



ANALISI MODELLISTICA MICROCLIMATICA

**Studio modellistico previsionale dei
potenziali effetti attesi sul microclima, comfort
termico e qualità dell'aria dell'impianto
agrivoltaico denominato "RNE21" sito nel
comune di San Pietro in Casale (BO)**

A cura di
Dott.ssa Elisa Gatto, PhD
Biologa





Sommario

Introduzione	3
1. ENVI-met: set up modellistico	4
2. Rischi climatici dell'area	7
2.1. Variazione della temperatura annuale	7
2.2. Variazione delle precipitazioni annuali	8
2.3. Anomalie mensili	8
3. Parametri modellistici investigati.....	9
<i>Calcolo del comfort termico: l'indice Universal Thermal Climate Index UTCI</i>	9
4. Analisi dei servizi ecosistemici legati allo stoccaggio e assorbimento di inquinanti	10
5. Analisi dei servizi ecosistemici legati alla sfera microclimatica e termica	12
5.1. Analisi dell'impatto del progetto agrivoltaico.....	16
5.1.1. Dinamica diurna: l'effetto "Cool Island" e la conservazione idrica.....	16
5.1.2. Analisi del bilancio idrologico superficiale	17
5.1.3. Regime aerodinamico e campo di vento	17
5.1.4. Regime radiativo notturno	18
6. Conclusione	19
ALLEGATO I: Mappe spaziali diurne	21
ALLEGATO II: Mappe spaziali notturne	27



Introduzione

Facendo seguito alle **richieste di integrazione** del **Dipartimento di Sanità Pubblica Programma Ambiente e Salute (SSD)** dell'AUSL di Bologna (Prot. 07/05/2025.0451679.E) , rese nell'ambito del **Procedimento Autorizzatorio Unico di VIA** per l'impianto **agrivoltaico avanzato denominato RNE21**, il presente elaborato affronta la **specificata richiesta di una valutazione previsionale degli impatti cumulativi sull'alterazione del campo termico** (isola di calore da fotovoltaico).

Tale valutazione è condotta confrontando il **microclima ante-operam e post-operam** in riferimento all'area circostante l'impianto, in linea con le **Linee Guida Arpav**. Per adempiere a questa richiesta, il presente elaborato **valuta la conformità del progetto** con riferimento ai **potenziali effetti microclimatici locali** sviluppando una **modellazione fluidodinamica computazionale**, mediante il **modello ENVI-met**, del layout ingegneristico e agronomico di progetto.

Tale approccio metodologico contribuisce a una **valutazione oggettiva dei potenziali impatti ambientali del progetto**, fornendo una **solida base scientifica per le decisioni e le misure di mitigazione necessarie** per mitigare i potenziali impatti negativi e massimizzare i benefici derivanti dall'impianto.

Un impianto per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile offre un potenziale significativo per la mitigazione delle emissioni di gas serra e per la sicurezza alimentare. Tuttavia, è essenziale comprendere appieno gli effetti microclimatici correlati, al fine di garantire un equilibrio ottimale tra le **esigenze agricole** e la **stabilità del clima locale**. Attraverso l'impiego di modelli di simulazione avanzati come ENVI-met, siamo in grado di valutare con precisione e dettaglio le variazioni microclimatiche che potrebbero emergere a seguito dell'integrazione di un sistema agrivoltaico nel paesaggio considerato.

🔍 Nello specifico sono investigati (i) **parametri microclimatici**: temperatura dell'aria (T_{air}), umidità relativa atmosferica (RH_{air}), velocità del vento (WS), temperatura delle superfici (T_{surf}), umidità del suolo (RH_{soil}), (ii) l'indice di **comfort termico** *Universal Thermal Climate Index* (UTCI); (iii) la **qualità dell'aria** in termini di concentrazione (ppm) di CO₂ atmosferica.

Il presente approccio metodologico è stato validato in studi scientifici pubblicati in riviste internazionali sottoposte a *peer-review*¹.

¹ Gatto, E., Beccarisi, L., Marinosci, B., Polito, C., Tamborrino, C., Taddeo, A., & Monteleone, M. (2025). Enhancing Olive Production in Mediterranean Agrivoltaic Systems: A Microclimatic Analysis Using Computational Fluid Dynamics



1. ENVI-met: set up modellistico

Il modello ENVI-met (Bruse & Fler, 1998) rappresenta l'ambiente come un **sistema integrato**, nel quale le componenti del paesaggio urbano o rurale – incluse la vegetazione, le superfici costruite e gli elementi naturali – interagiscono in modo dinamico e interdependente. ENVI-met è particolarmente utile nella valutazione di impatto di nuovi interventi di *urban-design* in quanto è in grado di simulare in modo preventivo gli effetti dovuti a determinate azioni fornendo previsioni utili e numeriche sull'impatto ambientale di nuove strutture o aree verdi.

Il modello di calcolo implementato comprende:

- ✓ flussi di radiazioni su tutto lo spettro, dall'infrarosso all'ultravioletto, rispettando l'ombreggiamento, la riflessione e l'emissione delle radiazioni dal sistema di edifici e vegetazione;
- ✓ traspirazione, evaporazione e flussi di calore sensibile dalla vegetazione nell'aria;
- ✓ simulazione completa dei fattori fisici delle piante, come ad esempio la reazione di fotosintesi ed i suoi effetti;
- ✓ temperatura delle superfici dell'area di simulazione (edifici e suolo);
- ✓ scambi di calore e di acqua all'interno del suolo;
- ✓ calcolo indici biometeorologici dei fruitori dell'area in analisi;
- ✓ dispersione di gas inerti e particolato e sedimentazione su superfici e foglie;
- ✓ flussi d'aria e turbolenze, dati relativi al vento.

Il file denominato "Area" è stato generato utilizzando il plugin dedicato di ENVI-met per QGIS, che consente di definire e preparare l'area di studio per la simulazione modellistica. Nello specifico, tale file contiene principalmente le informazioni geometriche e spaziali necessarie per descrivere accuratamente il dominio di simulazione, incluse dimensioni, estensione, orientamento geografico e coordinate di riferimento del modello analizzato.

Per valutare l'impatto del progetto, sono stati simulati due scenari, generando così due distinte "aree": lo **scenario allo stato di fatto, corrispondente alla condizione ante-operam** (scenario

Modeling: Insights From the "Borgo Monteruga" Project in Southern Italy. AgriVoltaics Conference Proceedings, 3. <https://doi.org/10.52825/agripv.v3i.1364>

Gatto, E., Buccolieri, R., Aarrevaara, E., Ippolito, F., Emmanuel, R., Perroncel, L., Santiago, J.L., 2020. Impact of urban vegetation on outdoor thermal comfort: comparison between a Mediterranean city (Lecce, Italy) and a Northern European city (Lathi, Finland). *Forests* 11, 228.

Gatto, E., Buccolieri, R., Perroncel, L., Santiago, J.L. 2021. The Challenge in the Management of Historic Trees in Urban Environments during Climate Change: The Case of Corso Trieste (Rome, Italy). *Atmosphere*, 12, 500.

Gatto, E., Ippolito, F., Rispoli, G., Carlo, O.S., Santiago, J.L., Aarrevaara, E., Emmanuel, R., Buccolieri, R. 2021. Analysis of Urban Greening Scenarios for Improving Outdoor Thermal Comfort in Neighbourhoods of Lecce (Southern Italy). *Climate*, 9, 116.

attuale), e lo **scenario agrivoltaico**, modellato sulla base delle soluzioni agronomiche previste dal progetto, del layout impiantistico pianificato e dell'inserimento delle aree destinate alle misure di compensazione e mitigazione ambientale. Sono state elaborate e presentate **mappe di distribuzione spaziale** dei parametri microclimatici, focalizzando l'analisi sui risultati ottenuti in corrispondenza dell'**orario di massimo irraggiamento solare** (ore 13:00) e del **picco di emissione termica notturna** (ore 22:00). Questa selezione temporale è stata effettuata per caratterizzare compiutamente l'**effetto isola di calore urbana da fotovoltaico (F-UHI)**, valutando in particolare:

1. La **dispersione del calore** e l'impatto sulla **temperatura dell'aria** e sulla **temperatura superficiale** durante la fase di **massimo assorbimento/rilascio di energia** diurna.
2. La persistenza e l'intensità dell'accumulo termico notturno (o **rilascio convettivo termico notturno**) in relazione al potenziale impatto sui ricettori sensibili e sulla ventilazione locale.

L'estrazione dei dati nelle ore selezionate permette quindi una **diagnosi microclimatica** del fenomeno in entrambe le sue manifestazioni critiche (diurna e notturna).

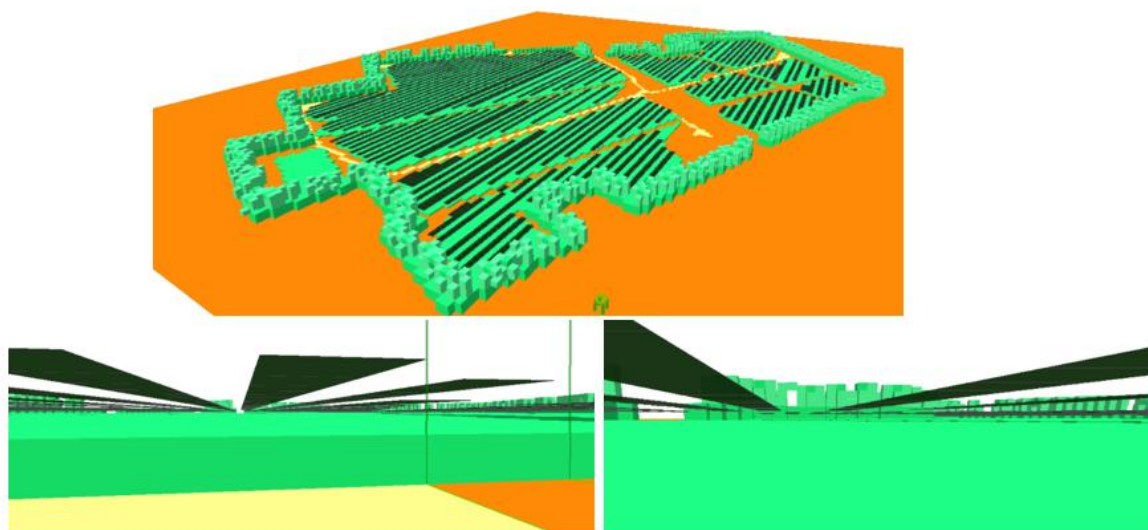


Figura 1: Dominio computazionale 3D dello scenario agrivoltaico in ENVI-met con dettagli.

Per modellare l'area di lavoro e svolgere i calcoli associati ad equazioni di bilancio, lo spazio del modello di simulazione viene discretizzato in volumi finiti. Il file "Area" è costituito da celle tridimensionali scelte ed impostate in fase iniziale. Nello specifico, **la dimensione di ogni singola cella nel dominio computazionale della presente elaborazione modellistica è di 2 m (asse x) x 2m (asse y) x 2m (asse z)**. L'area simulata in 3D (dominio computazionale) nei due scenari "attuale"



e “agrivoltaico” ha una dimensione di 756 m (asse x) x 660 m (asse y), con un'altezza verticale di 25 m.

Per determinare l'andamento giornaliero della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa è stata fissata come dato in ingresso la temperatura minima (T_{min}), la temperatura massima (T_{max}) e l'umidità relativa minima e massima (RH_{min} , RH_{max}) prendendo in considerazione un tipico giorno estivo. La definizione del regime anemometrico è stata ottenuta, in assenza di rilievi *in situ*, attraverso l'elaborazione delle **rose dei venti** pubblicate nei report ARPAE sulla qualità dell'aria (periodo 2016-2021) per l'area di riferimento più prossima (città di Bologna). I dati pluriennali indicano valori di velocità fino a 3 m/s e correnti provenienti dal **settore sud-ovest**.

Nel modello è stata impostata in input la direzione del vento pari a 225° e una velocità di 3 m/s.

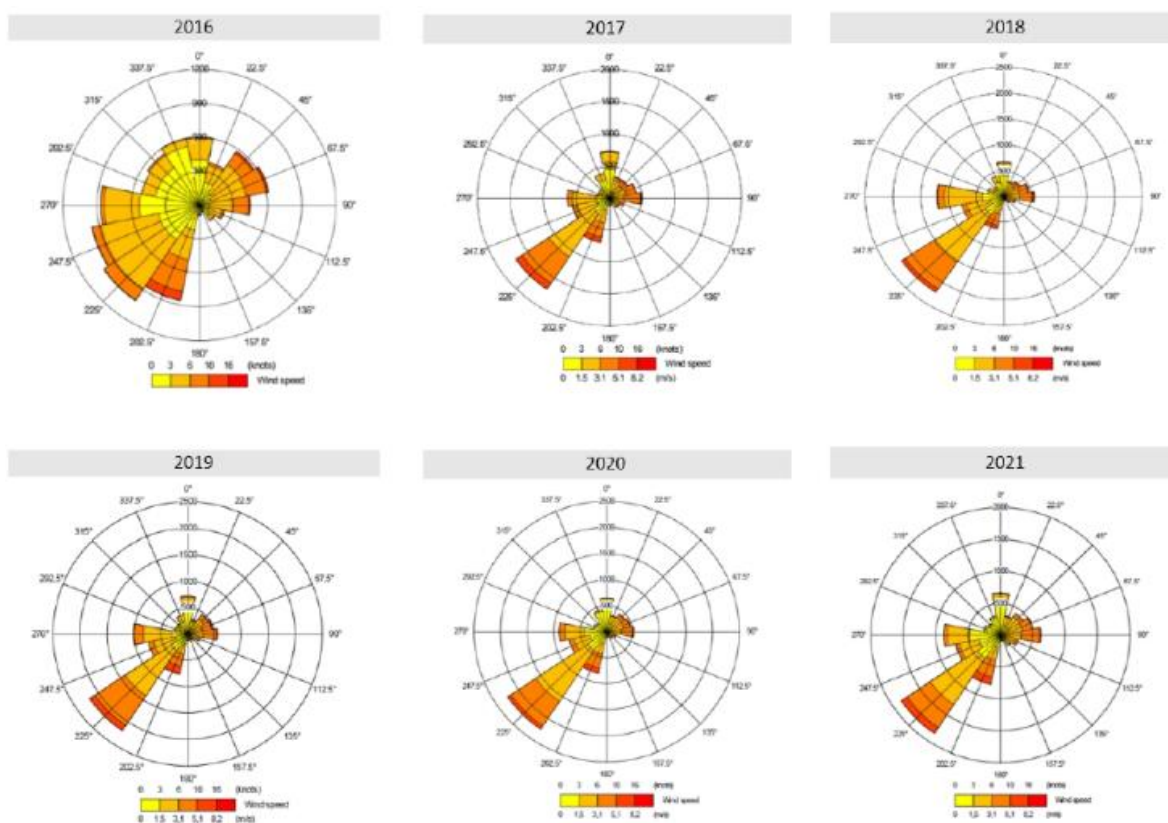


Figura 2: Rose dei venti della stazione di Bologna per il periodo compreso tra il 2016 ed il 2021 (Fonte: ARPA Emilia-Romagna – da Relazione pedo-agronomica e di progetto agricolo)

Il suolo è stato caratterizzato utilizzando il database di ENVI-met e per la rappresentazione della vegetazione sono state impiegate i modelli 3D delle specie presenti disponibili nel database *Albero* di ENVI-met.



2. Rischi climatici dell'area

L'analisi del rischio climatico rappresenta una fase preliminare essenziale per garantire la sostenibilità a lungo termine degli investimenti, in linea con i principi del *climate proofing* e le raccomandazioni dell'Unione Europea in materia di adattamento ai cambiamenti climatici. In tale contesto, l'utilizzo di modelli microclimatici avanzati come ENVI-met risulta fondamentale per valutare l'impatto locale di un impianto agrivoltaico. La simulazione deve essere supportata da una solida base climatica storica e previsionale.

A tal fine, i dati climatici utilizzati per la caratterizzazione del sito di progetto sono stati estratti dal modello globale ERA5T, uno dei dataset più aggiornati e ad alta risoluzione attualmente disponibili, sviluppato dal *Copernicus Climate Change Service*. I grafici sottostanti sintetizzano l'evoluzione dei principali parametri climatici nell'area di San Pietro in Casale (BO) per il periodo 1979–2024.

2.1. Variazione della temperatura annuale

Il grafico in Figura 3 mostra l'andamento della temperatura media annua, con una chiara tendenza all'aumento (linea tratteggiata blu) che riflette un incremento complessivo delle temperature di circa $+1.5^{\circ}\text{C}$ negli ultimi quattro decenni. Le *anomaly stripes* in basso evidenziano un passaggio graduale da anomalie termiche negative (colori freddi) negli anni '80-'90 a persistenti anomalie positive (toni caldi) a partire dagli anni 2000, con una marcata intensificazione dopo il 2010. Questo trend è coerente con l'aumento della frequenza di eventi estremi come ondate di calore, che rappresentano un rischio diretto per la stabilità microclimatica dell'area.

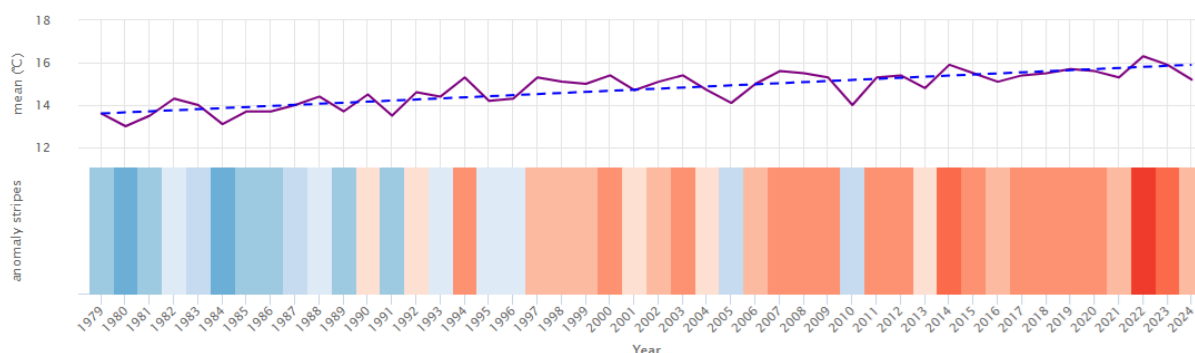


Figura 3: Analisi della variazione delle temperature annuali nel dataset storico 1979-2024; Modello: ERA5T.



2.2. Variazione delle precipitazioni annuali

La Figura 4 illustra la variazione delle precipitazioni annuali nel dataset storico investigato. Nonostante una sostanziale stabilità nella media (intorno ai 1.000 mm/anno), si osserva un'elevata variabilità interannuale e una maggiore frequenza di anni con anomalie negative (tonalità giallo-brune), soprattutto negli ultimi due decenni. Questo dato suggerisce una crescente irregolarità del regime pluviometrico, con potenziali implicazioni sul bilancio idrico, sulla salute degli ecosistemi agricoli e sulla resilienza degli impianti agrivoltaici.

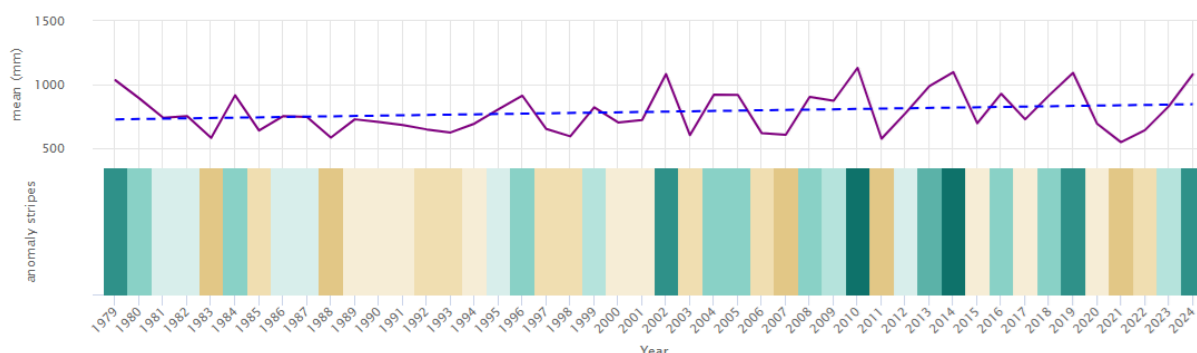


Figura 4: Analisi della variazione delle precipitazioni annuali nel dataset storico 1979-2024; Modello: ERA5T.

2.3. Anomalie mensili

Le anomalie mensili combinate di temperatura e precipitazione (Figura 5) evidenziano un progressivo aumento della frequenza e dell'intensità di scostamenti positivi nella temperatura (barre rosse) e una crescente alternanza tra surplus e deficit idrici, che confermano la tendenza all'instabilità climatica. In particolare, nei mesi estivi (es. luglio), si registra un riscaldamento continuo dal 2000 in poi, accompagnato da un decremento delle precipitazioni accentuando il rischio di stress termico e idrico per la vegetazione e per il sistema suolo-aria.

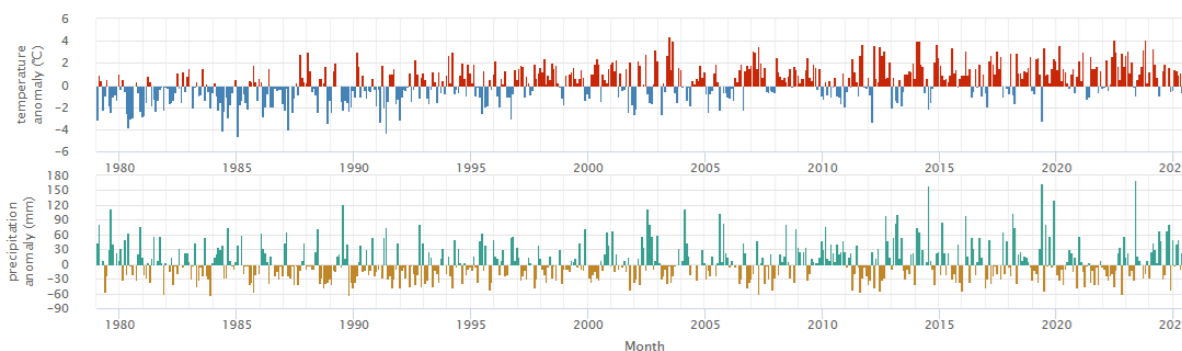


Figura 5: Anomalie mensili del dataset investigato; Modello ERA5T



Valutato il quadro climatico delineato, caratterizzato da un progressivo incremento delle temperature medie, da anomalie termiche sempre più persistenti e da una crescente irregolarità del regime pluviometrico, risulta evidente la **necessità di adottare strategie agricole resilienti e adattive**.

Durante l'esercizio dell'impianto, sarà avviato un **monitoraggio ambientale** specifico, volto a tenere sotto controllo l'evoluzione delle condizioni microclimatiche e a verificare l'effettiva efficacia delle soluzioni adottate. Il **monitoraggio permetterà non solo di validare i risultati modellistici, ma anche di individuare eventuali criticità e ottimizzare le pratiche agronomiche e gestionali, garantendo nel tempo la sostenibilità ambientale e climatica dell'intervento**.

3. Parametri modellistici investigati

L'impatto sul **microclima** del progetto di rigenerazione proposto è stato valutato con ENVI-met nei vari scenari in termini di **temperatura dell'aria (Tair)**, **umidità relativa atmosferica (RH)**, **velocità del vento (WS)**, **temperatura delle superfici (Tsurf)**, **umidità relativa del suolo (RH soil)**. Lo studio dell'indice dell'*Universal Thermal Climate Index UTCI* ha permesso invece di valutare l'impatto delle scelte progettuali sul **comfort termico**.

Calcolo del comfort termico: l'indice Universal Thermal Climate Index UTCI

L'UTCI rappresenta uno strumento avanzato per la valutazione del comfort termico umano in ambienti esterni. Considerando una vasta gamma di variabili meteorologiche, offre una rappresentazione dettagliata del comfort fisiologico e della reazione del corpo umano alle condizioni ambientali.

L'UTCI è stato sviluppato come indice bioclimatico standardizzato per facilitare l'analisi comparativa del comfort termico in diverse regioni geografiche e climatiche. L'indice integra variabili come la temperatura dell'aria, l'umidità, la velocità del vento e la radiazione solare diretta e diffusa e permette di caratterizzare con precisione la percezione termica individuale, incorporando anche la risposta termofisiologica del corpo a un insieme complesso di condizioni ambientali.

Si basa sul *Munich Energy Balance Model for Individuals* (MEMI) che definisce l'equazione del corpo umano come:

$$M + W + R + C + ED + ERe + ES_{w} + S = 0$$

dove M è l'attività metabolica, W è il lavoro fisico prodotto, R è la radiazione netta del corpo, C è il flusso di calore convettivo, ED è il flusso di calore latente che si diffonde attraverso la pelle sotto forma di vapore acqueo, ERe è la somma dei flussi di calore per il riscaldamento e l'umidificazione dell'aria inspirata, ESw è il flusso di calore dovuto all'evaporazione del sudore, S è il flusso di calore di accumulo per il riscaldamento o il raffreddamento della massa corporea. Tutti i valori sono espressi in *watt*.

L'indice UTCI è stato calcolato da ENVI-met che ha rielaborato i flussi di radiazione all'interno dell'area investigata, la temperatura dell'aria, la velocità del vento e la radiazione solare.

La Figura 3 riporta le **10 categorie di stress termico UTCI** che corrispondono a specifiche risposte fisiologiche umane all'ambiente termico.

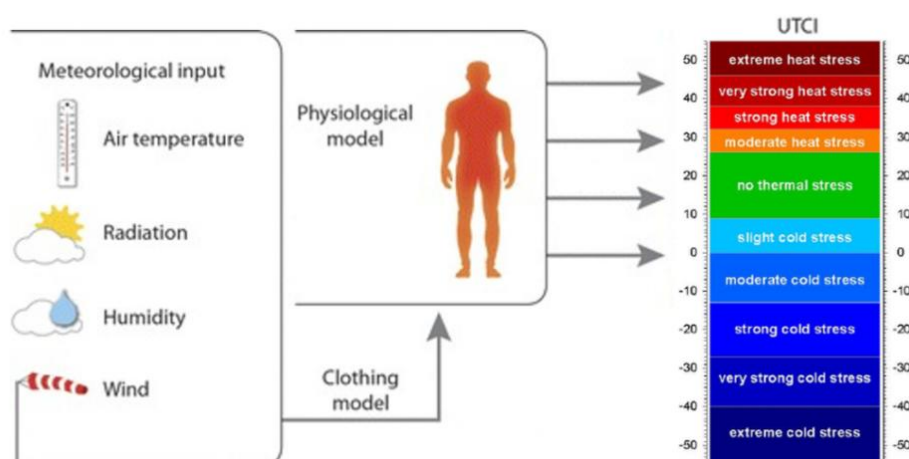


Figura 6: Scala di percezione termica UTCI

4. Analisi dei servizi ecosistemici legati allo stoccaggio e assorbimento di inquinanti

L'utilizzo del modello ha fornito un quadro predittivo e quantitativo delle possibili variazioni nella concentrazione di CO_2 atmosferica nell'area di progetto, consentendo una valutazione più accurata e dettagliata degli **effetti del progetto agrivoltaico sulla qualità dell'aria**. Nello specifico, il modello ha considerato il **processo di fotosintesi** delle piante incluse nel progetto agricolo e quindi ha permesso la **valutazione dell'assorbimento di CO_2 dall'atmosfera** durante la fotosintesi e la conversione della stessa in biomassa.

La quantità di CO_2 atmosferica è stata calcolata in tutta l'area di progetto ed è stato effettuato un confronto dello "scenario agrivoltaico" e "scenario post dismissione" con lo scenario di riferimento senza il progetto "scenario attuale".



Nel giorno simulato, si è osservata una diminuzione di **CO₂ pari a 0,99 ppm nello scenario “progetto agrivoltaico”**.

Questo può essere dovuto a:

1. **Assorbimento di CO₂ dalle piante:** durante il processo di fotosintesi le piante assorbono CO₂ dall'atmosfera e la utilizzano per la produzione di energia. Di conseguenza, la presenza di colture nell'area di progetto può portare a un maggiore assorbimento di CO₂, contribuendo a una diminuzione della sua concentrazione atmosferica.
2. **Effetto mitigante della vegetazione sulla temperatura:** la presenza di piante nell'area di progetto può influire anche sulla temperatura ambientale. Le piante, attraverso l'evapotraspirazione, rilasciano vapore acqueo nell'atmosfera. Questo processo può contribuire a ridurre la temperatura dell'aria circostante, creando un ambiente più fresco. Temperature più basse possono influenzare la capacità di assorbimento della CO₂ da parte delle piante stesse e favorire una maggiore efficienza del processo fotosintetico.

Inoltre, la concentrazione di CO₂ può essere ulteriormente abbattuta da pratiche di gestione del suolo che promuovono la fertilità e la conservazione del terreno. Queste pratiche possono contribuire a migliorare la struttura del suolo, aumentare la sua capacità di trattenere carbonio e ridurre la sua emissione di CO₂. Di conseguenza, uno scenario agrivoltaico può contribuire a un **bilancio del carbonio più equilibrato nel suolo**, influenzando indirettamente anche la concentrazione di CO₂ atmosferica.



5. Analisi dei servizi ecosistemici legati alla sfera microclimatica e termica

La **Tabella 1** e la **Tabella 2** presentano i risultati dettagliati delle simulazioni condotte con il modello ENVI-met, con riferimento ai valori registrati alle ore 13:00 orario corrispondente al **picco dell'irraggiamento solare** e quindi rappresentativo delle condizioni microclimatiche più critiche e alle 22:00 orario del **picco di emissione termica notturna**. I dati riportati includono misurazioni a 1,4 metri di altezza, utili per l'analisi dei parametri atmosferici in prossimità dell'altezza media dell'uomo e delle colture erbacee, **fornendo indicazioni rilevanti sugli effetti combinati delle pratiche agricole e dell'installazione fotovoltaica**.

Accanto a questi, sono stati estratti anche i valori al livello del suolo (0 m), focalizzati sui parametri edafici legati alla salute del terreno. Tali informazioni risultano fondamentali per valutare l'impatto delle strutture fotovoltaiche e delle colture sulla vitalità del suolo e sulle condizioni di crescita delle piante.

Oltre ai valori medi calcolati sull'intera area di progetto, sono stati considerati anche punti di interesse specifici, al fine di rappresentare con maggiore accuratezza l'eterogeneità spaziale degli effetti microclimatici. In particolare, sono stati analizzati:

- area **sotto i moduli fotovoltaici** (*moduli*),
- area **nell'area con fascia di mitigazione vegetale** (*mitigazione*).

Infine, saranno presentate alcune mappe tematiche di distribuzione spaziale dei principali parametri, utili per visualizzare le variazioni microclimatiche indotte dal progetto e l'interazione dinamica tra impianto fotovoltaico e contesto agricolo. Ciò consente una valutazione integrata e più completa degli effetti ambientali, a supporto delle decisioni in fase progettuale e di gestione.



Tabella 1: Sintesi dei risultati emersi dalla simulazione modellistica previsionale alle ore 13:00.

	Parametro		Scenario		Impatto
			Attuale	Agrivoltaico	
MICROCLIMA	Temperatura dell'aria (°C)	Media	27,02	26,49	Positivo
		Moduli	27,05	26,05	
		Mitigazione	27,06	25,37	
	Umidità relativa (%)	Media	56,85	56,76	Non rilevante
		Moduli	57,25	57,65	
	Velocità del vento (m/s)	Media	1,94	1,66	Non rilevante
		Moduli	2,02	1,29	
		Mitigazione	1,97	0,37	
	Temperatura superficiale (°C)	Media	32,23	31,80	Positivo
		Moduli	32,19	21,45	
		Mitigazione	32,07	23,79	
	Umidità del suolo (%)	Media	12,63	18,58	Positivo
		Moduli	12,67	31,42	
		Mitigazione	12,63	37,06	
COMFORT TERMICO	Universal Thermal Climate Index (°C)	Media	35,67	33,67	Positivo. Si passa da una condizione di FORTE stress termico (scenario attuale) a MODERATO stress termico (scenario agrivoltaico).
		Moduli	34,64	30,74	
		Mitigazione	35,01	27,45	
QUALITÀ DELL' ARIA	CO2 (ppm)	Media	400	399,01	Positivo



Tabella 2: Sintesi dei risultati emersi dalla simulazione modellistica previsionale alle ore 22:00.

	Parametro		Scenario		Impatto
			Attuale	Agrivoltaico	
MICROCLIMA	Temperatura dell'aria (°C)	Media	20,02	20,01	Non rilevante
	Umidità relativa (%)	Media	72,29	72,45	Non rilevante
	Velocità del vento (m/s)	Media	2,71	2,43	Positivo
		Moduli	2,66	1,64	
		Mitigazione	2,66	1,19	
	Temperatura superficiale (°C)	Media	17,30	17,44	Positivo
		Moduli	17,25	17,54	
		Mitigazione	17,19	18,00	
	Umidità del suolo (%)	Media	31,89	32,83	Positivo
		Moduli	32,12	34,15	
		Mitigazione	31,66	33,78	
COMFORT TERMICO	Universal Thermal Climate Index (°C)	Media	14,94	16,08	Positivo. Si rimane in una condizione di assenza di stress termico.
		Moduli	14,89	19,06	
		Mitigazione	14,92	20,17	
QUALITÀ DELL' ARIA	CO2 (ppm)	Media	400	399,01	Positivo

La presenza di valori elevati nella tabella 1 (ore 15:00) è attribuibile alla simulazione effettuata per il giorno con il più alto stress termico estivo, tipico dell'area di riferimento. Questa scelta metodologica è stata adottata per fornire una **stima realistica e precisa** degli **impatti climatici più severi che possono verificarsi in condizioni di picco di calore**. Tale approccio è cruciale per



comprendere in modo approfondito gli effetti che temperature estreme possono avere sull'interazione tra le pratiche agrivoltaiche e l'ambiente.

Analizzare il sistema sotto condizioni di massimo stress termico permette di valutare la resilienza dell'ecosistema e dell'infrastruttura energetica solare, nonché di prevedere possibili impatti sul microclima, sulla salute del suolo, e sulla crescita delle colture. Questo tipo di analisi è particolarmente rilevante in contesti afflitti da cambiamenti climatici, dove gli eventi di calore estremo sono sempre più frequenti e intensi. La comprensione di questi scenari aiuta a formulare strategie di mitigazione e adattamento più efficaci, assicurando la sostenibilità a lungo termine del progetto agrivoltaico.



5.1. Analisi dell'impatto del progetto agrivoltaico

Dall'analisi integrata delle distribuzioni spaziali (Allegato I e II) e dei valori puntuali estratti dalle simulazioni ENVI-met emerge un quadro microclimatico articolato, in cui il sistema agrivoltaico non si configura come una sorgente emissiva di calore, bensì come un **modulatore delle escursioni termiche**. Le evidenze numeriche permettono pertanto di **escludere la sussistenza di rischi sanitari** associati all'Isola di Calore da Fotovoltaico (PVHI), evidenziando al contrario la genesi di un effetto "cuscinetto" (*climate buffer*) con valenza mitigativa sia per la matrice agricola che per il contesto insediativo limitrofo.

5.1.1. Dinamica diurna: l'effetto "Cool Island" e la conservazione idrica

Nelle ore di massimo carico radiativo, il meccanismo fisico dominante è l'ombreggiamento radiativo. I moduli fotovoltaici intercettano la radiazione solare a onde corte convertendone una parte in energia elettrica e dissipando la restante parte come calore sensibile a una quota superiore dove la ventilazione è più efficace. Ciò impedisce alla radiazione diretta di raggiungere il suolo nelle aree sottostanti i pannelli, **riducendo drasticamente la temperatura superficiale: -10,74 °C nella zona sotto i moduli e -8,28 °C nella fascia di mitigazione vegetale**.

Sotto il profilo spaziale, si configura un **gradiente termico eterogeneo** in cui i **volumi d'aria a temperatura inferiore**, generati dall'interazione tra l'ombreggiamento meccanico e i flussi di calore latente da evapotraspirazione, **concorrono a ridurre la temperatura media della massa d'aria circolante** raggiungendo una differenza di **-1,69 °C** nelle zone perimetrali con le fasce di **mitigazione** e **-1,00 °C** nelle aree coltivate interne sotto modulo. Tale configurazione ha un impatto diretto sul bilancio idrologico: l'abbattimento dell'energia termica disponibile al suolo riduce l'evaporazione fisica, permettendo un **incremento dell'umidità del terreno** che raggiunge picchi del **+18,75% sotto i moduli** e del **+24,43% nelle aree verdi**.

La mappa termica evidenzia una distribuzione a strisce con gradienti termici marcati tra l'interfila soleggiata e l'area ombreggiata. Questo mosaico termico riduce il carico termico medio sull'intero volume di controllo, prevenendo lo stress foto-ossidativo sulle colture durante le ondate di calore, fenomeno ben documentato in studi recenti sull'agrivoltaico.²

² Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L. et al., 2019. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nat Sustain* 2, 848–855.



5.1.2. Analisi del bilancio idrologico superficiale

Strettamente correlato al campo termico è il parametro dell'umidità del suolo, che mostra le variazioni percentuali più significative. **L'umidità relativa del suolo passa da un valore medio del 12,63% nello scenario attuale a oltre il 18,50% nello scenario di progetto.**

L'ombreggiamento intermittente generato dai tracker riduce l'evaporazione fisica diretta dalla **superficie del terreno**. In termini di bilancio energetico superficiale, meno energia solare è disponibile per il calore latente di evaporazione dal suolo nudo. Questo **conserva la risorsa idrica nel profilo del terreno, rendendola disponibile per la traspirazione delle piante**. L'aumento dell'umidità del suolo contribuisce a sua volta a moderare la temperatura dell'aria sovrastante attraverso processi di retroazione evaporativa, migliorando l'efficienza d'uso dell'acqua dell'agrosistema.

5.1.3. Regime aerodinamico e campo di vento

La configurazione del layout progettuale interagisce con il flusso eolico dominante proveniente dal quadrante sud-occidentale (225°) modificando il coefficiente di resistenza aerodinamica del sito. Nello scenario *ante-operam* (attuale), il sito si comporta come una superficie a bassa rugosità, tipica dei seminativi nudi o con vegetazione bassa, dove il flusso del vento non incontra ostacoli significativi. Nello scenario *post-operam* (di progetto), l'introduzione dei moduli e delle opere a verde perimetrali altera la rugosità della superficie (z_0). **Le fasce di mitigazione disposte lungo i confini sud e ovest agiscono come primo elemento dissipativo:** intercettano il fronte del vento, generando una prima zona di scia che riduce la quantità di moto del fluido prima ancora che questo investa i filari fotovoltaici. All'interno dell'impianto, si registra una **riduzione della velocità media del vento** a 1,4m dal suolo, che passa da **1,94 m/s a 1,66 m/s** nelle ore diurne e mostra trend analoghi in quelle notturne. Tale riduzione non configura una condizione di stagnazione (calma di vento), bensì una modulazione del flusso. In letteratura scientifica, questo **effetto** è descritto come **benefico per le colture** (*shelter effect*), in quanto riduce l'evapotraspirazione potenziale (ET_0) guidata dalla componente avvertiva e limita i danni meccanici, mantenendo tuttavia una turbolenza sufficiente a garantire gli scambi gassosi (CO_2 e vapore acqueo) e lo smaltimento del calore sensibile per convezione (He and Shao, 2024³).

³ He, C., & Shao, W., 2024. Numerical simulation of shelter effect assessment for single-row windbreaks on the periphery of oasis farmland. *Journal of Arid Environments*, 222, 105165.



5.1.4. Regime radiativo notturno

L'analisi notturna è risolutiva per la valutazione dell'impatto ambientale. I dati confermano la stabilità assoluta della temperatura dell'aria ($\Delta T_{air} = -0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$), dimostrando che il calore accumulato dai pannelli viene dissipato rapidamente e non riscalda la massa d'aria circostante.

Ciò che cambia radicalmente è il bilancio radiativo a onde lunghe: la presenza dei moduli riduce il fattore di vista del cielo (*Sky View Factor*), limitando il raffreddamento radiativo del suolo. Questo fenomeno, quantificato da un aumento dell'indice di comfort UTCI tra $+4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dal punto di vista agronomico, si configura come una protezione passiva. In condizioni meteorologiche di stabilità atmosferica e cielo sereno, tipiche delle gelate radiative invernali o primaverili, questo differenziale termico positivo infatti, unito alla riduzione del *wind chill*, **può mantenere la temperatura fogliare al di sopra delle soglie critiche di danno, svolgendo una funzione di mitigazione degli estremi termici negativi.**



6. Conclusione

Il comportamento microclimatico del sistema agrivoltaico RNE21 rivela delle differenze tra la fase notturna e diurna.

Durante la fase diurna, il sistema agrivoltaico agisce come un **regolatore passivo** che determina un abbassamento delle temperature nell'interfaccia suolo-vegetazione, già noto in letteratura⁴. Il meccanismo fisico prevalente è l'**ombreggiamento** meccanico: intercettando la radiazione solare diretta prima che raggiunga la superficie, i **pannelli impediscono il riscaldamento del suolo e la conseguente riemissione di calore sensibile verso l'aria**. Sebbene i moduli raggiungano temperature superficiali elevate per assorbimento radiativo, la loro installazione a una quota superiore ai 2 metri e la presenza di una ventilazione continua, seppur moderata dalla rugosità del layout, favoriscono la dissipazione convettiva del calore nella porzione superiore dello strato limite, senza trasferirlo alle quote antropiche o agronomiche. Il risultato netto è una "**isola di fresco**" (*cool island*) che **riduce lo stress termico ambientale** (UTCI).

Nella fase notturna, la dinamica si inverte e assume carattere radiativo. Venendo meno la forzante solare, il bilancio energetico è dominato dal raffreddamento per emissione infrarossa dal suolo verso l'atmosfera. In questa configurazione, i moduli fotovoltaici riducono il fattore di vista del cielo (SVF) delle superfici sottostanti, intercettando la radiazione a onde lunghe in uscita e riflettendone una parte verso il basso. Questo fenomeno, tecnicamente assimilabile a un effetto serra locale, limita il raffreddamento notturno del suolo. Tuttavia, le simulazioni confermano che tale fenomeno non genera un riscaldamento della massa d'aria pressoché invariata, ma si limita a mitigare le temperature superficiali e radianti (UTCI).

In conclusione, con riferimento specifico alla richiesta di valutazione dell'isola di calore da fotovoltaico, **le evidenze numeriche dimostrano l'assenza di impatti cumulativi negativi sul campo termico**. L'alterazione microclimatica indotta dal progetto non si manifesta come un **surriscaldamento permanente dell'area, bensì come una stabilizzazione termica: il sistema attenua i picchi di calore diurno e limita le minime notturne**. Tale comportamento configura un

⁴ Santiago, J.-L.; Rivas, E. *Advances on the Influence of Vegetation and Forest on Urban Air Quality and Thermal Comfort*. *Forests* 2021, 12, 1133.

Yang, X.; Zhao, L. *Diurnal Thermal Behavior of Pavements, Vegetation, and Water Pond in a Hot-Humid City*. *Buildings* 2016, 6, 2

Duarte, D.H.; Shinzato, P.; Santos Gusson C.D.; Alves, C.A. *The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance-built density in a subtropical changing climate*. *Urban Climatology* 2015, 14, 224-239

FAO. 2016. *Guidelines on urban and peri-urban forestry*, by F. Salbitano, S. Borelli, M. Conigliaro and Y. Chen. *FAO Forestry Paper No. 178*. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations.



microclima più conservativo e meno estremo rispetto al campo aperto, favorevole sia al comfort ambientale che alla resilienza agronomica, senza rischi per i ricettori sensibili limitrofi.

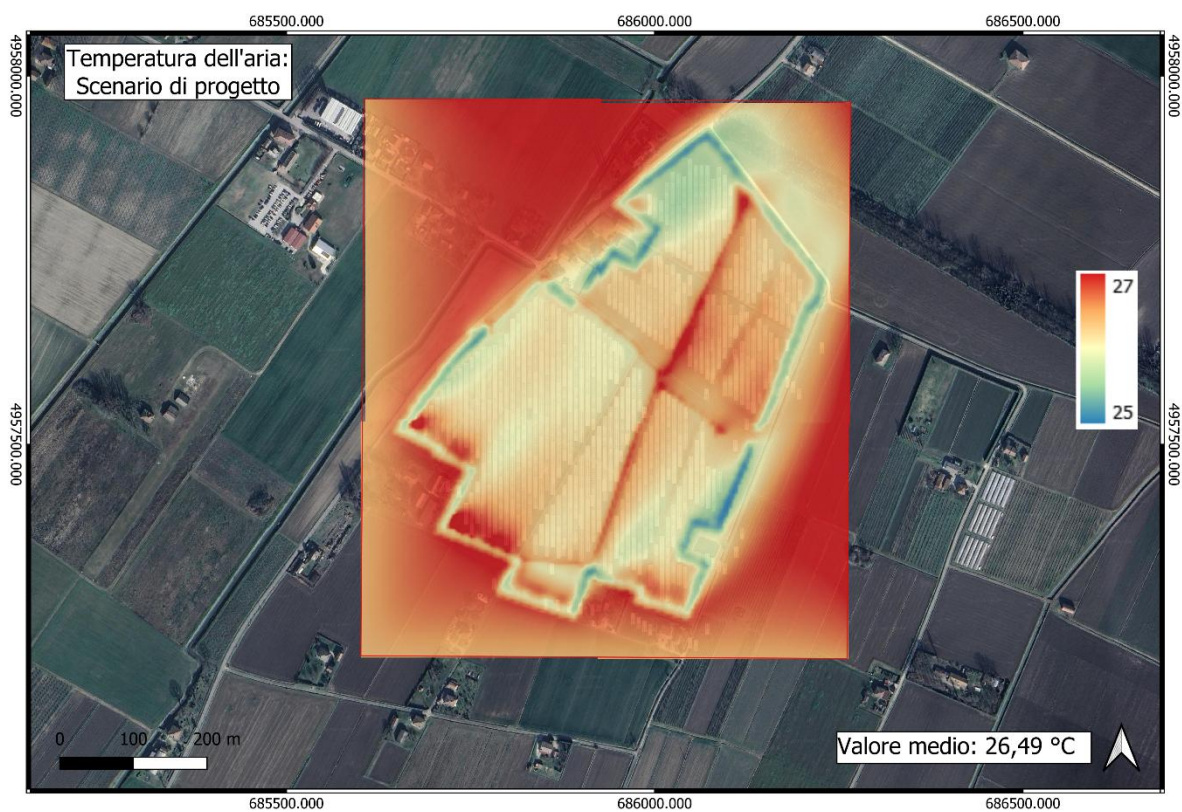
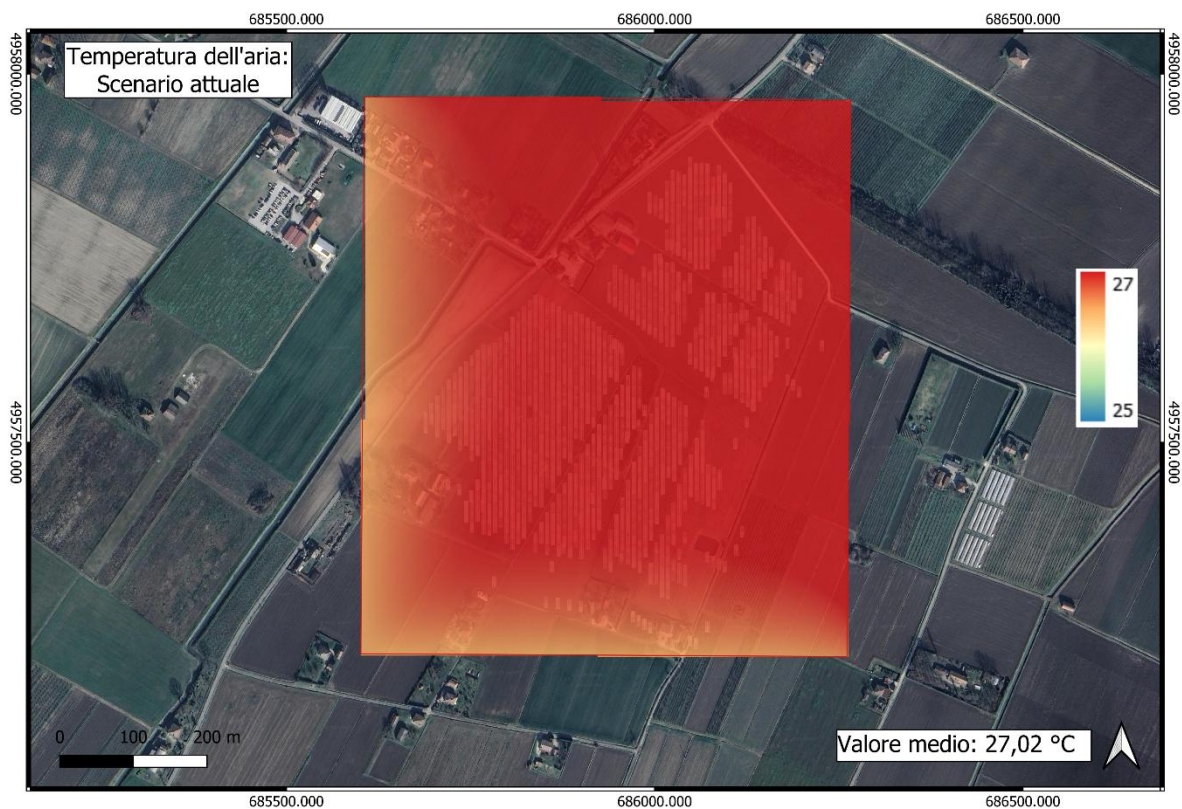
Il progetto si dimostra inoltre efficace nel **migliorare la qualità dell'aria** nell'area interessata dal progetto grazie all'assorbimento e all'accumulo di inquinanti da parte delle specie vegetali selezionate. Questo effetto riveste **un'importanza significativa nel contesto dei rischi climatici**. Attraverso l'assorbimento di CO₂ e altri inquinanti atmosferici da parte delle specie vegetali impiegate, si può contribuire alla riduzione della concentrazione di gas serra nell'atmosfera, **essenziale per contrastare i cambiamenti climatici e i loro effetti negativi, come l'aumento delle temperature, l'innalzamento del livello del mare, l'alterazione dei regimi delle precipitazioni e l'incremento degli eventi meteorologici estremi**.

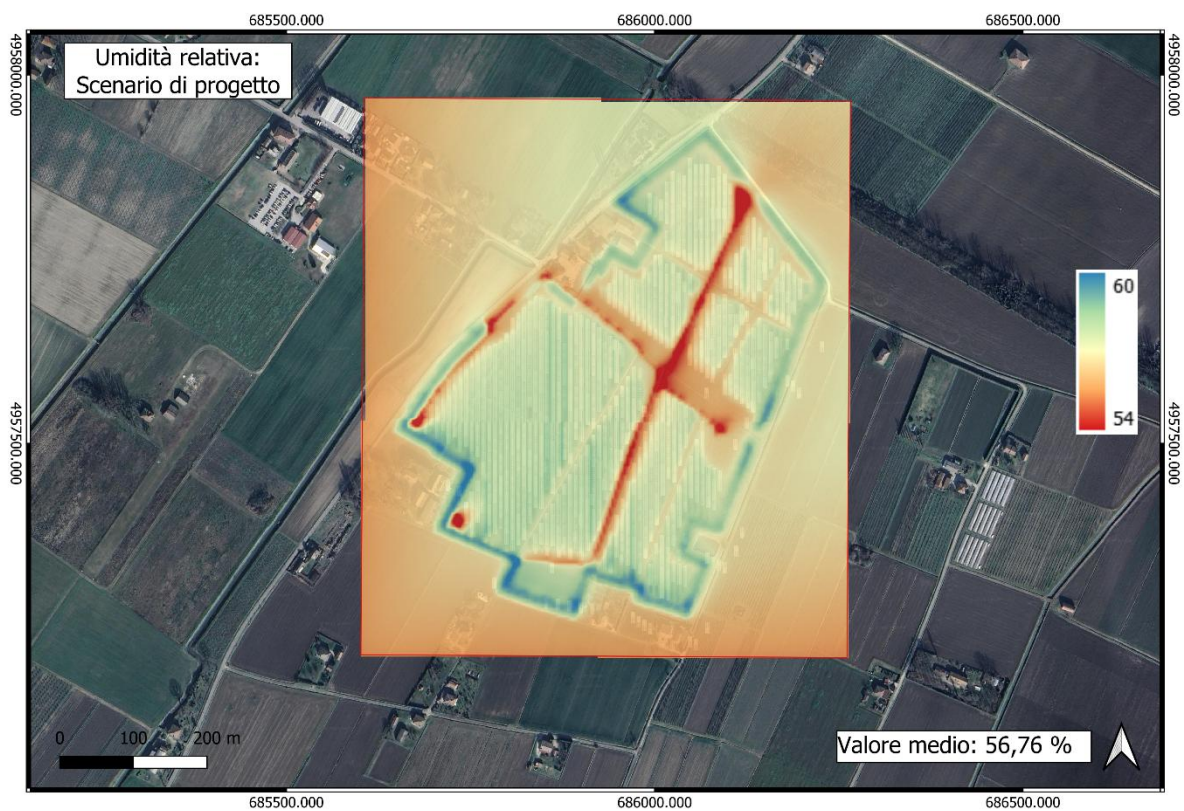
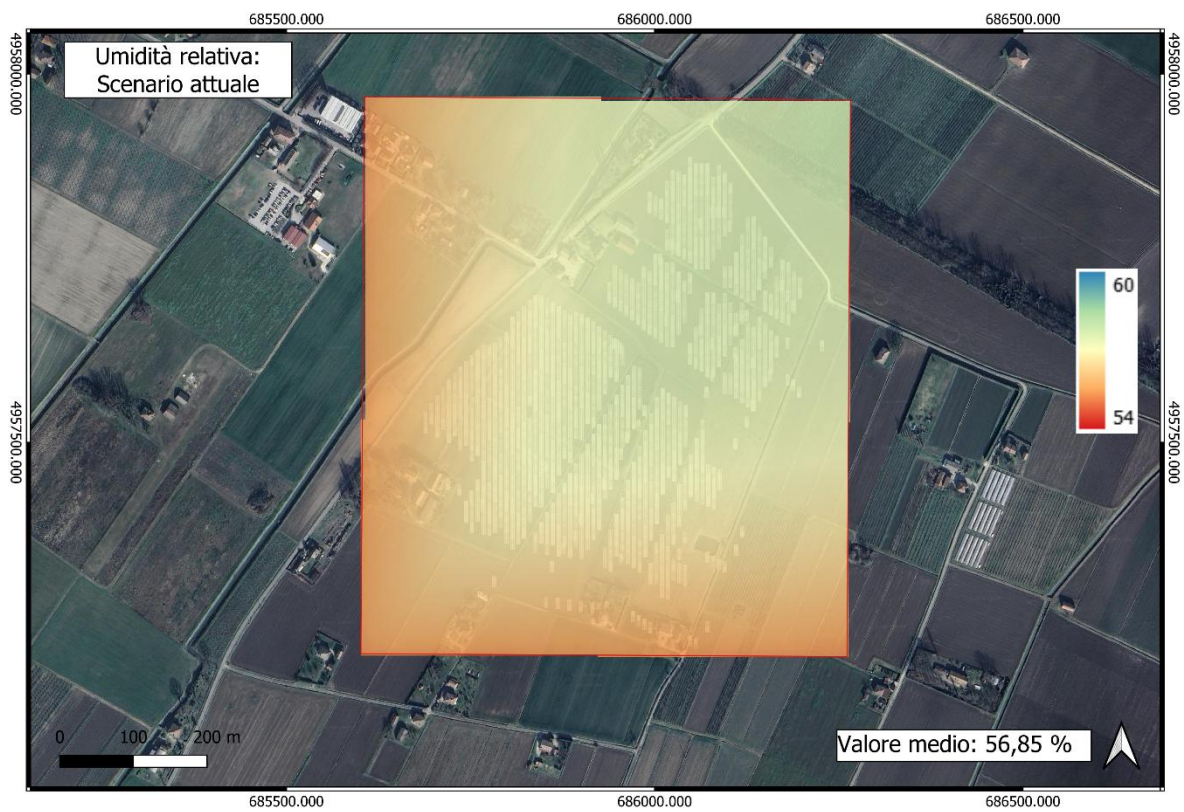
In questa fase progettuale, la modellazione microclimatica ha consentito di verificare preventivamente i potenziali effetti attesi dell'impianto agrivoltaico sul microclima locale. Tali simulazioni rappresentano uno strumento fondamentale per stimare in **modo oggettivo e quantitativo i potenziali benefici derivanti dall'integrazione tra produzione agricola ed energetica, in un'ottica di adattamento ai cambiamenti climatici**.

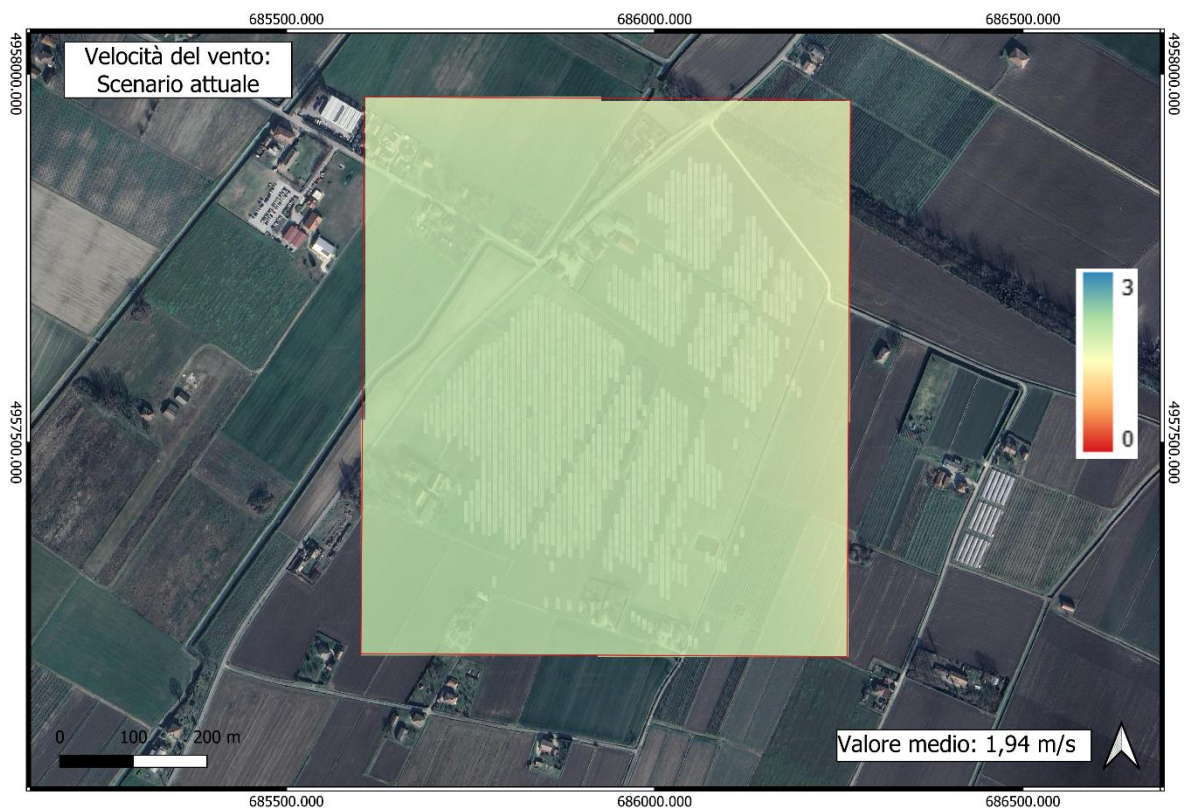
Il presente studio fornisce evidenze concrete sugli impatti positivi del progetto, includendo la riduzione dell'inquinamento atmosferico, il miglioramento delle condizioni microclimatiche e la promozione di pratiche agricole più sostenibili. Tali risultati confermano che **il progetto agrivoltaico è in linea con la Convenzione quadro delle Nazioni Unite e degli accordi a essa collegati, quali il Protocollo di Kyoto e gli Accordi di Parigi, per fronteggiare il rischio climatico**. Tali impegni mondiali prevedono che i Paesi si attivino per contenere l'incremento della temperatura media globale tramite la riduzione delle emissioni e l'aumento degli assorbimenti (mitigazione – un esempio è l'attività di rimboschimento), e altresì a predisporre strategie di adattamento per difendersi dagli effetti avversi.

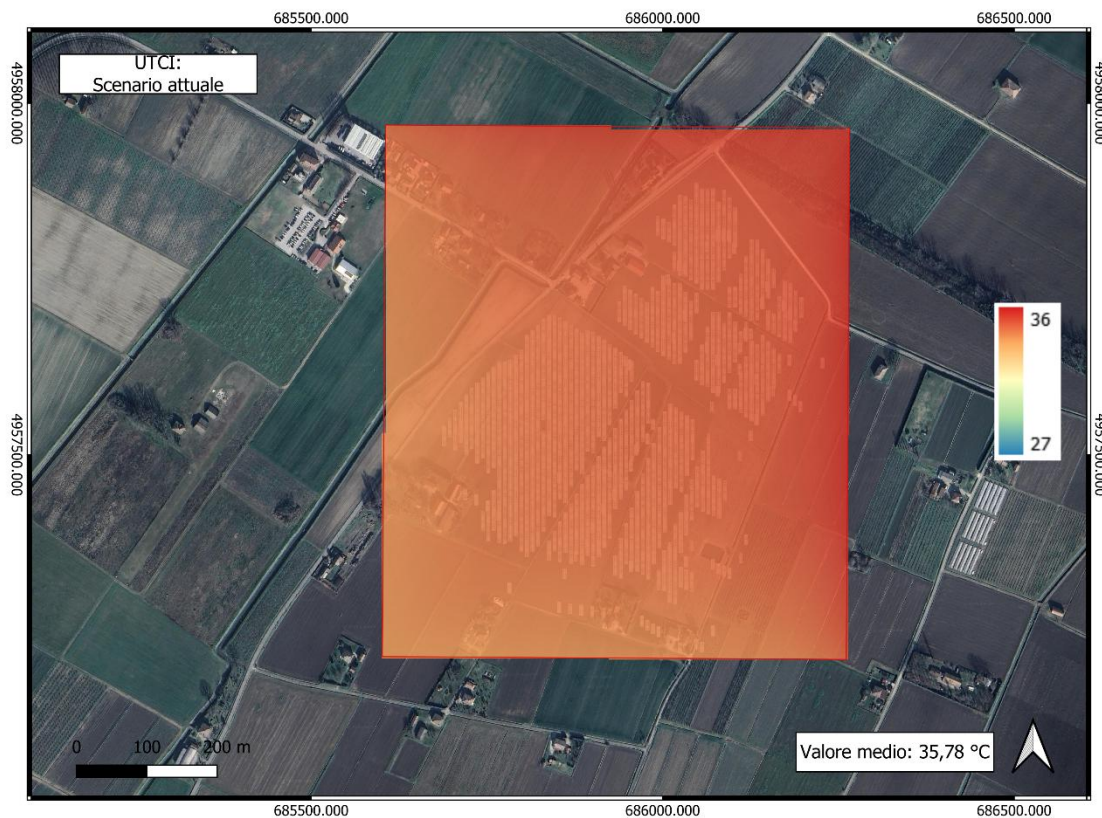


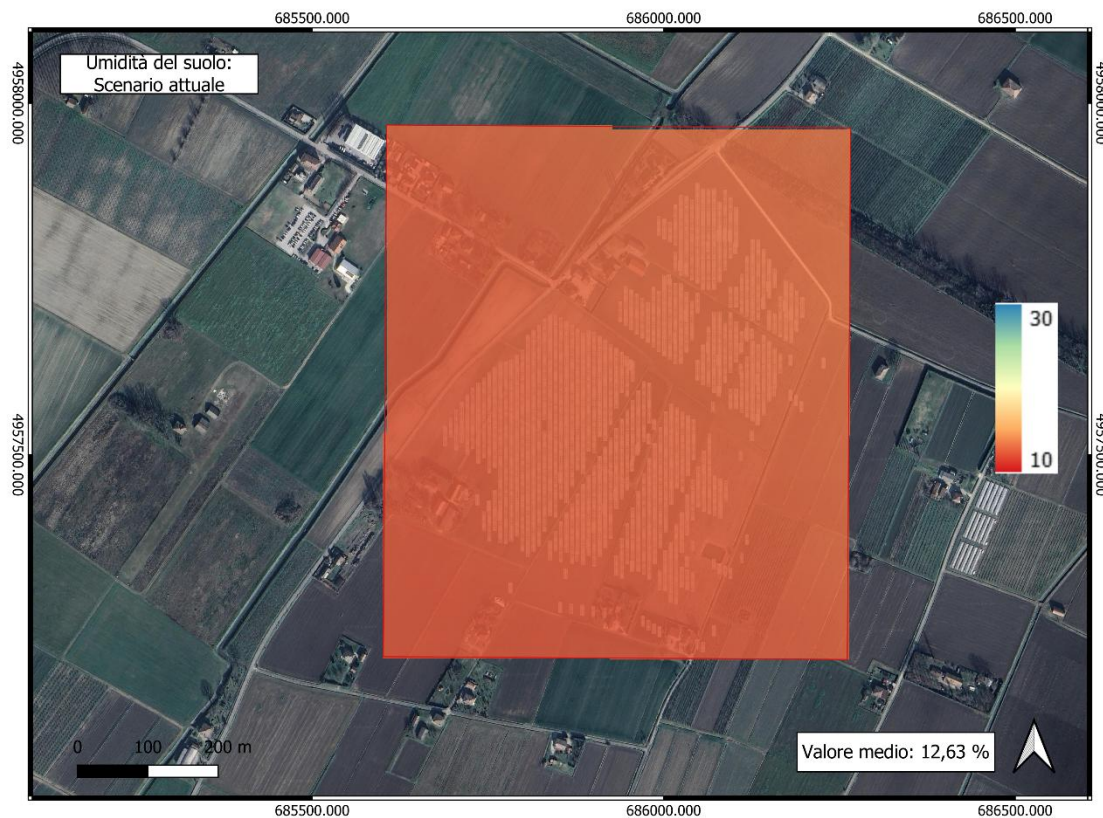
ALLEGATO I: Mappe spaziali diurne

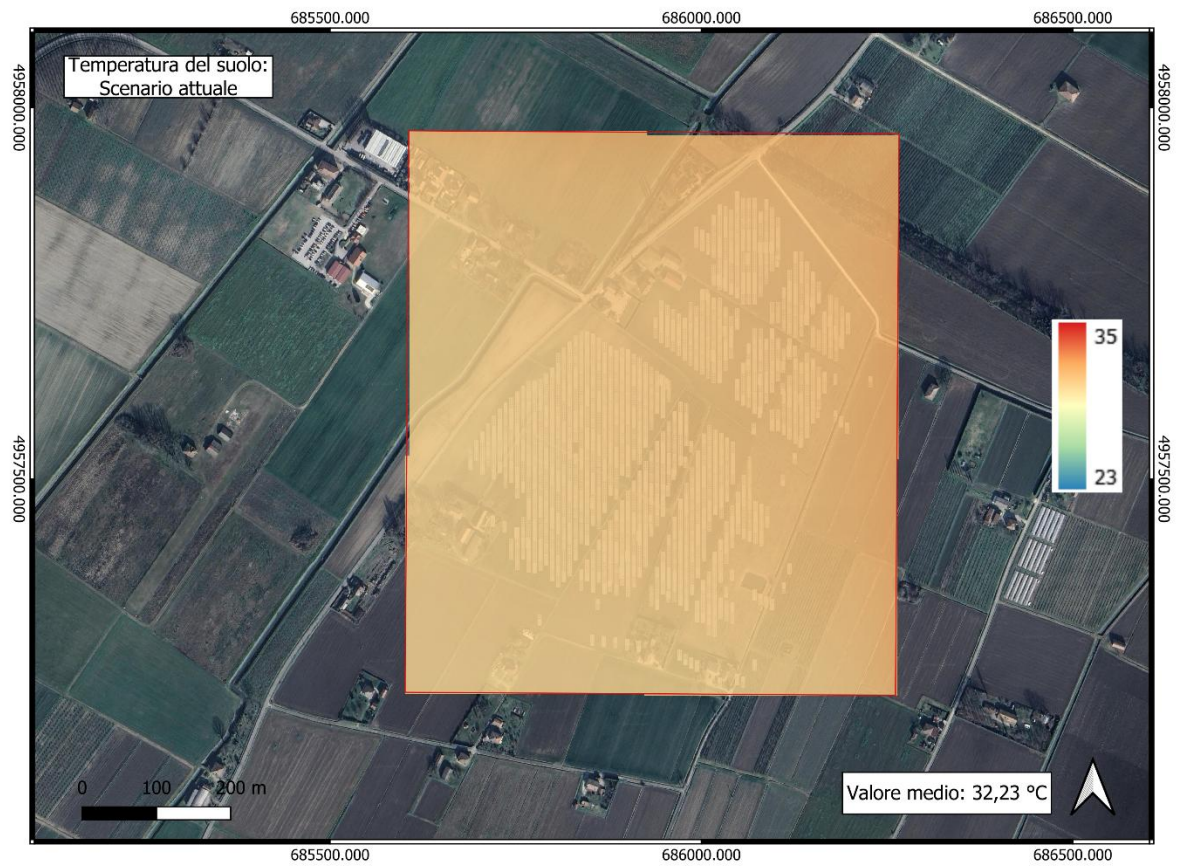














ALLEGATO II: Mappe spaziali notturne

