLOS ONE*, vol. 11, n. e0158117, 2016.
- [37] S. Rivest e J. Forrest, «Defence compounds in pollen: why do they occur and how do they affect the ecology and evolution of bees? *New Phytol.*,» *New. Phytol.*, 2020, 225, 1053-1064.
- [38] CABI, «Invasive Species Compendium.»
- [39] I. Papagni, A. Latini, L. Gatti, P. De Rossi, G. Giagnacovo, C. Campiotti, M. Sprandei, M. Serafini e S. Mariani, «Studio del genere *Echium*: suo utilizzo nel verde urbano pensile.,» in *Biodiversità 2021*, 2021.
- [40] X. Zhu, P. Weston, D. Skoneczny, D. Gopurenko, L. Mejer, B. Lepschi e et al., «Ecology and genetics affect relative invasion success of two *Echium* species in southern Australia.,» *Sci. Rep.*, 2017, 7, 42792.
- [41] D. Dagenais, Gagnon C e J. Pellettier, «Development of design criteria to improve aesthetic appreciation of extensive green roofs (EGR),» *Acta Hortic.*, 2010, 881, 703-708.
- [42] ISPRA, *Fattori di emissione atmosferica di gas a effetto serra nel settore elettrico nazionale e nei principali*

Paesi Europei., Edizione 2020. ISBN: 978-88-448-0992-8.

- [43] H. Gherraz, I. Guechi e D. Alkama, «Quantifying the effects of spatial patterns of green spaces on urban climate and urban heat island in a semi-arid climate,» *Bullettin de la Societe' Royale des sciences de Liege*, vol. 89, pp. 164-185, 2020.
- [44] H. Gherraz e D. Alkama, «L'estimation de l'impact des espaces verts et des surfaces d'eau sur le climat urbain et la temperature de surface du sol (Mila, Algerie),» *Romanian Journal of Geography*, 2020, 2, 64:155-174.
- [45] R. Schiavon, *Satelliti Landsat 8 e Sentinel-3 per l'identificazione delle aree interessate da schianti di vento: il caso Vaia*, tesi di laurea, 2019.
- [46] F. Masini, *Realizzazione di una applicazione per immagini iperspettrali*, Tesi di laurea magistrale, 2013.
- [47] C. A. Campiotti, P. De Rossi, G. Giagnacovo, A. Latini, S. Mariani, L. Nencini, S. Pace e M. Sperandei, «Infrastrutture "verdi" per migliorare l'efficienza energetica degli edifici e la qualita' del microclima nelle aree urbane. Report di ricerca di sistema elettrico,» RdS/PAR2019/042, 2021.
- [48] ASI, «PRISMA - Agenzia Spaziale Italiana,» [Online]. Available: <https://www.asi.it/scienze-della-terra/prisma/>.
- [49] ASI, «Pagina di autenticazione per l'accesso alla piattaforma PRISMA,» [Online]. Available: <https://prisma.asi.it/>.
- [50] K. Maria, V. Kristollari, V. Karathanassi, K. Topouzelis, P. Kolokoussis, N. Taggio, A. Aiello, G. Ceriola, E. Barbone e P. Corradis, «Pansharpening PRISMA Data for Marine Plastic Litter Detection Using Plastic Indexes,» *IEEE Access*, vol. 9, pp. 61955 - 61971, 2021.
- [51] NASA, «USGS science for a changing world,» [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/programs/national-land-imaging-program/news/landsat-9-data-release-extends-unparalleled-earth>.
- [52] NASA, «USGS EarthExplorer,» [Online]. Available: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- [53] «M2M,» [Online]. Available: <https://m2m.cr.usgs.gov/>.
- [54] USGS, «Landsat Collection 2,» [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2>.
- [55] K. Saylor, «Landsat 8 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide,» U.S. Geological Survey, 2020.
- [56] L. Boudjellal e F. Bourbia, «An evaluation of the cooling effect efficiency of the oasis structure in a saharan town through remotely sensed data,» *International Journal of Environmental Studies*, 2018, 2, 75:309-320.
- [57] G. Qiu, Z. Zou, X. Li, Q. Guo, C. Yan e S. Tan, «Experimental studies on the effects of green space and evapotranspiration on urban heat island in a subtropical megacity in China,» *Habitat international*, 2017, 68, 30-42.
- [58] B. Chun e J. Guldman, «Impact of greening on the urban heat island: Seasonal variations and mitigation strategies,» *Computers, Environment and urban system*, 2018, 71, 165-176.
- [59] H. Gherraz, I. Guechi e A. Benzaoui, «Strategy to improve outdoor thermal comfort in open public space of a Desert city, Ouargla, Algeria,» *In IOP Conference Series: Earth and Environmental science*, 2018, 151.