



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Valutazione degli effetti di impianti agrivoltaici sul microclima locale

Candidato:
Conti Alessandro

Relatore:
Prof. Passerini Giorgio

Correlatore:
Ing. Tommasi Martina

Anno Accademico 2025-2026



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACULTY OF ENGINEERING
DEGREE IN CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Evaluation of the effects of agrivoltaic systems on the local microclimate

Candidate:
Conti Alessandro

Advisor:
Prof. Passerini Giorgio

Coadvisor:
Ing. Tommasi Martina

Academic Year 2025-2026

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Il contesto energetico e agricolo globale: la sfida della transizione ecologica.	2
1.2	Il binomio agricoltura-energia	3
1.3	Obiettivi della tesi: la modellazione microclimatica come strumento di validazione progettuale.	4
2	L'Agrivoltaico: Fondamenti Teorici, Vantaggi e Quadro Normativo	7
2.1	Definizione e principi fondamentali	7
2.2	Sinergie e benefici microclimatici	10
2.3	Classificazione e tecnologie dei sistemi agrivoltaici	11
2.4	Integrazione agronomica	15
2.5	Il quadro normativo e i requisiti di incentivazione in Italia (MASE-GSE)	16
3	Area di Studio	19
3.1	Il potenziale agrivoltaico nel contesto nazionale	19
3.2	Analisi del sito specifico d'installazione	21
4	Metodologia di Simulazione Microclimatica in Ambiente QGIS tramite SOLWEIG	25
4.1	Modellazione preliminare in ambiente ENVI-met	25
4.2	L'architettura del plugin UMEP	28
4.3	Il Modulo SOLWEIG	29
4.4	Configurazione ed esecuzione del modello	30
5	Analisi dei Risultati e Discussione Critica	33
5.1	Analisi del primo scenario (solo coltura)	33
5.2	Analisi del secondo scenario (con impianto fotovoltaico)	34
5.3	Discussione dei risultati	35
5.4	Criticità operative e limiti dei software di simulazione	36
6	Conclusioni	39

Elenco delle figure

2.1	Scomposizione dei vari rendimenti	8
2.2	Confronto schematico tra le configurazioni agrivoltaiche di tipo overhead (rialzate) e inter-row (inter-filare).	12
2.3	Tecnologia del traking monoassiali	13
2.4	Tecnologia del traking biassiale	13
3.1	Distribuzione geografica della potenzialità degli impianti agrivoltaici sul territorio italiano, stilata da ENEA.	21
3.2	Inquadramento dell'area di studio e posizionamento della strumentazione in campo.	22
3.3	Potenziale fotovoltaico della zona di Jesi, fornito dal simulatore PVGIS [1]	23
4.1	Vista dal satellite	26
4.2	Modello 3D privo di pannelli.	27
4.3	Modello 3D con pannelli.	28
4.4	Disposizione delle geometrie su QGIS	31
5.1	Risultato del primo scenario di simulazione con solo coltura.	33
5.2	Risultato del secondario scenario di simulazione con anche i pannelli solari.	35
5.3	Risultato della differenza tra i due scenari.	36
5.4	Risultato della differenza inesistente tra i due scenari in ENVI-met.	37

Capitolo 1

Introduzione

Il contesto attuale è caratterizzato da due principali esigenze: tutelare il settore agricolo dagli effetti dei cambiamenti climatici e aumentare la produzione di energia rinnovabile. Per non sottrarre terreno fertile alle coltivazioni, risulta necessario superare il modello di utilizzo monofunzionale del suolo agricolo, risulta necessario superare il modello di utilizzo monofunzionale del suolo agricolo. L'agrivoltaico si inserisce in questo contesto, perchè non consiste nella semplice installazione di pannelli fotovoltaici su una superficie agricola, ma di progettare un vero e proprio sistema in 3D. I moduli fotovoltaici tradizionali vengono installati a una quota sopraelevata rispetto al suolo e la messa in opera è progettata per lasciare lo spazio sufficiente alla crescita delle colture adatte per il passaggio dei mezzi agricoli.

A livello fisico, questa struttura fa da scudo termico: filtra la parte della radiazione diretta e riduce le temperature locali. Così facendo, riduce l'evaporazione dell'acqua e protegge le piante dallo stress termico estivo. Oltre a produrre energia elettrica, l'impianto diventa quindi un sistema di difesa per le colture. Ovviamente, per essere sicuri che l'ombra porti un vantaggio e non diventi un problema per la crescita delle piante, non si può procedere per tentativi: è necessario prevedere esattamente cosa succederà, ed è in questo quadro che si inserisce il lavoro di tesi. L'obiettivo è valutare la variazione del microclima sotto i pannelli, usando una simulazione tramite QGIS con l'espansione UMEP.

A tal fine, è stato ricostruito, tramite l'utilizzo di un Software di simulazione, un campo agricolo reale, dove è stato simulato il bilancio termico nel giorno più caldo dell'anno e questa simulazione è stata effettuata in due scenari: il campo aperto esposto a radiazioni solari e il campo con la presenza dell'impianto agrivoltaico. Alla luce delle analisi svolte, i risultati ottenuti evidenziano che gli impianti agrivoltaici possono contribuire alla mitigazione delle condizioni microclimatiche dell'ambiente agricolo, favorendo il raffrescamento delle aree sottostanti i moduli fotovoltaici e offrendo potenziali benefici per le colture.

Per approfondire tale tematica, il lavoro è stato organizzato secondo un percorso che accompagna il lettore dalle basi teoriche agli aspetti applicativi. Inizialmente vengono presentati il contesto di riferimento e le motivazioni che rendono indispensabile il ricorso alle simulazioni climatiche per la progettazione di impianti sempre più efficienti. Successivamente sono analizzati i principi dell'agrivoltaico, le principali tecnologie

disponibili, il quadro normativo e gli strumenti di incentivazione attualmente previsti. L'attenzione si concentra poi sul contesto italiano e sul sito oggetto di studio, attraverso l'analisi delle caratteristiche territoriali, pedologiche e climatiche. La parte centrale del lavoro descrive la metodologia adottata per la realizzazione del modello tridimensionale e per l'esecuzione delle simulazioni, illustrando le procedure di modellazione e l'integrazione dei dati meteorologici nel software di calcolo. Seguono quindi l'analisi e la discussione dei risultati ottenuti, con particolare riferimento alla valutazione della riduzione della temperatura al di sotto dei pannelli fotovoltaici e alle relative implicazioni agronomiche. Il lavoro si conclude con una sintesi dei principali risultati raggiunti, evidenziando i contributi della ricerca, i limiti emersi e le possibili prospettive di sviluppo futuro.

1.1 Il contesto energetico e agricolo globale: la sfida della transizione ecologica.

L'Italia sta attraversando una fase cruciale nella transizione ecologica, dove è necessario accelerare il percorso di crescita sostenibile per raggiungere gli obiettivi fissati dall'Unione Europea per il 2030 e il 2050, nel quadro degli impegni assunti con l'Accordo di Parigi e il Green Deal europeo. Seguendo le direttive comunitarie, tra cui la RED II (recepita a livello nazionale tramite il d.lgs. 199/2021), e in linea con il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) e il PNRR, è necessario definire percorsi di sviluppo strategici. Questi percorsi devono permettere di unire la decarbonizzazione del settore energetico con il rispetto dell'ambiente e la tutela del territorio. Aumentare la quota di energia da fonti rinnovabili, affidando un ruolo di primo piano al fotovoltaico, richiede la realizzazione di nuove infrastrutture su vasta scala, coinvolgendo direttamente le aree rurali e i terreni coltivati. In questo scenario, l'installazione dei classici impianti fotovoltaici a terra si scontra con un problema territoriale molto dibattuto: il consumo di suolo agricolo.

L'espansione dei parchi solari ha innescato una forte competizione per l'uso delle superfici, mettendo in contrasto la sicurezza alimentare con il fabbisogno energetico nazionale. Questa dinamica, definita in letteratura come il trilemma "cibo-energia-ambiente"[2], rischia di ostacolare gli obiettivi europei sull'economia circolare e di inasprire i conflitti tra comunità locali, tutela del paesaggio e sviluppo industriale. Risulta dunque chiaro che realizzare impianti con una sola funzione in ambiti agricoli non è più sostenibile, né dal punto di vista ambientale né da quello produttivo. Per superare questo ostacolo, l'agrivoltaico si propone come una soluzione tecnologica in grado di far convivere la produzione di energia elettrica e l'attività agricola (o pastorale) nello stesso luogo. Come indicano le Linee Guida del MASE (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica), un approccio agrivoltaico avanzato non si limita a far coesistere i due settori, ma punta a preservare e valorizzare il potenziale agricolo attraverso configurazioni spaziali tridimensionali.

Queste strutture, caratterizzate da moduli sollevati da terra, sono progettate per non ostacolare i mezzi agricoli, ottimizzare l'uso del suolo e facilitare il monitoraggio di parametri fondamentali come il risparmio idrico e il microclima. Tuttavia, per garantire che l'alterazione dell'irraggiamento e dello spazio non incida negativamente sulle colture, è indispensabile un approccio sperimentale rigoroso; perciò, è necessario, nella fase di Ante-Operam, svolgere uno studio preliminare sugli effetti che il nuovo impianto potrà generare sul territorio. Bisognerà dunque procedere attraverso modelli di simulazione microclimatica, mettendo in correlazione lo scenario Ante(il terreno in pieno campo) e Post-Operam(con l'infrastruttura a filari agrivoltaici). Tale metodo consente una valutazione oggettiva degli effetti dell'impianto e permette di svolgere uno studio preliminare della sua fattibilità.

1.2 Il binomio agricoltura-energia

Il principio alla base del sistema in esame è il superamento della tradizionale separazione tra uso agricolo e uso energetico del suolo. L'agrivoltaico si propone infatti come una soluzione efficace per garantire un doppio uso del suolo, in cui la coesistenza sia possibile, come confermato dalle linee guida del MASE e dalla letteratura scientifica. Le due attività non si limitano a condividere lo stesso spazio, ma si supportano a vicenda attraverso una sinergia che migliora le prestazioni di entrambi i comparti.

Sollevando i moduli fotovoltaici da terra, si garantisce la continuità delle attività agricole e pastorali, trasformando la competizione per il consumo di suolo in una proficua collaborazione. L'ombra dinamica prodotta dai pannelli durante la giornata protegge le coltivazioni, limitando lo stress termico nei mesi più caldi e offrendo un riparo dagli eventi meteorologici estremi. Alterando il bilancio della radiazione solare a livello del suolo, l'evapotraspirazione diminuisce in modo sensibile; di conseguenza, il terreno trattiene meglio l'umidità, permettendo un notevole risparmio idrico, un aspetto oggi fondamentale per far fronte alle sempre più frequenti siccità. Sul piano economico, inoltre, le aziende agricole possono diversificare le entrate e stabilizzare il proprio reddito, abbattendo i costi energetici e risultando meno esposte alle oscillazioni dei mercati. Tuttavia, l'inserimento di un'infrastruttura tecnologica in un ambiente rurale comporta anche alcune criticità, poiché può alterare il microclima e la disponibilità di luce, generando possibili squilibri nell'ecosistema. Pannelli posizionati troppo in basso, con una densità eccessiva o orientati in modo scorretto, generano infatti zone d'ombra permanenti che riducono drasticamente la Radiazione Fotosinteticamente Attiva (la cosiddetta PAR)[3], un parametro vitale per lo sviluppo vegetale. Per le colture che necessitano di molta luce, questa condizione rischia di azzerare la produttività, vanificando il principio stesso dell'agrivoltaico: la produzione di energia non deve in alcun modo compromettere il raccolto, rendendo la sola ottimizzazione della resa elettrica un grave errore progettuale.

Per prevenire tali criticità è indispensabile una pianificazione preventiva, affidandosi all'analisi predittiva come strumento principale per tutelare le colture e l'intero ecosistema. L'impiego di software di modellazione microclimatica e fluidodinamica diventa quindi una necessità ingegneristica, essenziale per preservare l'equilibrio del territorio a fronte dell'intervento umano. Attraverso la simulazione dell'interazione tra i moduli fotovoltaici e l'ambiente circostante, questi programmi calcolano in anticipo i flussi radiativi e termici, permettendo di confrontare in modo analitico lo scenario di partenza a campo aperto con quello di progetto a impianto realizzato. Solo questo livello di studio consente di individuare la configurazione geometrica ottimale per garantire il successo e la coesistenza di entrambe le produzioni.

1.3 Obiettivi della tesi: la modellazione microclimatica come strumento di validazione progettuale.

Integrare la produzione di energia da fonti rinnovabili con la gestione agricola richiede una progettazione ingegneristica precisa, un principio ribadito anche dalle linee guida del MASE. Un impianto agrivoltaico avanzato, infatti, non deve ostacolare le coltivazioni o il pascolo, ma deve garantire il funzionamento simultaneo di entrambi i sistemi sul medesimo terreno. Poiché i pannelli intercettano la luce, deviano le precipitazioni e alterano la ventilazione, modificano inevitabilmente il microclima locale. Proprio da questa premessa nasce il presente studio, il cui obiettivo principale è dimostrare come la modellazione spaziale del microclima non sia soltanto un utile fondamento teorico, ma un vero e proprio strumento decisionale, indispensabile ancor prima di avviare i lavori. Attraverso le simulazioni informatiche è infatti possibile studiare le geometrie tridimensionali dell'impianto, calibrando l'altezza e la densità dei moduli per individuare il perfetto punto di equilibrio con le esigenze fisiologiche delle piante.

Per condurre le analisi è stato impiegato UMEP, un software open-source per lo studio climatico integrato come plugin all'interno di QGIS. Il nucleo operativo della simulazione si basa su SOLWEIG, un modello radiativo in grado di calcolare come si muovono i flussi di radiazione a onda corta e lunga all'interno di strutture geometricamente complesse. Il risultato finale di questa elaborazione è la Temperatura Radiante Media (T_{mrt}), un parametro che la letteratura scientifica identifica come l'indicatore più affidabile per valutare lo stress termico della vegetazione e calcolare il bilancio energetico all'aperto, specialmente in estate con forte irraggiamento e scarsa ventilazione.

È opportuno precisare sul lavoro che si è svolto: il progetto non è una simulazione supportata da mesi di raccolta dati sul campo, poichè l'obiettivo della ricerca era orientato verso un traguardo più pratico e dimostrativo. Il caso studio è stato infatti sviluppato per testare le potenzialità del software e valutarne l'effettiva utilità in fase di progettazione, valutando l'efficacia generale di questo metodo. L'elaborato si

pone quindi come un punto di partenza utile a confermare che l'impiego di software specifici per calcolare la distribuzione delle ombre e del calore tra i pannelli e le colture rappresenta una strada metodologica valida e percorribile. Dal punto di vista operativo, la ricerca si fonda su un confronto diretto tra due scenari ben distinti: una configurazione Ante-Operam, rappresentata dal campo aperto privo di strutture, e una configurazione Post-Operam, in cui lo spazio viene modificato dalla presenza dei filari fotovoltaici. Per testare il sistema nelle condizioni più difficili, la simulazione si concentra su un momento estremamente critico, analizzando il picco di calore estivo alle ore 13:00 del Giorno Giuliano 195 (corrispondente al 14 luglio). Questa scelta mirata permette di mappare con esattezza i gradienti termici e radiativi, evidenziando la differenza tra le zone in pieno sole e quelle protette dall'ombra dinamica dei moduli. Confrontando i dati estratti dai due scenari, lo studio si propone di quantificare l'effetto di mitigazione termica offerto dalla copertura, dimostrando come l'abbattimento dei picchi di calore possa supportare concretamente le colture e confermare l'agrivoltaico come una valida strategia per affrontare i cambiamenti climatici.

Capitolo 2

L'Agrivoltaico: Fondamenti Teorici, Vantaggi e Quadro Normativo

2.1 Definizione e principi fondamentali

Un impianto agrivoltaico avanzato è un modello complesso, che non consiste nella semplice installazione di pannelli fotovoltaici su una superficie agricola. Esso deve inoltre rispettare le indicazioni contenute nelle Linee Guida del MASE, che definiscono i requisiti fondamentali per questa tipologia di impianto. I moduli fotovoltaici devono essere sollevati da terra o disposti in verticale secondo una precisa geometria tridimensionale. Il motivo è pratico: i trattori e i macchinari agricoli devono passare senza ostacoli e le coltivazioni non devono essere penalizzate. Non basta sovrapporre due attività diverse sullo stesso terreno per fare un buon progetto. L'obiettivo è creare un sistema in sinergia, favorendosi a vicenda nel binomio: energia-agricoltura. Per verificare che questa convivenza funzioni, la legge impone l'uso di reti di monitoraggio avanzate. Questi sensori servono a calcolare i cambiamenti reali nell'ambiente, come il risparmio di acqua, il recupero della fertilità del suolo, le variazioni del microclima e la reale resistenza delle piante di fronte ai cambiamenti climatici. Per capire se il sistema funziona davvero, servono dei numeri mediante parametri oggettivi.

Quando si progetta un impianto agrivoltaico, il parametro principale per capire se stiamo usando bene il suolo è il Land Equivalent Ratio (LER). Dal punto di vista matematico, la formula del LER si calcola attraverso una semplice somma di frazioni:

$$LER_{AgriPV} = \frac{Y_{agri,AgriPV}}{Y_{agri,C}} + \frac{Y_{en,AgriPV}}{Y_{en,refPV}} \quad (2.1)$$

[4]

- $Y_{agri,AgriPV}$ rappresenta la resa del raccolto ottenuta al di sotto dell'impianto agrivoltaico (espressa in kg/m^2);
- $Y_{agri,C}$ è la resa della medesima coltura cresciuta in condizioni di controllo in un campo agricolo convenzionale, ovvero in pieno sole (espressa in kg/m^2);

- $Y_{en,AgriPV}$ indica l'energia elettrica specifica prodotta dall'impianto agrivoltaico (espressa in kWh/m^2);
- $Y_{en,refPV}$ è l'energia generata da un classico impianto fotovoltaico a terra preso come riferimento (espressa in kWh/m^2).

I termini di questa equazione servono a separare le prestazioni dell'agricoltura da quelle dell'energia. Il primo rapporto calcola la parte agricola: al numeratore va messa la resa del raccolto ottenuta sotto i pannelli (misurata in kg/m^2), mentre al denominatore si inserisce la resa della stessa coltura cresciuta normalmente in un campo aperto di controllo, cioè in pieno sole. A questa prima parte si somma il secondo rapporto, che valuta invece l'efficienza energetica, dove al numeratore viene inserita l'energia prodotta dal nostro impianto agrivoltaico (in kWh/m^2), e al denominatore si inserisce l'energia che produrrebbe un classico impianto fotovoltaico a terra preso come termine di paragone. I valori che si ottengono da questa formula dipendono in misura significativa da come è costruito l'impianto. Le rese, infatti, cambiano a seconda dell'ombra creata dai pannelli e da come questi sono disposti nello spazio. Un esempio visivo molto chiaro di questo calcolo ci arriva dal progetto agrivoltaico di Pöchlarn[5], in Austria. Come illustrato nella figura seguente (tratta dal manuale [5]), lo schema mette a confronto diretto l'uso separato del terreno con la configurazione ibrida, mostrando quanto aumenti l'efficienza complessiva nell'uso del suolo.

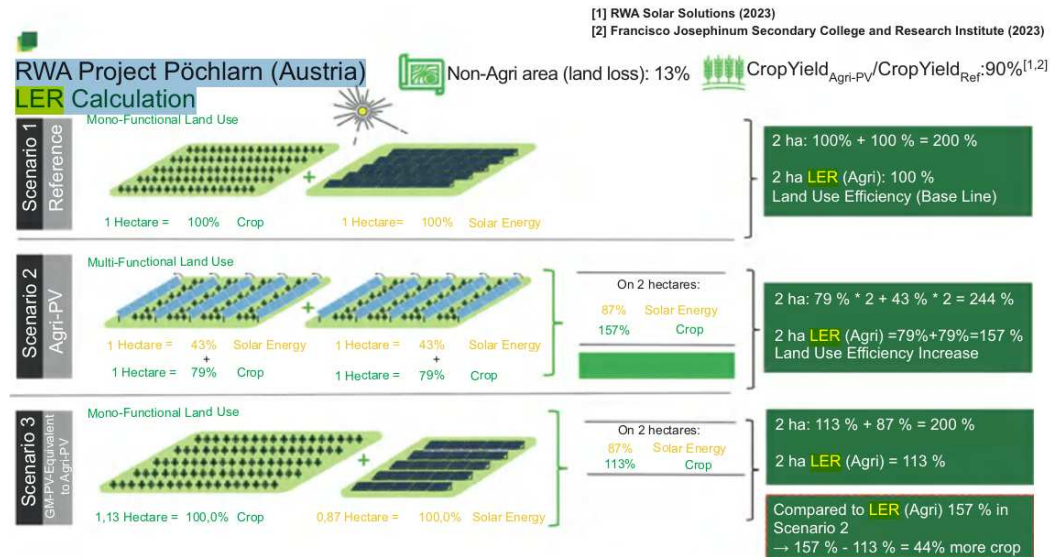


Figura 2.1: Scomposizione dei vari rendimenti

Poiché la formula si basa su rapporti tra grandezze, il risultato finale è particolarmente sensibile ai valori inseriti al denominatore. Alcuni studi mostrano un LER con valori superiori a 2, questo è spesso un risultato fuorviante, dovuto semplicemente al fatto che il raccolto nel campo senza pannelli è andato male ed è risultato quasi nullo.

In questi casi, il valore dell'indice può aumentare artificialmente, restituendo un'idea falsata di quanto l'impianto sia davvero sostenibile. Per evitare risultati fuorvianti, il calcolo del LER acquista un reale valore ingegneristico ed economico soltanto se le rese agricole, sia sotto i moduli sospesi che in pieno sole, si mantengono su livelli sensati.

L'immagine sopra dimostra matematicamente che l'agrivoltaico è più efficiente dell'agricoltura tradizionale: integrando produzione energetica e agricola sullo stesso terreno, si ottiene una produttività totale maggiore (LER 157%) rispetto al tenere le due attività separate, permettendo di produrre più energia e cibo con un uso del suolo più efficiente. Se valutato correttamente in questo modo, un LER positivo dimostra effettivamente che il problema del consumo di suolo fertile è in via di soluzione, fornendo una piena giustificazione ai maggiori costi necessari per realizzare le imponenti strutture rialzate dell'impianto. I pannelli sul campo si comportano come dei filtri ottici ben calibrati. Intercettano i raggi e modificano la Radiazione Fotosinteticamente Attiva, la cosiddetta luce PAR. Nel presente lavoro l'attenzione si concentra sullo spettro compreso tra i 400 e i 700 nanometri, che è l'unica porzione di luce sfruttata dalle piante per la fotosintesi e la produzione di biomassa. La struttura andrà progettata secondo le seguenti variabili: l'altezza, la distanza tra i filari e l'inclinazione dei moduli. Questi fattori determinano il Ground Coverage Ratio (GCR), che controlla quanta luce arriva a terra; per cui, l'ombra andrà calibrata in base ai fabbisogni della pianta, tramite la curva di risposta alla luce della pianta.

Questa curva non è una linea retta: mostra come l'assimilazione del carbonio cambi in base all'intensità del sole e il punto più importante è la saturazione luminosa, chiamato in gergo "Knee Point"[6]. Oltre questa soglia, la luce in più non serve a far crescere la pianta, diventando solo calore in eccesso che rischia di bruciarla o causare stress fotoinibitorio; quest'ultimo è un fenomeno nel quale la fotosintesi si blocca. Usando "inseguitori solari monoassiali" gestiti da algoritmi, è possibile orientare il pannello per intercettare il sole in più quando il fabbisogno di luce della pianta (il Daily Light Integral, o DLI) è già stato coperto, in questo modo si produce più energia senza danneggiare il raccolto.

L'agrivoltaico è uno strumento attivo per controllare il microclima. L'ombra dinamica dei moduli cambia il modo in cui il calore si muove sul terreno, abbattendo le temperature massime dell'aria e delle foglie durante l'estate; di conseguenza, l'evapotraspirazione diminuisce notevolmente. Il terreno trattiene l'umidità vicino alle radici e l'efficienza d'uso dell'acqua (WUE) sale, che in questo momento storico risulta essere un fattore vitale più che mai. Anche l'aria si muove diversamente: le strutture metalliche funzionano come barriere frangivento, riducendo la velocità dell'aria e proteggendo le piante. Inoltre, l'evapotraspirazione della vegetazione contribuisce al raffrescamento dei moduli fotovoltaici. In questo modo, i pannelli possono operare a temperature più basse, con potenziali benefici sia in termini di efficienza elettrica sia di durata delle celle.

2.2 Sinergie e benefici microclimatici

Costruire un impianto agrivoltaico stravolge il bilancio energetico del terreno. Non si tratta solo di fare ombra di giorno. Di notte entra in gioco il cosiddetto "effetto tettoia", cioè i pannelli bloccano fisicamente la radiazione infrarossa a onda lunga. Il terreno e le piante, di norma, disperdono questo calore verso il cielo stellato. Sotto i moduli, invece, il calore resta intrappolato. Questo fenomeno smorza le escursioni termiche, alzando in modo evidente le temperature minime notturne. Per chi coltiva, questo è un salvavita. L'impianto funziona come una massiccia barriera passiva contro le pericolose variazioni termiche della notte. Questo fenomeno è, nello specifico, molto utile alle prime colture che fioriscono, le quali potrebbero soffrire i ritorni di freddo primaverili. Se l'infrastruttura monta un sistema di inseguimento solare monoassiale, il vantaggio raddoppia. Il software può forzare i pannelli in posizione orizzontale durante la notte. Così facendo, si crea un vero e proprio scudo.

Lo scenario cambia completamente. Analizzando il microclima, si nota un netto distacco tra le diverse variabili termodinamiche. L'aria si comporta in un modo, le superfici in un altro. I dati fluidodinamici confermano che la temperatura dell'aria sotto i pannelli varia pochissimo, riportando differenze con il campo aperto quasi impercettibili. Questo succede per via del vento. Le strutture di supporto e le schiere di moduli innescano turbolenze e garantiscono un continuo ricambio d'aria. La vera differenza si misura sulle superfici solide. Tagliando la radiazione diretta a onda corta, le temperature del suolo e delle foglie crollano. Le piante si rinfrescano e questa mitigazione abbassa l'accumulo termico della coltura. L'invecchiamento delle foglie viene ritardato, prolungando il ciclo vitale e la capacità della pianta di compiere la fotosintesi. Soprattutto, subentra un effetto tampone contro i picchi di calore estremo. Previene danni fisiologici irreversibili, come le classiche scottature solari sui frutti, che distruggerebbero il valore commerciale dell'intero raccolto.

Tuttavia, si presenta un problema: quello dell'acqua. I pannelli sono enormi superfici impermeabili che alterano pesantemente la caduta della pioggia. La ricarica idrica naturale del profilo del suolo salta. I moduli deviano l'acqua, concentrandone il deflusso lungo la linea di gronda. Il terreno sottostante diventa estremamente eterogeneo: alcune zone restano all'asciutto, mentre altre si allagano. Inoltre, c'è un'ulteriore criticità: l'acqua che cade dal bordo basso del pannello forma gocce più grosse e con un'energia cinetica molto più alta rispetto alla normale pioggia. L'impatto con il suolo è violento; in questo modo, il terreno sottostante viene eroso. La terra colpita si compatta e forma delle croste superficiali. L'acqua non riesce più a infiltrarsi. Inizia a scivolare via velocemente, innescando un ruscellamento rapido che aggrava il rischio di erosione a solchi. Se il campo è in pendenza, il danno si amplifica.

Dunque, bisognerà svolgere una buona progettazione ingegneristica. Si possono montare sistemi di gronda per raccogliere l'acqua e riutilizzarla per l'irrigazione. Oppure si sfruttano algoritmi avanzati di anti-tracking; questi ultimi sono sistemi

che inclinano i pannelli a seconda delle necessità. Quando piove, il software mette i moduli in verticale o in orizzontale; in questo modo si evitano effetti indesiderati. Tuttavia, queste stesse strutture, che complicano l'idrologia del sito, diventano difese formidabili contro il meteo avverso. Le file di pannelli e i pali di metallo funzionano come complessi frangivento, frenando l'energia cinetica del vento e togliendo gran parte dello stress meccanico dalle chiome degli alberi. Durante precipitazioni violente o grandinate, la copertura ne assorbe l'impatto distruttivo. I tessuti vegetali più delicati escono indenni dalla tempesta.

Mettendo insieme tutti questi tasselli idrologici, termici e fluidodinamici, emerge la vera natura dell'impianto. Un sistema agrivoltaico si può definire non solo come un sito da cui produrre energia, ma come una struttura articolata ed equilibrata, che aumenta la resilienza e la produttività del sistema agricolo.

2.3 Classificazione e tecnologie dei sistemi agrivoltaici

La progettazione di un impianto agrivoltaico dipende principalmente dalla configurazione dello spazio disponibile. I sistemi agrivoltaici vengono generalmente classificati in base alla configurazione spaziale, al movimento dei moduli e alla tipologia di pannello adottata. Questi tre elementi determinano l'efficacia della coesistenza tra produzione agricola e produzione energetica. Dal punto di vista spaziale, la normativa e la letteratura distinguono due grandi famiglie di impianti: i sistemi overhead (a tettoia) e i sistemi interrow (interfilari). Di seguito è riportata un'immagine illustrativa tratta dal testo *Agrivoltaics: Technical, Ecological, Commercial and Legal Aspects* [5].

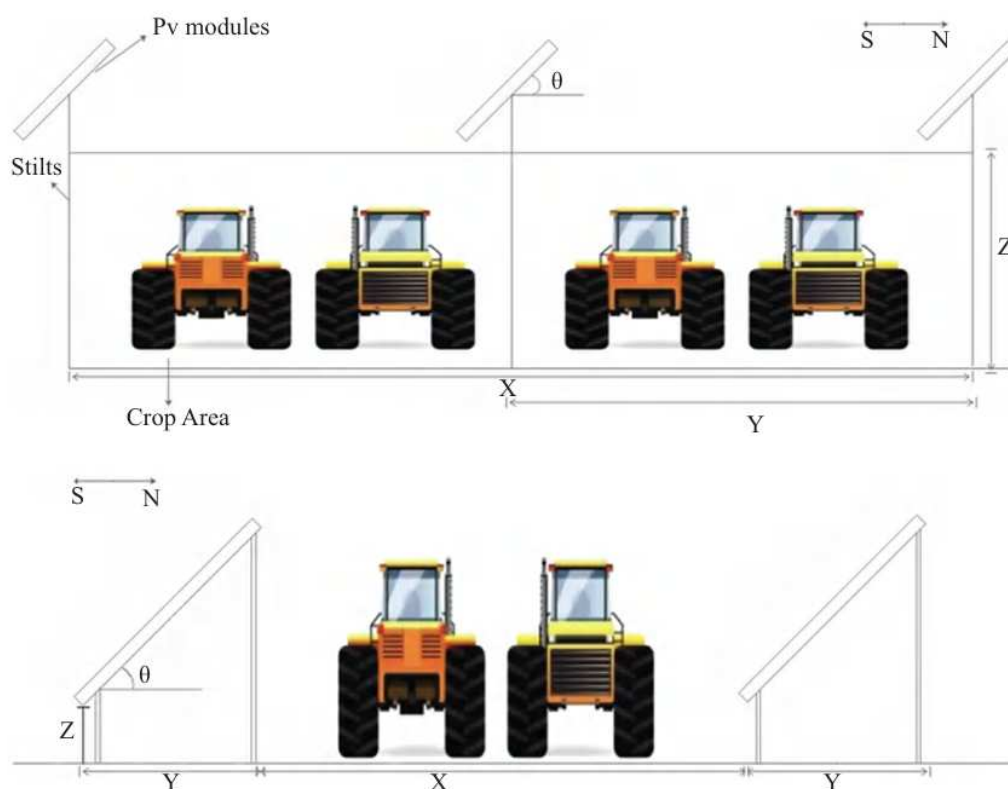


Figura 2.2: Confronto schematico tra le configurazioni agrivoltaiche di tipo overhead (rialzate) e inter-row (inter-filare).

I sistemi a tettoia sono caratterizzati da un'altezza minima di circa 2,1 metri, che può raggiungere anche i 4 o 5 metri. Tale scelta risponde a esigenze pratiche, poiché sotto la struttura devono poter transitare agevolmente i principali macchinari agricoli, come le mietitrebbie. Questa configurazione garantisce una maggiore facilità nello svolgimento delle operazioni agricole sull'intero appezzamento, ma comporta importanti sfide strutturali. L'elevata altezza e le ampie campate aumentano infatti i carichi aerodinamici dovuti al vento, rendendo necessarie fondazioni profonde e strutture portanti in acciaio di notevoli dimensioni, con un conseguente incremento dei costi di costruzione. I sistemi interfilari seguono invece una logica differente. I pannelli sono installati a un'altezza ridotta rispetto al suolo oppure in posizione verticale. In questa configurazione, le macchine agricole operano negli spazi lasciati liberi tra una fila di moduli e l'altra. Per consentire il passaggio dei trattori, la distanza tra i filari deve essere maggiore. Questa caratteristica determina una riduzione del Ground Coverage Ratio (GCR) e della densità di potenza installata per ettaro rispetto a un tradizionale impianto fotovoltaico a terra. In compenso, i costi strutturali risultano inferiori e l'impatto paesaggistico è generalmente più contenuto. Un secondo criterio di classificazione riguarda il movimento dei pannelli, ovvero il modo in cui viene gestito dinamicamente l'irraggiamento solare. Se l'obiettivo principale è contenere i

costi, la soluzione più semplice è rappresentata dagli impianti fissi, che richiedono una manutenzione limitata. In questo caso, i moduli rimangono immobili, con un'inclinazione costante generalmente compresa tra 10° e 30° . Tuttavia, questa configurazione presenta alcuni limiti, poiché proietta sul terreno un'ombra costante e genera gradienti radiativi non uniformi, che possono influenzare la crescita omogenea della biomassa. L'agrivoltaico avanzato supera tali limitazioni mediante l'impiego degli inseguitori solari (trackers). I sistemi biassiali seguono il percorso del Sole sia in azimut sia in elevazione, garantendo la massima produzione energetica, ma richiedono una meccanica più complessa e costi di gestione maggiori. Per questo motivo, nella maggior parte delle applicazioni si preferiscono gli inseguitori monoassiali. Ruotando attorno a un unico asse, generalmente orientato nord-sud, rappresentano oggi la soluzione più diffusa e ottimizzata dal punto di vista ingegneristico. Di seguito sono riportate le immagini illustrative del tracking monoassiale e biassiale, tratte dal testo *Agrivoltaics: Technical, Ecological, Commercial and Legal Aspects* [5]



Figura 2.3: Tecnologia del tracking monoassiali



Figura 2.4: Tecnologia del tracking biassiale

In ambito agrivoltaico, l'obiettivo non è esclusivamente massimizzare la produzione

di energia elettrica attraverso l'inseguimento della radiazione solare. A tale scopo vengono impiegati algoritmi di inseguimento agronomico, noti come anti-tracking. Il principio di funzionamento consiste nel deviare intenzionalmente i moduli dalla posizione ottimale per la produzione fotovoltaica, sacrificando parte dell'energia elettrica prodotta per soddisfare le esigenze fisiologiche della coltura. Questi sistemi monitorano il fabbisogno luminoso giornaliero (Daily Light Integral, DLI) e la curva di risposta della pianta alla luce. I moduli vengono mantenuti in posizione quasi verticale per ridurre l'ombreggiamento fino a quando la coltura non ha ricevuto la quantità di luce necessaria. Una volta raggiunto il valore obiettivo di radiazione, definito Knee Point, il sistema ripristina il normale inseguimento solare, riportando i moduli nella posizione ottimale per massimizzare la produzione di energia. I moduli bifacciali in silicio cristallino rappresentano oggi la tecnologia maggiormente impiegata. A differenza dei pannelli tradizionali, sono in grado di convertire la radiazione incidente su entrambe le superfici: quella superiore sfrutta prevalentemente la radiazione solare diretta, mentre quella inferiore intercetta la radiazione diffusa e riflessa dal terreno. Negli impianti sopraelevati, installati su superfici vegetate che riflettono parte della radiazione incidente, questo contributo può incrementare sensibilmente la produzione energetica. Parallelamente, sono in fase di sviluppo moduli semitrasparenti come alternativa ai pannelli convenzionali. Attraverso l'impiego di materiali specifici oppure aumentando la distanza tra le celle fotovoltaiche, è possibile modulare la qualità della radiazione trasmessa. In questo modo viene lasciata passare principalmente la Radiazione Fotosinteticamente Attiva (PAR), compresa tra 400 e 700 nm, indispensabile per il processo fotosintetico, mentre le altre lunghezze d'onda vengono sfruttate per la produzione di energia elettrica. L'efficienza complessiva di un impianto agrivoltaico dipende dall'interazione tra diversi parametri geometrici e costruttivi. In particolare, assumono un ruolo fondamentale l'altezza libera dal suolo, il passo interfilare e l'angolo di inclinazione dei moduli. Tali parametri determinano la distribuzione dell'ombreggiamento durante la giornata e, di conseguenza, influenzano il microclima della coltura. Anche il Ground Coverage Ratio (GCR), ossia il rapporto tra la superficie occupata dai moduli e la superficie agricola disponibile, rappresenta un parametro di particolare importanza. Un valore elevato di GCR consente di aumentare la potenza installata, ma comporta anche un maggiore ombreggiamento. L'altezza della struttura può contribuire a mitigare questo effetto, favorendo una distribuzione più uniforme della radiazione prima che raggiunga la vegetazione. Tale fenomeno può essere osservato, ad esempio, attraverso la diversa maturazione delle colture all'interno dello stesso appezzamento. Al tempo stesso, un'eccessiva altezza della struttura può aumentare l'energia cinetica delle gocce d'acqua che defluiscono dai pannelli, favorendo fenomeni di erosione e degrado del suolo. Per questo motivo, la progettazione di un impianto agrivoltaico richiede un'attenta valutazione dei parametri geometrici, strutturali e agronomici, al fine di garantire un corretto equilibrio tra produzione energetica, tutela del suolo e sviluppo delle colture.

2.4 Integrazione agronomica

Capire quale coltura collocare sotto i pannelli e come questa reagisca all'ombreggiamento rappresenta uno degli aspetti più importanti del lavoro di tesi. Non è possibile progettare un impianto senza conoscere le caratteristiche fisiologiche delle piante, in particolare il modo in cui le foglie intercettano la luce e svolgono la fotosintesi. Un ottimo punto di partenza è la distinzione tra piante C3 e C4. Le specie C3 si adattano molto bene alle condizioni tipiche dell'agritvoltaico. Ne fanno parte la maggior parte delle orticole a foglia, come lattuga, spinaci, bietola e cicoria, ma anche alberi da frutto come il melo e il kiwi e diverse specie foraggere. Queste piante richiedono livelli di illuminazione relativamente contenuti. Presentano infatti punti di saturazione luminosa bassi e modificano la propria morfologia per adattarsi all'ombreggiamento. In particolare, aumentano l'area fogliare specifica (Specific Leaf Area, SLA), sviluppando foglie più ampie e sottili, capaci di sfruttare meglio la radiazione diffusa presente sotto le strutture.

Per le piante C4, come il mais, il discorso è differente. Queste specie richiedono elevati livelli di radiazione solare diretta per garantire una crescita ottimale. Se il valore della radiazione giornaliera diminuisce eccessivamente, la crescita rallenta, le foglie possono ingiallire a causa della clorosi, ossia una condizione in cui la pianta riduce la propria capacità fotosintetica, e la produzione può diminuire sensibilmente o, nei casi più gravi, azzerarsi. Tuttavia, è opportuno precisare che la tolleranza all'ombra non rappresenta una caratteristica immutabile determinata esclusivamente dal patrimonio genetico, ma varia anche in funzione delle condizioni ambientali. L'effetto dell'ombreggiamento sulla resa finale dipende quindi dall'equilibrio tra due fattori: da un lato la riduzione della radiazione disponibile, dall'altro i benefici derivanti dal miglioramento del microclima.

Nei climi caldi e aridi, come in alcune aree dell'Italia meridionale, la presenza dei pannelli costituisce una risorsa importante, poiché riduce significativamente il carico termico. Ciò limita la fotoinibizione, ossia il fenomeno che si verifica quando un eccesso di radiazione induce la pianta a chiudere gli stomi per ridurre la perdita d'acqua, compromettendo così la fotosintesi. Sotto l'impianto, le temperature delle foglie e del terreno possono diminuire di diversi gradi. Inoltre, l'evapotraspirazione si riduce del 20-40%, favorendo una maggiore disponibilità di acqua nel suolo. In condizioni di scarsità idrica, questa riserva permette alle piante di mantenere gli stomi aperti anche nelle ore più calde della giornata e di proseguire l'attività fotosintetica, compensando almeno in parte la riduzione della radiazione incidente. In situazioni di siccità particolarmente intensa si possono persino ottenere produzioni superiori rispetto alle coltivazioni in pieno campo, come dimostrato, ad esempio, dal caso dell'Arizona [5]. L'ombreggiamento protegge inoltre i frutti dalle scottature solari e può migliorare la qualità del raccolto, aumentando, ad esempio, il contenuto di proteine e glutine nei cereali.

Un impianto agrivoltaico deve comunque garantire la piena operatività delle

attività agricole. Deve quindi consentire il passaggio dei mezzi meccanici e la normale esecuzione delle operazioni colturali. Le geometrie della struttura devono essere definite fin dalle prime fasi progettuali, considerando le caratteristiche dei macchinari già impiegati dall'azienda agricola. Il parametro principale è rappresentato dall'altezza libera dal suolo. Nei sistemi overhead, essa deve essere almeno pari a 2,1 metri per le normali lavorazioni orticole, mentre per le colture cerealicole e le grandi colture estensive è generalmente necessario raggiungere i 4 o 5 metri. Questo spazio consente il passaggio in sicurezza di mietitrebbie e trattori senza il rischio di urtare i moduli fotovoltaici. Anche la distanza tra le file, ossia il pitch, deve essere progettata in funzione della larghezza operativa delle attrezzature agricole, come seminatrici e spandiconcime, che generalmente varia tra 6 e 18 metri. A tale misura viene normalmente aggiunta una fascia di sicurezza di circa 50 centimetri per lato, così da compensare eventuali errori di guida.

Anche i cavi elettrici devono essere adeguatamente interrati a una profondità di almeno 45-60 centimetri, per evitare che aratri o erpici possano danneggiarli durante le lavorazioni. Il sistema deve inoltre integrarsi con gli impianti di irrigazione e con le reti di raccolta dell'acqua piovana proveniente dai pannelli, riducendo i consumi energetici associati al pompaggio dai pozzi. Come illustrato nel capitolo precedente, il deflusso dell'acqua dai pannelli può generare effetti indesiderati sul terreno. Per limitare questi fenomeni è fondamentale mantenere una copertura erbosa continua oppure introdurre colture di copertura, in grado di stabilizzare il suolo attraverso l'apparato radicale.

Un ulteriore esempio di utilizzo multifunzionale dell'impianto è rappresentato dal pascolo degli animali. Le pecore trovano ombra e riparo sotto i moduli durante le ore più calde della giornata, migliorando il proprio benessere, mentre contribuiscono alla manutenzione del cotico erboso. Ciò riduce i costi degli sfalci meccanici, limita le emissioni e favorisce la fertilizzazione naturale del terreno.

Infine, un impianto agrivoltaico presenta una vita utile compresa tra 25 e 30 anni, periodo durante il quale il disturbo meccanico e chimico sul suolo risulta generalmente contenuto.

2.5 Il quadro normativo e i requisiti di incentivazione in Italia (MASE-GSE)

Le regole italiane in materia di agrivoltaico sono cambiate nel giugno del 2022. Con la pubblicazione delle Linee Guida in materia di Impianti Agrivoltaici da parte del MASE (allora Ministero della Transizione Ecologica), il settore ha finalmente acquisito un quadro normativo di riferimento. Il documento distingue chiaramente tre categorie di impianti: il fotovoltaico a terra tradizionale, l'agrivoltaico "base" e l'agrivoltaico "avanzato".

Il fotovoltaico a terra tradizionale è un impianto monofunzionale, che sostituisce l'attività agricola e comporta un'occupazione del suolo spesso irreversibile. L'agrivoltaico "base", invece, consente la coesistenza tra pannelli fotovoltaici e coltivazioni sullo stesso terreno, ma senza garantire necessariamente un'effettiva integrazione tra le due attività. In molti casi, infatti, le strutture possono ostacolare il passaggio dei mezzi agricoli o ridurre significativamente la produttività del terreno.

La vera evoluzione è rappresentata dall'agrivoltaico "avanzato". Questa tipologia è definita dalla normativa vigente e disciplinata secondo i criteri introdotti dai decreti ministeriali del 2012. Si tratta di sistemi progettati affinché l'ingegneria sia al servizio dell'attività agricola. I moduli sono installati a un'altezza adeguata oppure in posizione verticale, in modo da non ostacolare le lavorazioni agricole né il pascolo degli animali. Per legge, solo questa configurazione garantisce la tutela e la valorizzazione delle caratteristiche produttive del suolo agricolo. Essa consente di produrre energia mantenendo la continuità dell'attività agricola ed è l'unica che permette di accedere agli incentivi statali.

Per beneficiare di tali incentivi, il progetto deve rispettare specifici requisiti geometrici. Il primo riguarda la superficie destinata all'attività agricola. La normativa stabilisce che la superficie agricola o pastorale ($S_{agricola}$) debba rappresentare almeno il 70% della superficie totale dell'impianto (S_{tot}). Di conseguenza, i pannelli non possono occupare più del 40% della superficie disponibile, parametro identificato come Land Area Occupation Ratio (LAOR).

Un ulteriore requisito riguarda l'altezza libera dal suolo, parametro fondamentale per consentire il passaggio di persone, animali e mezzi agricoli. Tale quota viene misurata dal bordo inferiore del pannello nella posizione di massima inclinazione. Il valore minimo previsto è pari a 1,3 metri per gli impianti con moduli verticali o destinati al pascolo degli animali, mentre sale ad almeno 2,1 metri nel caso di coltivazioni poste sotto i moduli. Solo in questo modo è possibile garantire il transito in sicurezza dei normali mezzi agricoli.

Infine, la producibilità elettrica dell'impianto agrivoltaico deve raggiungere almeno il 60% di quella ottenibile con un impianto fotovoltaico tradizionale installato nella stessa area. Il confronto viene effettuato assumendo come riferimento un impianto fisso orientato a sud, con moduli aventi un rendimento del 20% e un'inclinazione pari alla latitudine del sito meno 10°.

A sostenere questa transizione contribuiscono le risorse del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), in particolare quelle previste dalla Missione 2, dedicata allo "Sviluppo Agro-voltaico". Le risorse stanziare ammontano a oltre 1,09 miliardi di euro e sono gestite dal GSE (Gestore dei Servizi Energetici), la società controllata dallo Stato incaricata di promuovere e gestire gli incentivi per le fonti rinnovabili e l'efficienza energetica in Italia.

Gli incentivi prevedono un contributo a fondo perduto fino al 40% delle spese di realizzazione dell'impianto. Inoltre, è riconosciuta una tariffa incentivante sull'energia elettrica netta immessa in rete per un periodo di 20 anni. L'accesso ai finanziamenti

avviene attraverso procedure pubbliche, articolate in due strumenti. I "Registri" sono riservati agli imprenditori agricoli che realizzano impianti fino a 1 MW di potenza, mentre le "Aste" sono aperte a impianti di qualsiasi dimensione, realizzati anche da grandi operatori.

Anche il meccanismo di remunerazione dell'energia prodotta varia in funzione della potenza installata. Per impianti con potenza inferiore a 200 kW si applica la Tariffa Fissa Omnicomprensiva, mediante la quale il GSE riconosce un corrispettivo fisso per ogni kilowattora immesso in rete. Per impianti di potenza superiore a 200 kW si applica invece il sistema del Feed-in Premium, nel quale il GSE integra il prezzo di mercato dell'energia fino al raggiungimento della tariffa incentivante prevista dalla normativa.

Per verificare il rispetto dei requisiti previsti, la normativa introduce un sistema di monitoraggio articolato su due livelli. Il primo è finalizzato a verificare l'effettiva prosecuzione dell'attività agricola attraverso indicatori relativi alla produzione lorda agricola. Il rendimento economico dell'azienda viene confrontato con quello di aziende analoghe utilizzando i dati della banca dati RICA o del fascicolo aziendale. Ogni anno il gestore deve trasmettere al GSE una relazione agronomica, redatta e firmata da un professionista iscritto al relativo albo professionale. Qualora la produzione agricola diminuisca del 30% o più rispetto ai valori di riferimento, vengono avviati controlli e ispezioni in campo.

Il secondo livello di monitoraggio è dedicato alla valutazione degli effetti ambientali dell'impianto, mediante il controllo di parametri quali il risparmio idrico, la fertilità del suolo e le variazioni del microclima locale. A tal fine, la normativa prevede l'installazione di una rete di sensori distribuiti sul sito. Tali strumenti devono registrare, con cadenza di 15 minuti, parametri quali temperatura dell'aria, umidità, radiazione solare e velocità del vento. È inoltre prevista l'installazione di una stazione meteorologica in pieno campo e di almeno un sensore posizionato sotto o in prossimità dei pannelli per ogni ettaro di impianto. Qualora venga meno l'equilibrio tra produzione agricola e produzione energetica, la normativa prevede sanzioni che possono arrivare fino alla revoca totale degli incentivi.

Capitolo 3

Area di Studio

3.1 Il potenziale agrivoltaico nel contesto nazionale

L'Italia si trova in una posizione particolarmente favorevole per lo sfruttamento dell'energia solare. L'elevata disponibilità di radiazione durante l'anno rappresenta infatti uno degli elementi su cui l'Unione Europea punta per il raggiungimento degli obiettivi della transizione energetica. Il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) stabilisce obiettivi particolarmente ambiziosi. Entro il 2030 dovranno essere installati 85 GW di nuova potenza da fonti rinnovabili. Per il solo settore fotovoltaico, ciò significa raggiungere una produzione annua di almeno 100 TWh, più del doppio rispetto a quella registrata negli ultimi anni. Si tratta di un incremento significativo.

Per raggiungere tale obiettivo senza compromettere il suolo agricolo e senza aumentare i conflitti legati al suo utilizzo, risulta necessario superare il modello tradizionale degli impianti fotovoltaici a terra. Attualmente tali impianti occupano circa 16.400 ettari, localizzati prevalentemente in Puglia, Sicilia e Lazio. Sebbene questa superficie possa apparire considerevole, essa rappresenta soltanto lo 0,13% della superficie agricola nazionale. Ciò evidenzia come esista ancora un ampio potenziale per integrare la produzione di energia elettrica con le attività agricole.

L'Italia rappresenta un contesto particolarmente favorevole anche per le caratteristiche del proprio settore agroalimentare. Pur essendo uno dei comparti economici più importanti del Paese, esso presenta una struttura produttiva fortemente frammentata. I dati dell'ultimo Censimento Generale dell'Agricoltura mostrano infatti la presenza di un elevato numero di aziende agricole di piccole dimensioni, maggiormente esposte alle oscillazioni dei prezzi dell'energia e agli effetti dei cambiamenti climatici, quali lunghi periodi di siccità e ondate di calore sempre più frequenti.

Anche la ricerca scientifica conferma questa situazione. Gli studi dedicati alla pianificazione sostenibile del settore agricolo evidenziano come le principali priorità siano una gestione più efficiente del suolo e la riduzione dell'impatto ambientale delle attività produttive. In questo contesto, l'agrivoltaico rappresenta una possibile soluzione, poiché consente non solo di produrre energia elettrica, ma anche di mitigare gli effetti del cambiamento climatico sulle colture e di ridurre i costi energetici delle aziende agricole.

Un'analisi delle superfici marginali e dei terreni agricoli abbandonati mostra come il potenziale disponibile sia particolarmente elevato. Secondo le stime, sarebbe sufficiente destinare circa l'1% delle aree classificate come "abbandonate" o "non utilizzate" per installare quasi 60 GW di potenza fotovoltaica. Un simile risultato consentirebbe di raggiungere una parte consistente degli obiettivi nazionali. Estendendo tale quota al 5% delle superfici marginali, il potenziale installabile supererebbe i 296 GW, una capacità largamente superiore al fabbisogno nazionale, senza sottrarre terreno alla produzione agricola.

Le regioni che presentano la maggiore disponibilità di superfici idonee sono Toscana, Emilia-Romagna, Piemonte e Sicilia. Inoltre, la diffusione dell'agrivoltaico è già una realtà in alcune aree del Paese. L'Emilia-Romagna rappresenta una delle regioni più avanzate, producendo circa il 15% della propria energia fotovoltaica all'interno delle aziende agricole. Seguono Sardegna e Toscana.

Nonostante queste prospettive positive, rimane un importante limite rappresentato dagli elevati costi iniziali di investimento. La realizzazione di strutture sopraelevate e tecnologicamente avanzate richiede infatti investimenti significativi, che la letteratura individua come uno dei principali ostacoli alla diffusione dell'agrivoltaico.

Un contributo importante al superamento di questa criticità deriva dall'innovazione tecnologica. L'impiego di sistemi di inseguimento solare (solar trackers), che orientano automaticamente i moduli seguendo il percorso del Sole durante la giornata, consente infatti di incrementare la produzione di energia dal 20% al 40% rispetto agli impianti fissi, riducendo i tempi di ritorno dell'investimento.

Parallelamente, la ricerca si sta concentrando sullo sviluppo delle celle fotovoltaiche di nuova generazione, denominate tandem. Queste tecnologie combinano il silicio con materiali innovativi, come la perovskite, con l'obiettivo di superare i limiti di efficienza delle celle tradizionali. Le prospettive di ricerca indicano la possibilità di raggiungere rendimenti superiori al 30% nei prossimi anni. Un incremento dell'efficienza consentirebbe di installare una minore superficie di pannelli a parità di potenza prodotta, aumentando la distanza tra le file e favorendo una maggiore disponibilità di radiazione solare per le colture.

Anche gli enti di ricerca nazionali, come l'ENEA, svolgono un ruolo fondamentale nello sviluppo del settore. Attraverso l'utilizzo di sistemi informativi territoriali, essi integrano i dati relativi all'irraggiamento solare con le cartografie dell'uso del suolo, individuando le aree maggiormente idonee all'installazione degli impianti ed escludendo quelle soggette a vincoli ambientali o paesaggistici. La diffusione dell'agrivoltaico sul territorio nazionale risulta tuttavia ancora molto eterogenea tra le diverse regioni, come evidenziato nella mappa riportata di seguito.

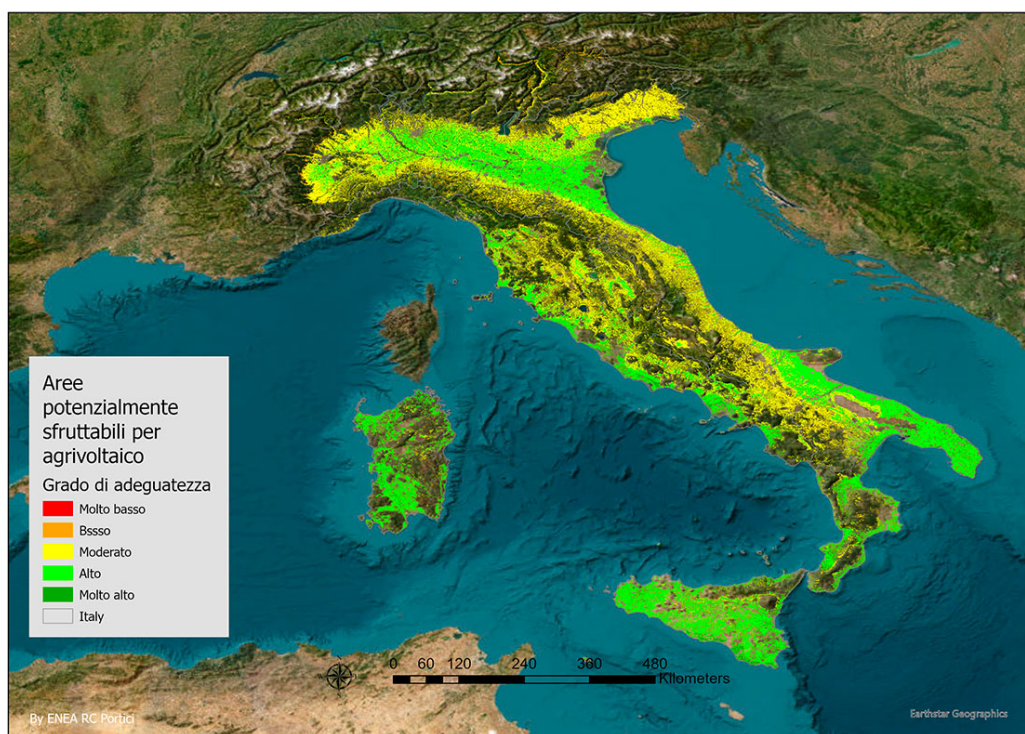


Figura 3.1: Distribuzione geografica della potenzialità degli impianti agrivoltaici sul territorio italiano, stilata da ENEA.

È tuttavia necessario prestare particolare attenzione a un aspetto fondamentale. Le analisi effettuate su scala regionale non possono essere direttamente applicate alla progettazione di un singolo impianto, poiché il microclima locale presenta una notevole variabilità. Le mappe nazionali rappresentano un valido strumento per le valutazioni preliminari e per le analisi statistiche, ma non sono sufficienti per la progettazione esecutiva. La realizzazione di un impianto agrivoltaico richiede infatti uno studio specifico del sito, in grado di simulare con elevata precisione il comportamento del vento, dell'ombreggiamento e degli scambi termici. Solo attraverso un'accurata analisi del microclima e delle variazioni dell'evapotraspirazione delle colture è possibile valutare correttamente gli effetti dell'impianto sulla produttività agricola.

3.2 Analisi del sito specifico d'installazione

L'area scelta per il progetto si trova nel comune di Jesi, nelle Marche, in provincia di Ancona. Le coordinate geografiche del sito sono 43°30'02.50"N e 13°15'04.04"E. In questa area sono state effettuate le simulazioni necessarie alla validazione del modello.

Dall'analisi del terreno mediante immagini satellitari di Google Earth emerge una morfologia pressoché pianeggiante. Il dislivello complessivo dell'appezzamento non

supera infatti i tre metri. Dal punto di vista progettuale, questa rappresenta una condizione particolarmente favorevole, poiché l'assenza di pendenze significative e di variazioni altimetriche semplifica sia il dimensionamento sia l'installazione delle strutture di sostegno in acciaio. Inoltre, vengono ridotte due possibili criticità. La prima riguarda l'assenza di ombreggiamenti dovuti alla morfologia del territorio; la seconda è legata al limitato deflusso superficiale delle acque meteoriche, favorito dalle modeste pendenze del terreno. Di seguito è riportata una vista satellitare dell'area di studio, dalla quale è possibile osservare il contesto geografico del sito, situato in una zona rurale nelle vicinanze del centro abitato di Jesi.



Figura 3.2: Inquadramento dell'area di studio e posizionamento della strumentazione in campo.

Per valutare il potenziale di produzione energetica del sito, è stata utilizzata la piattaforma PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), sviluppata dal Joint Research Centre (JRC) della Commissione Europea. Tale strumento è inoltre quello indicato dalle Regole Operative del GSE per la stima ufficiale della producibilità degli impianti fotovoltaici. L'analisi è stata condotta utilizzando i dati ad alta risoluzione del database PVGIS-SARAH3.

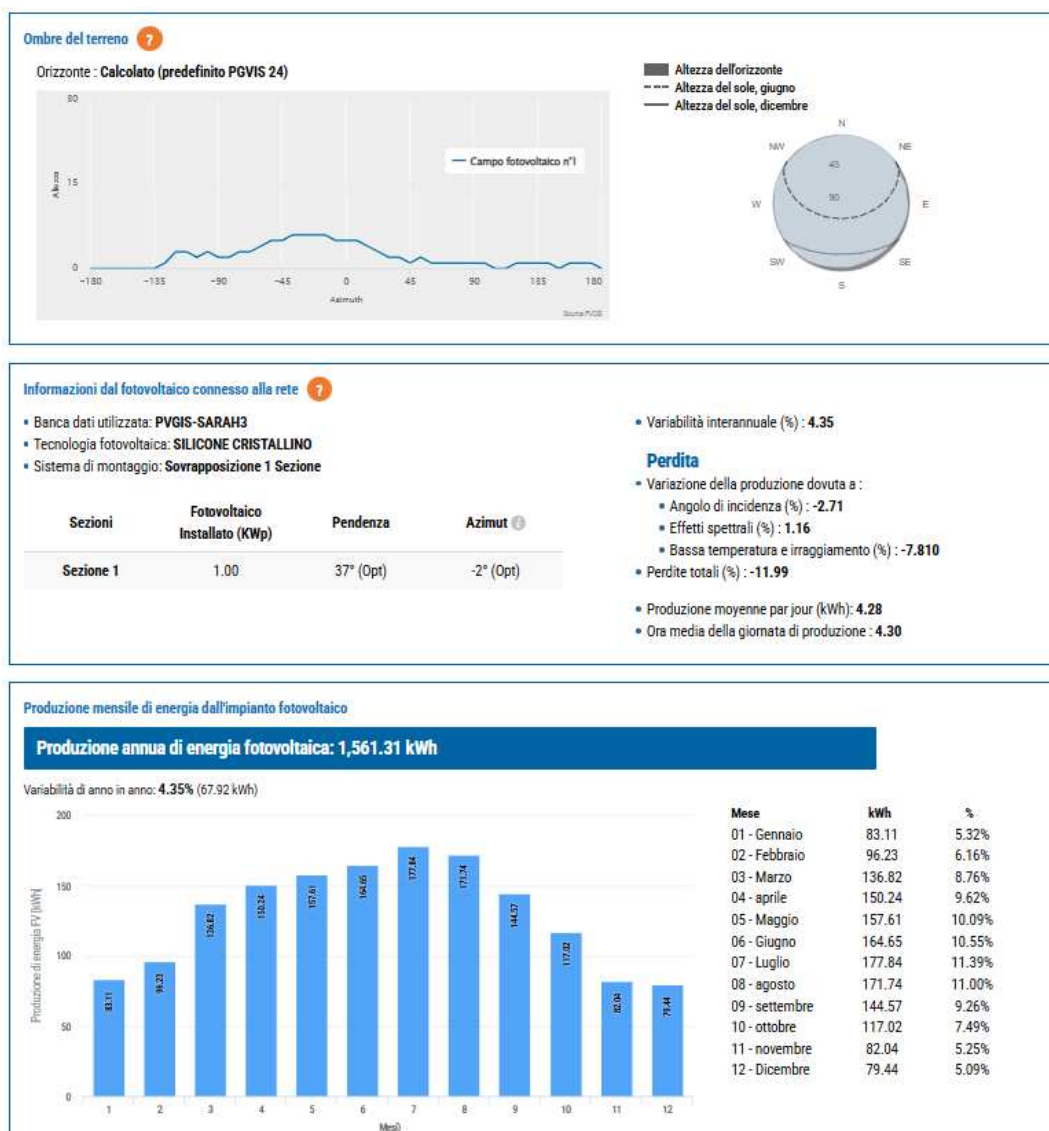


Figura 3.3: Potenziale fotovoltaico della zona di Jesi, fornito dal simulatore PVGIS [1]

I risultati ottenuti evidenziano un elevato potenziale energetico del sito. Ipotizzando l'impiego di moduli fotovoltaici in silicio cristallino, la simulazione stima una produzione annua pari a circa 1561 kWh per ogni kWp di potenza installata. Per raggiungere tale valore è necessario adottare una configurazione geometrica ottimale, con moduli fissi inclinati di 37° e orientati a -2° rispetto al sud geografico. Questa configurazione consente di massimizzare l'intercettazione della radiazione solare nel corso dell'anno.

Come previsto, la produzione di energia risulta concentrata prevalentemente nei mesi estivi, con un picco nel mese di luglio, durante il quale la produzione stimata raggiunge circa 178 kWh per kWp installato. Quest'ultimo rappresenta la potenza nominale massima che un impianto fotovoltaico può erogare in condizioni standard di prova.

Dal punto di vista energetico, tali risultati sono particolarmente favorevoli. Tuttavia, sotto il profilo agronomico, l'elevata disponibilità di radiazione può determinare condizioni di forte stress termico. L'intensa radiazione fotosinteticamente attiva aumenta infatti l'evapotraspirazione, determinando un maggiore consumo idrico sia da parte delle colture che del terreno. Nelle ore centrali della giornata, le piante possono entrare in condizioni di fotoinibizione, riducendo l'attività fotosintetica e, di conseguenza, l'assimilazione del carbonio.

Alla luce di queste considerazioni, il sito di Jesi rappresenta un contesto particolarmente idoneo per lo studio degli effetti di un impianto agrivoltaico. È opportuno precisare, tuttavia, che le simulazioni effettuate con PVGIS fanno riferimento a un impianto fotovoltaico tradizionale installato a terra e non a una configurazione agrivoltaica. In questa fase, l'obiettivo dell'analisi era esclusivamente quello di verificare che il sito fosse caratterizzato da un elevato livello di irraggiamento solare annuo, requisito pienamente confermato dai risultati ottenuti.

Capitolo 4

Metodologia di Simulazione Microclimatica in Ambiente QGIS tramite SOLWEIG

4.1 Modellazione preliminare in ambiente ENVI-met

Nella fase iniziale di questo progetto di tesi, il primo approccio alla modellazione del microclima è stato condotto utilizzando il software ENVI-met. Inizialmente, la scelta è ricaduta su questo programma per la sua nota capacità di elaborare simulazioni tridimensionali, sia a livello fluidodinamico che termoradiativo, garantendo un'ottima risoluzione. Per imparare a utilizzare correttamente le logiche di calcolo del software, che è stato impiegato nella sua versione gratuita, è stato fondamentale lo studio approfondito dei manuali e dei tutorial ufficiali messi a disposizione dagli sviluppatori.

Per condurre questo primo tentativo, è stata selezionata un'area di studio diversa rispetto a quella che poi è stata analizzata nel progetto definitivo su QGIS. Nonostante il sito si trovasse in un contesto rurale differente, presentava una conformazione del terreno quasi completamente pianeggiante. Questa caratteristica si è rivelata ideale per semplificare la costruzione geometrica del modello 3D e per facilitare le prime analisi dei flussi di calore.



Figura 4.1: Vista dal satellite

Il lavoro pratico è iniziato con la configurazione del Workspace, lo spazio di lavoro virtuale in cui sono state inserite le coordinate geografiche del sito. In questo ambiente sono stati preparati i file di base per i due scenari oggetto di analisi: lo scenario Ante-Operam (ovvero lo stato di fatto, senza alcuna copertura) e lo scenario Post-Operam (con l'inserimento dei pannelli agrivoltaici). Subito dopo, si è passati alla ricostruzione spaziale dell'area, aprendo Spaces, che è il modellatore 3D integrato nel programma. Inserendo l'immagine satellitare come sfondo (background), si è proceduto a ricalcare l'intera area, andando a definire le diverse geometrie solide. All'interno di ENVI-met, queste geometrie vengono elaborate seguendo una logica spaziale composta da piccoli "cubetti".

Il primo vero passaggio di modellazione ha riguardato la definizione del profilo del terreno. L'altitudine è stata mantenuta costante e in piano su quasi tutta l'area di simulazione, tranne in una zona specifica in cui è stato ricreato un naturale avvallamento del terreno, dovuto alla presenza di un fosso. Una volta terminato il suolo, si è passati all'inserimento degli elementi fisici circostanti. Nello specifico, è stato inserito un classico edificio con la funzione "building", al quale è stata assegnata un'altezza di 4 metri, ed è stata posizionata della vegetazione, optando per alberi sempreverdi a chioma densa. Un'attenzione particolare è stata dedicata alla modellazione della coltura agricola. Infatti, per simulare la presenza di un prato di erba medica, si è trovato un compromesso tecnico molto utile: si è sfruttato il modulo del software dedicato agli alberi, impostando però le caratteristiche di una pianta bassa e diffusa su tutto il campo agricolo, fissando un'altezza costante e precisa di

60 centimetri. Con questo ultimo passaggio si è conclusa la preparazione del primo scenario.

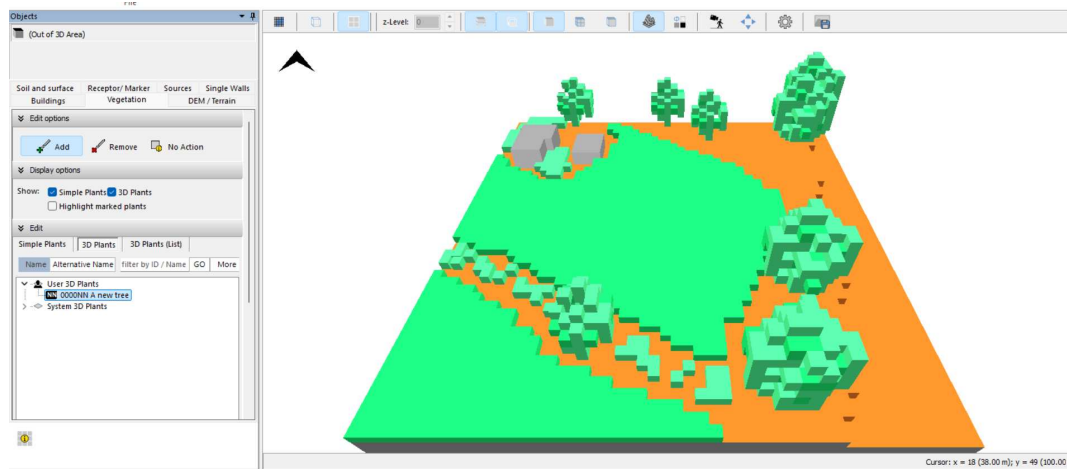


Figura 4.2: Modello 3D privo di pannelli.

Passando al modello completo, il lavoro si è concentrato sull'inserimento dell'impianto fotovoltaico. I pannelli solari sono stati creati utilizzando la funzione Single Walls (muri singoli) offerta dal software. Per quanto riguarda l'inserimento dell'impianto fotovoltaico, il lavoro è iniziato definendo le caratteristiche specifiche del pannello all'interno di ENVI-met. A queste strutture, modellate come Single Wall, sono state prima di tutto date dei materiali, i quali hanno varie caratteristiche termiche. In questa stessa fase sono state impostate anche le altezze per simulare il fatto che l'impianto fosse sollevato da terra: la base del pannello è stata collocata a 3,7 metri di altezza, mentre la parte superiore è stata impostata a quota 4 metri, avendo quindi uno spessore di 30 cm. Solo successivamente si è passati al loro posizionamento vero e proprio all'interno dell'area di studio. Visto che ogni singolo blocco della griglia aveva dimensioni di 2x2 metri, i filari sono stati disposti a scacchiera per ottenere una distanza in diagonale di circa 5,6 metri tra loro. Inoltre, per essere sicuri di posizionare i moduli in modo esatto, sono stati inseriti alcuni pannelli usati solo come "distanziatori provvisori", che sono stati rimossi subito dopo aver ottenuto l'allineamento corretto.

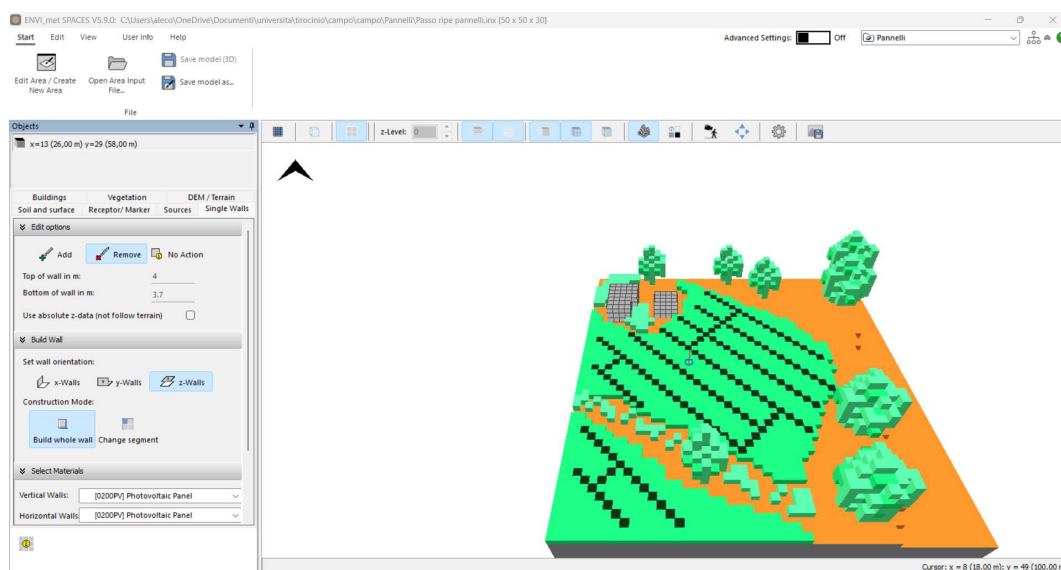


Figura 4.3: Modello 3D con pannelli.

Nonostante la grande attenzione dedicata alla costruzione del modello 3D e all'assegnazione delle proprietà fisiche ai materiali, la successiva fase di simulazione ha fatto emergere un problema critico. Andando a confrontare i risultati termici e radiativi dei due scenari tramite Leonardo (ovvero il programma di ENVI-met che si occupa di visualizzare e rielaborare i dati finali), non è stata notata alcuna differenza microclimatica. In pratica, il terreno sotto l'impianto mostrava la stessa temperatura dell'area in campo aperto. Il motivo di questo mancato risultato, che verrà analizzato più nel dettaglio nel capitolo dedicato alle difficoltà operative, non è dipeso da un errore umano nell'impostazione delle geometrie, ma da un limite interno al software stesso. Questo difetto rende i pannelli praticamente "trasparenti" ai raggi solari, impedendo di valutare correttamente l'interazione tra l'impianto e l'ambiente. Di fronte a questo ostacolo, si è deciso di chiudere i test in ENVI-met e di spostare definitivamente tutto il lavoro di analisi all'interno dell'ambiente QGIS.

4.2 L'architettura del plugin UMEP

UMEP è l'acronimo di Urban Multi-scale Environmental Predictor. Si tratta di una piattaforma open-source per la modellazione ambientale. Uno dei suoi principali punti di forza è la possibilità di operare direttamente all'interno di QGIS. Questo aspetto risulta particolarmente rilevante, poiché lavorare in un ambiente GIS consente di associare i calcoli alle coordinate reali del sito di studio. In questo modo è possibile operare in scala reale e simulare con maggiore precisione il comportamento della luce, dell'ombra e degli scambi termici sul terreno analizzato.

Il software opera in maniera sequenziale, poiché il risultato di un processo costituisce la base di partenza per quello successivo. La sua architettura si articola in tre blocchi principali. Il primo è il Pre-processor, che rappresenta la fase di inserimento e

preparazione dei dati. In questa sezione vengono organizzate le informazioni relative alla morfologia del suolo e predisposti i database meteorologici necessari per impostare le equazioni del sistema.

Successivamente interviene il Processor, ovvero il motore matematico del programma. Esso contiene i modelli fisici di superficie che calcolano il bilancio energetico e analizzano le diverse interazioni ambientali. Infine, si utilizza il Post-processor, attraverso il quale i risultati vengono resi disponibili in una forma più facilmente interpretabile. In questa fase, i dati spaziali vengono convertiti in mappe tematiche a colori e vengono estratti i valori numerici necessari per l'analisi statistica delle prestazioni del progetto.

È necessario precisare il significato del termine Urban presente nel nome dell'estensione. UMEP è stato sviluppato dalla comunità scientifica per studiare il calore negli ambienti urbani e supportare la pianificazione della resilienza climatica dei quartieri. Tuttavia, il suo utilizzo può essere esteso anche al contesto rurale. Il programma, infatti, esegue i calcoli pixel per pixel e risponde in funzione degli input forniti. Pertanto, indipendentemente dal fatto che l'area analizzata sia costituita da superfici asfaltate o da un campo coltivato, il software elabora una risposta coerente con le caratteristiche assegnate al modello.

Per l'agritvoltaico avanzato, l'utilizzo di UMEP rappresenta una soluzione applicabile. Le file di pannelli sopraelevati generano una distribuzione radiativa complessa, proiettando ombre irregolari sul terreno e sulle colture. Per valutare la validità del progetto è quindi necessario disporre di uno strumento in grado di mappare queste interazioni microclimatiche. Pur non essendo stato sviluppato specificamente per l'ambito agricolo, UMEP fornisce la risoluzione spaziale necessaria per analizzare tali fenomeni.

4.3 Il Modulo SOLWEIG

Il modulo SOLWEIG, acronimo di SOLar and LongWave Environmental Irradiance Geometry, rappresenta il motore di calcolo utilizzato per la simulazione spaziale. Nato inizialmente per modellare ambienti radiativi tridimensionali complessi e valutare il comfort termico negli spazi aperti, restituisce un output particolarmente rilevante: una mappa bidimensionale ad alta risoluzione della Temperatura Radiante Media, indicata come T_{mrt} . A livello termodinamico, questa grandezza rappresenta uno dei parametri più attendibili per stimare il reale carico termico percepito da un corpo fisico esposto all'ambiente esterno. Essa fornisce infatti un'informazione più completa rispetto alla semplice temperatura dell'aria, che descrive solo una parte delle condizioni termiche. La T_{mrt} sintetizza in un unico indicatore l'effetto combinato di tutti i flussi radiativi direzionali che colpiscono un corpo. Assume quindi particolare importanza soprattutto durante il periodo estivo e in condizioni di cielo sereno, poiché consente di descrivere in modo oggettivo lo stress termico generato dalla radiazione solare diretta e dalla radiazione riflessa o emessa dall'ambiente circostante.

Il funzionamento del modello si basa sulla capacità di simulare il percorso della radiazione solare e la sua interazione con gli elementi fisici presenti sul sito, che in questo caso includono anche i pannelli fotovoltaici. Questa simulazione richiede tuttavia un passaggio intermedio, rappresentato dal calcolo dello Sky View Factor (SVF). Si tratta di un parametro adimensionale compreso tra 0 e 1. Il valore 0 indica un punto in cui l'orizzonte risulta completamente ostruito, mentre il valore 1 rappresenta una porzione di cielo totalmente libera, tipica di un'area aperta priva di ostacoli fisici.

In termini pratici, lo SVF traduce in forma numerica la porzione di cielo visibile da un punto specifico della mappa. Questo calcolo consente al software di quantificare quanta radiazione raggiunge liberamente il suolo e quanta viene invece intercettata da alberi, edifici o strutture agrivoltaiche. Elaborando questo valore per ogni porzione del terreno, l'algoritmo ricostruisce l'effetto degli elementi tridimensionali sovrastanti e mappa con precisione le aree illuminate e quelle ombreggiate dalle coperture.

In questo modo, il modello riesce a seguire il percorso apparente del Sole istante per istante, definendo la proiezione delle ombre sul terreno e calcolando la radiazione utile che raggiunge effettivamente la superficie analizzata. Per ottenere queste informazioni è necessario fornire due tipologie principali di input: le geometrie del terreno e i dati meteorologici.

Dal punto di vista spaziale, il modello richiede un DSM (Digital Surface Model), ovvero un modello digitale della superficie capace di descrivere sia l'orografia del terreno sia l'ingombro tridimensionale degli elementi fisici presenti. Questa geometria deve essere necessariamente integrata con dati meteorologici reali, che costituiscono una componente fondamentale della simulazione. Per eseguire correttamente il calcolo, è necessario fornire al software serie temporali orarie contenenti informazioni sulla radiazione solare, sulla temperatura dell'aria e sull'umidità relativa del sito.

L'integrazione tra la rappresentazione spaziale del campo e le condizioni meteorologiche variabili nel corso della giornata consente al programma di calcolare il bilancio radiativo per ogni cella della griglia di analisi. Il risultato finale non è quindi una semplice stima approssimativa, ma una simulazione utile a prevedere in anticipo le variazioni microclimatiche che potrebbero verificarsi in seguito alla realizzazione dell'impianto.

4.4 Configurazione ed esecuzione del modello

Per trasferire il progetto all'interno dell'ambiente di simulazione GIS, è stato necessario preparare le mappe con particolare attenzione. A differenza di software tridimensionali avanzati, come ad esempio ENVI-met, che dispongono di librerie specifiche per la rappresentazione di alberi e altri elementi, il software utilizzato lavora in ambiente "2.5D". Ciò significa che le forme e i materiali del terreno sono stati semplificati per consentire il corretto funzionamento del modello. Di conseguenza, la

precisione ottenuta risulta inferiore rispetto a quella di strumenti di modellazione tridimensionale più complessi.

Tuttavia, lo scopo del lavoro non era realizzare un progetto esecutivo, ma sviluppare una simulazione capace di rappresentare i principali fenomeni descritti nei capitoli precedenti e di dimostrare il potenziale applicativo di questi strumenti. La scelta di utilizzare QGIS con l'estensione UMEP, rispetto ad altri software più avanzati, è legata principalmente alla sua natura open source, che ne consente l'utilizzo senza costi di licenza e ne favorisce l'accessibilità.

In primo luogo, sono stati tracciati i confini esatti dell'area di studio. Tutte le mappe create dovevano infatti condividere lo stesso perimetro e la stessa risoluzione dei pixel, definendo così l'“area di simulazione”. Senza questa uniformità, il software non sarebbe in grado di sovrapporre correttamente i diversi livelli informativi né di eseguire i calcoli tra essi.

Successivamente, è stato costruito un modello digitale della superficie, ossia il DSM (Digital Surface Model), distinguendo il terreno nudo dalla vegetazione erbacea. Sotto l'impianto è stata ipotizzata la presenza di una coltura alta 1 metro, come ad esempio l'erba medica, mentre il prato esterno all'area di progetto è stato mantenuto a quota zero. Sono stati poi inseriti gli alberi, rappresentati come elementi puntuali, e gli edifici già presenti nell'area, assegnando a ciascun elemento la propria altezza reale. In questo modo sono stati definiti i primi ostacoli fisici in grado di intercettare la radiazione solare.

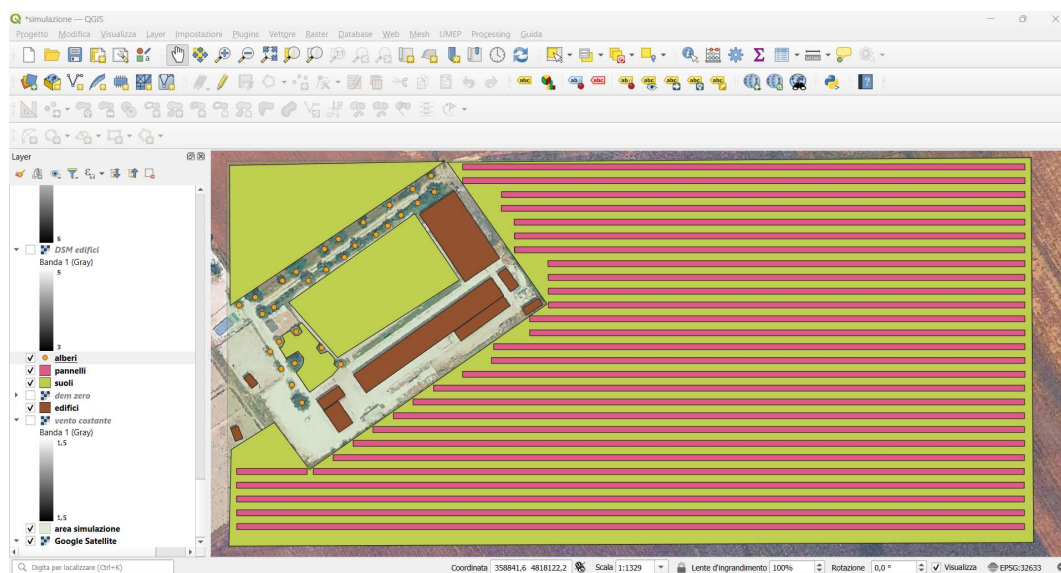


Figura 4.4: Disposizione delle geometrie su QGIS

Una delle principali criticità ha riguardato la modellazione dell'impianto agrivoltai-co. Poiché il sistema 2.5D non consente di gestire direttamente oggetti sospesi nello spazio, è stato necessario adottare una procedura alternativa, utilizzando uno strumento originariamente sviluppato per lo studio delle chiome arboree. In particolare,

è stata costruita una copertura virtuale composta da due livelli. Il livello superiore, indicato nel programma come CDSM, è stato impostato a 4 metri di altezza dal suolo. Successivamente è stato creato un livello inferiore, denominato TDSM, posto a 3,9 metri. Attraverso la sottrazione tra questi due strati, il software ha interpretato la differenza come uno spessore solido pari a 10 centimetri, corrispondente all'ingombro reale dei pannelli fotovoltaici.

Grazie a questa procedura è stato possibile rappresentare la copertura dell'impianto, mantenendo però libero lo spazio sottostante. Dalla quota zero fino a 3,9 metri, infatti, lo spazio è rimasto disponibile: il primo metro è occupato dalla coltura, mentre i restanti 2,9 metri consentono la circolazione dell'aria e il passaggio dei mezzi agricoli.

Una volta definite le geometrie del modello, si è passati alla fase preliminare ai calcoli radiativi, finalizzata a determinare la porzione di cielo ostruita dagli elementi presenti. La mappa del suolo, rappresentata dal DSM, è stata integrata con quella dei pannelli sospesi per calcolare lo Sky View Factor (SVF), necessario a individuare la distribuzione delle aree ombreggiate al suolo.

In questa fase è stata impostata una condizione fondamentale: la trasmissività della struttura è stata posta pari allo 0%. Tale scelta consente di indicare al simulatore che i pannelli non devono essere trattati come chiome arboree, attraverso le quali una parte della radiazione può filtrare, ma come superfici opache, capaci di bloccare completamente la radiazione solare diretta nel caso dei moduli fotovoltaici tradizionali.

Una volta ottenute le informazioni relative all'ombreggiamento e alla geometria del sito, è stato necessario introdurre gli input meteorologici. Una buona pratica progettuale consiste nel testare il comportamento dell'impianto nelle condizioni più critiche dell'anno. Per questo motivo, la simulazione è stata impostata in corrispondenza del massimo carico termico estivo, alle ore 13:00 del giorno 195 dell'anno, quindi nel mese di luglio.

In tali condizioni, il motore di calcolo SOLWEIG è stato eseguito considerando due scenari distinti. Il primo scenario, definito Ante Operam, rappresenta la situazione iniziale, ovvero il campo privo di strutture agrivoltaiche e occupato dalla sola coltura. Il secondo scenario, definito Post Operam, rappresenta invece la configurazione finale, con l'impianto agrivoltaico installato sopra la coltura. Dal confronto tra le due simulazioni sono state ottenute le mappe termiche finali, utilizzate per valutare gli effetti microclimatici dell'intervento e formulare le conclusioni del lavoro.

Capitolo 5

Analisi dei Risultati e Discussione Critica

5.1 Analisi del primo scenario (solo coltura)

Il risultato della prima simulazione, definita scenario Ante Operam, ossia la situazione iniziale senza pannelli e con la sola presenza della coltura, fornisce una rappresentazione del campo alle ore 13:00 del giorno individuato come maggiormente critico per il carico termico estivo. In questo scenario di base non sono presenti elementi in grado di ombreggiare la componente vegetale, poiché gli edifici e gli alberi si trovano a una distanza tale da non influenzare direttamente l'area coltivata. Ciò significa che l'intera superficie agricola riceve direttamente la radiazione solare, senza alcuna copertura, assorbendo sia la componente diretta sia quella diffusa. Di conseguenza, questo scenario rappresenta la condizione più gravosa per la coltura, nella quale si registrano i valori massimi di Temperatura Radiante Media simulata. La Temperatura Radiante Media raggiunge picchi elevati e relativamente uniformi su tutto il terreno, arrivando a circa 64 °C in prossimità degli edifici, come si evince dall'immagine seguente. Nell'area coltivata, invece, il valore raggiunge circa 53 °C.

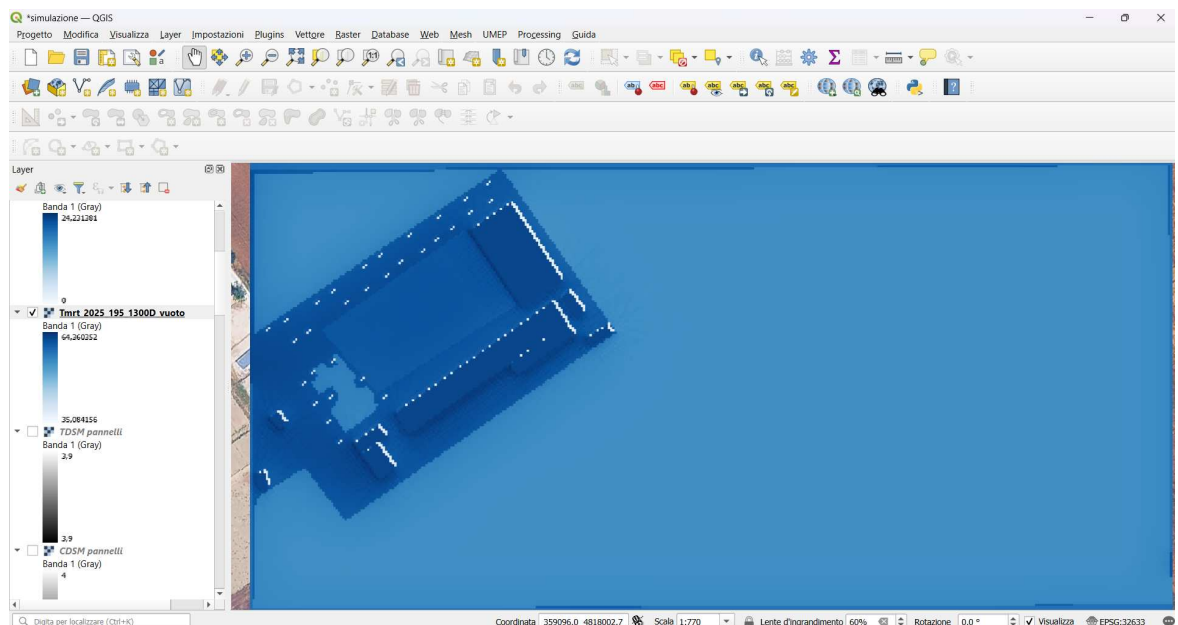


Figura 5.1: Risultato del primo scenario di simulazione con solo coltura.

Tale valore non indica soltanto una temperatura elevata, ma evidenzia una condizione di notevole stress per le piante, potenzialmente in grado di generare criticità fisiologiche. Analizzando questo risultato, emergono alcune problematiche immediate, rese ancora più rilevanti dalla crescente frequenza delle ondate di calore. La prima criticità riguarda la disponibilità idrica. L'elevato carico radiativo determina valori di evapotraspirazione molto alti; di conseguenza, il terreno tende ad asciugarsi rapidamente, riducendo in anticipo le riserve idriche disponibili per la pianta, fondamentali per una crescita regolare.

La seconda criticità riguarda l'aspetto fisiologico. L'esposizione diretta alla radiazione solare nelle ore centrali della giornata può sottoporre le colture a condizioni di stress eccessivo. La quantità di energia luminosa e di calore può infatti superare la capacità di gestione della pianta. In queste condizioni, l'apparato fotosintetico può ridurre la propria attività come meccanismo di protezione della biomassa, limitando l'assimilazione del carbonio e innescando il fenomeno noto come fotoinibizione.

Alla luce di questi effetti fisici e biologici, i risultati ottenuti dalla prima simulazione evidenziano la vulnerabilità di un campo aperto durante i picchi termici estivi. La necessità di proteggere le colture dall'eccessiva radiazione solare rappresenta quindi un'esigenza condivisa sia dal punto di vista agronomico sia da quello ingegneristico. In agricoltura vengono già utilizzati sistemi ombreggianti per alcune tipologie di colture; tuttavia, essi sono generalmente costituiti da semplici teli plastici e non dispongono di un sistema intelligente e integrato come quello offerto dall'agrivoltaico.

5.2 Analisi del secondo scenario (con impianto fotovoltaico)

L'inserimento dell'impianto agrivoltaico all'interno della simulazione modifica in modo significativo i risultati finali, come emerge dal confronto tra lo scenario Post Operam e quello precedente. Osservando la mappa termica dello scenario Post Operam, si nota che l'energia sul campo si distribuisce in maniera differente rispetto alla situazione iniziale. Il risultato grafico mostra una chiara alternanza geometrica tra le fasce di terreno illuminate direttamente dal sole e quelle ombreggiate, in accordo con la disposizione dei moduli installati.

Analizzando i corridoi liberi, ossia le file prive di pannelli, si osserva che in queste aree la radiazione solare continua a raggiungere il suolo senza incontrare ostacoli. Per tale motivo, in queste fasce scoperte, la Temperatura Radiante Media (T_{mrt}) rimane prossima ai valori massimi già registrati nello scenario di campo aperto.

La situazione cambia invece nelle aree poste sotto la proiezione dei pannelli fotovoltaici. Poiché i moduli intercettano fisicamente la radiazione solare diretta, il carico termico percepito a livello del suolo diminuisce in modo significativo. Proprio all'interno di queste fasce d'ombra si registra il dato più rilevante dell'intera simulazione: grazie all'ombreggiamento generato dai pannelli, la T_{mrt} si riduce fino a raggiungere un valore minimo di 33,93 °C nella porzione coltivata. Si tratta di una diminuzione considerevole, pari a circa 30 °C rispetto alle aree esposte al pieno sole.

Questa riduzione dimostra che l'infrastruttura agrivoltaica non svolge esclusivamente una funzione energetica, ma agisce anche come sistema passivo di mitigazione termica. L'impianto si comporta quindi come una soluzione ingegneristica capace di modificare in modo significativo il microclima locale, contribuendo alla protezione e al miglioramento delle condizioni dell'ecosistema agricolo sottostante.

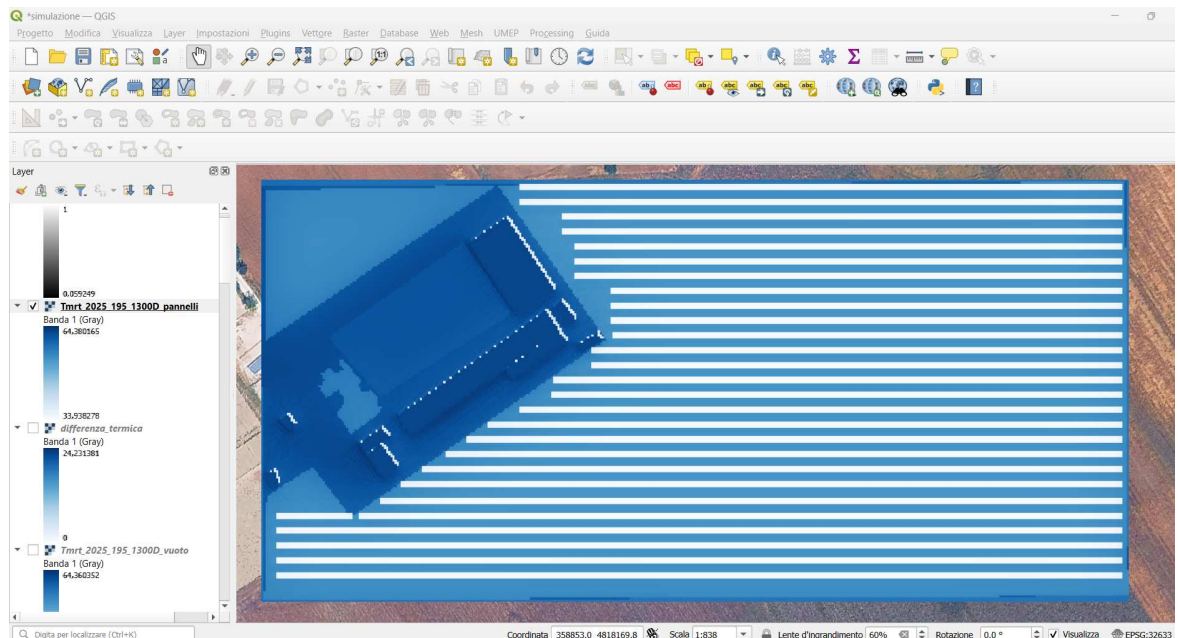


Figura 5.2: Risultato del secondario scenario di simulazione con anche i pannelli solari.

5.3 Discussione dei risultati

L'ultima fase dell'analisi ha previsto il calcolo del beneficio effettivo apportato dall'impianto al microclima del campo. Per misurare con precisione la capacità della struttura di mitigare le condizioni termiche della coltura, è stata eseguita un'operazione all'interno del programma QGIS. In particolare, la mappa dello scenario senza impianto, corrispondente al campo esposto alla radiazione solare diretta, è stata sottratta, pixel per pixel, alla mappa dello scenario con impianto installato. Il risultato di questa sottrazione ha generato una nuova mappa, rappresentativa del differenziale tra i due scenari, dalla quale emerge una riduzione del calore radiante con un valore massimo pari a 24,23 °C.

Osservando tale mappa, risulta evidente come la mitigazione termica si distribuisca secondo uno schema a fasce. La riduzione della temperatura si verifica principalmente nelle aree interessate dall'ombra prodotta dai pannelli fotovoltaici. Nei corridoi liberi tra una fila e l'altra, invece, la differenza di temperatura risulta pari a 0 °C, poiché la radiazione solare continua a raggiungere direttamente il suolo, come nello scenario iniziale.

Questo contrasto netto tra le aree illuminate e quelle ombreggiate dimostra che l'impianto non modifica in modo casuale il clima generale dell'intera area. Al contrario, l'effetto di raffrescamento è localizzato e agisce in corrispondenza dell'impronta a terra generata dalla struttura. Dal punto di vista agricolo, una riduzione della T_{mrt} superiore a 24 °C durante le ore più critiche dell'estate rappresenta un risultato significativo, poiché consente di limitare lo stress termico a cui sono sottoposte le colture.

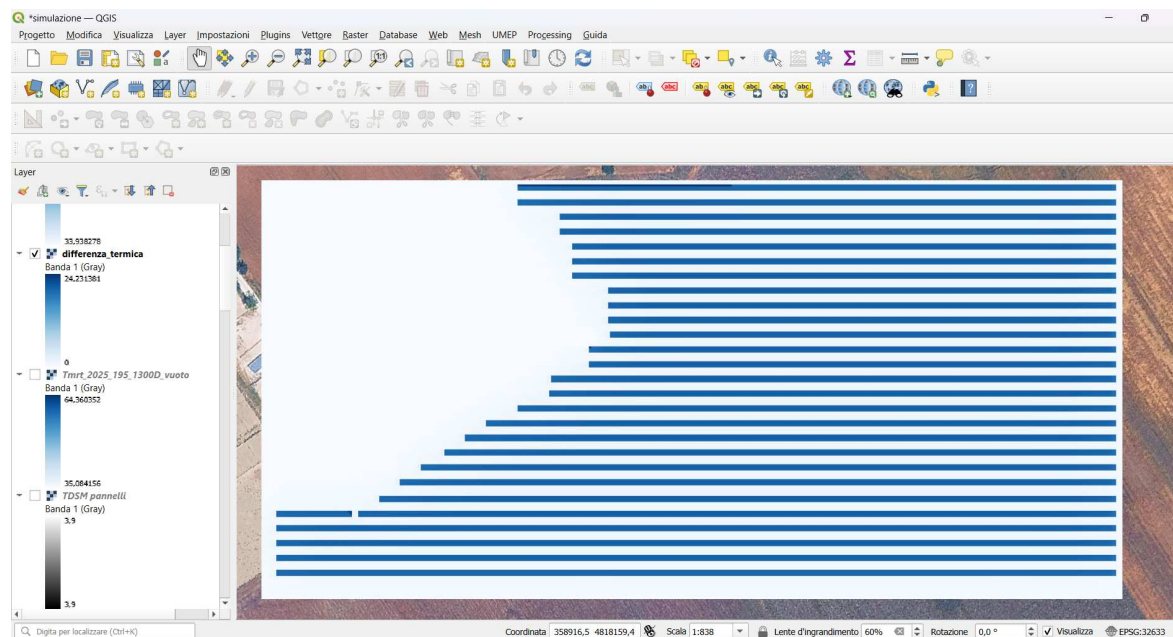


Figura 5.3: Risultato della differenza tra i due scenari.

5.4 Criticità operative e limiti dei software di simulazione

Il passaggio da un ambiente fisico complesso, come quello di un impianto agrivoltaiico, a un modello digitale ha richiesto il superamento di diverse difficoltà operative. Tali criticità sono legate soprattutto ai limiti dei software di simulazione ambientale attualmente disponibili. Per completare il modello sono stati effettuati diversi tentativi ed è stato necessario risolvere vari problemi di compatibilità.

Inizialmente è stato scelto ENVI-met, un software ampiamente utilizzato per le simulazioni microclimatiche tridimensionali ad alta precisione. Tale programma è noto per la capacità di considerare numerosi elementi dell'ambiente antropico e naturale. Tuttavia, durante la fase di modellazione geometrica, sono emerse fin dall'inizio alcune difficoltà legate alla gestione di oggetti sottili e sospesi nello spazio.

Per ricreare i pannelli fotovoltaici è stata utilizzata la funzione base del programma denominata single walls. Nonostante l'inserimento accurato dei parametri e i numerosi tentativi di simulazione, i risultati termici finali rimanevano identici a quelli dello

scenario iniziale. Il programma, infatti, sembrava trattare l'impianto come se fosse trasparente alla radiazione solare, senza generare ombreggiamento al suolo.

La verifica visiva dei file di output tramite Leonardo, il modulo di ENVI-met dedicato alla visualizzazione dei risultati, ha confermato che il software non riusciva a elaborare correttamente le superfici sospese create con la funzione utilizzata. Successivamente, è stato contattato il supporto tecnico ufficiale, dal quale è emerso che le ombre generate dagli oggetti creati con la funzione single walls non vengono elaborate nella versione gratuita del software. Per proseguire con tale approccio, sarebbe stato necessario acquistare la licenza completa di ENVI-met, poiché il canale di supporto disponibile era limitato all'assistenza tecnica di base.

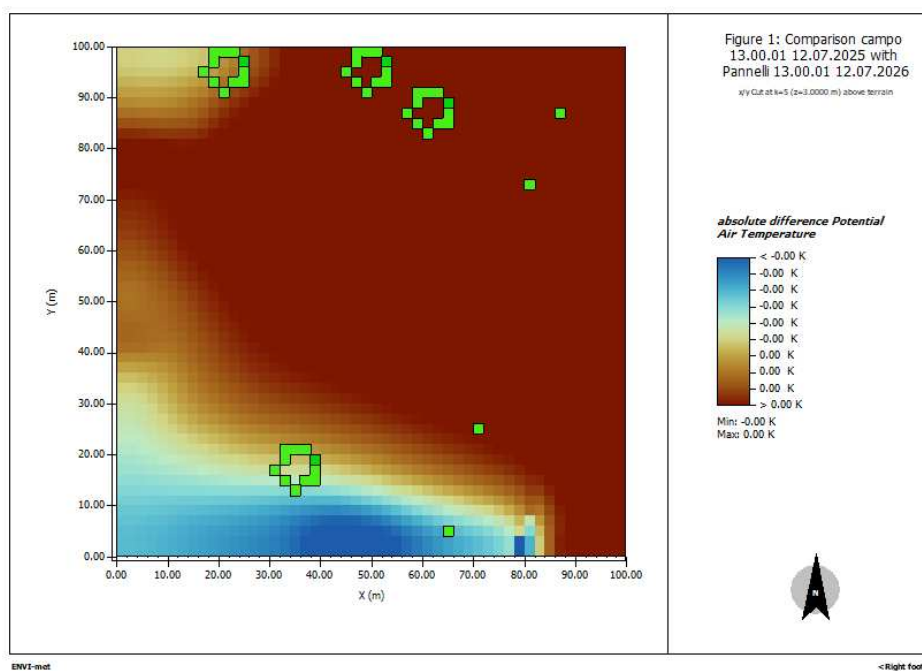


Figura 5.4: Risultato della differenza inesistente tra i due scenari in ENVI-met.

Di fronte a questa limitazione tecnica, in accordo con i docenti, è stato deciso di modificare il software di lavoro. La scelta è ricaduta su una soluzione completamente open source: QGIS con l'estensione UMEP.

Il passaggio all'ambiente GIS ha rappresentato una scelta strategica, in quanto ha offerto una maggiore flessibilità nella gestione del modello. Per l'elaborazione dei calcoli relativi alla radiazione solare è stato utilizzato il plugin UMEP (Urban Multi-scale Environmental Predictor). Tuttavia, anche all'interno di questo ecosistema open source, si sono presentate alcune criticità tecniche.

Il principale problema si è verificato nella fase finale della costruzione del modello. Dopo aver definito i profili dell'impianto, assegnando i relativi spessori e le altezze, il motore di calcolo di UMEP si interrompeva e non riusciva a processare la simulazione.

L'origine del problema è stata individuata grazie a un messaggio di avviso del software, che segnalava l'incompatibilità tra la versione di QGIS in uso e il plugin UMEP.

Per verificare la causa dell'errore è stata utilizzata la console OSGeo4W Shell, interrogando direttamente il sistema tramite riga di comando. La versione di QGIS installata inizialmente era la 3.44.11, ossia una delle release più recenti, mentre la versione compatibile con UMEP era la 3.34.11. È stato quindi necessario accedere agli archivi storici di QGIS e installare la versione corretta. Questo passaggio ha garantito il pieno supporto al plugin UMEP e ha consentito al modulo SOLWEIG di eseguire i calcoli termici correttamente, senza ulteriori interruzioni.

Capitolo 6

Conclusioni

Questo lavoro di tesi è nato con un obiettivo preciso: misurare in modo oggettivo l'impatto di un impianto agrivoltaico sul microclima locale. L'idea di fondo è stata quella di valutare questa tecnologia non solo come un sistema per produrre energia elettrica, ma anche come uno strumento utile a proteggere l'agricoltura dagli effetti dei cambiamenti climatici.

Al fine di raggiungere questo risultato, si è lavorato all'interno di un ambiente GIS, utilizzando QGIS e il modello termodinamico SOLWEIG, mediante il quale è stata sviluppata una simulazione spaziale in 2.5D. Questo approccio ha permesso di ricostruire con buona risoluzione il modo in cui la struttura dei pannelli, il terreno e la radiazione solare interagiscono tra loro.

La simulazione si è concentrata volutamente su uno scenario particolarmente critico: le ore 13:00 di una calda giornata estiva. I risultati hanno evidenziato, nello scenario iniziale in campo aperto (Ante Operam), condizioni termiche molto sfavorevoli per l'ecosistema agricolo, con valori di Temperatura Radiante Media, indicata come (T_{mrt}) pari a circa 64 °C nelle aree più esposte.

Osservando invece lo scenario con l'impianto agrivoltaico installato (Post Operam), è stato possibile dimostrare come i pannelli svolgano una funzione di mitigazione termica. Intercettando la radiazione solare diretta, i moduli riducono la T_{mrt} fino a un valore minimo di 33,93 °C. La modifica del bilancio radiativo consente quindi di ottenere una riduzione termica di circa 24 °C in corrispondenza della proiezione d'ombra dell'infrastruttura.

Alla luce dei dati emersi, l'agrivoltaico non può essere considerato soltanto una tecnologia per l'immissione di energia pulita in rete, ma anche uno strumento di supporto alla resilienza agricola. La gestione dell'ombreggiamento risulta infatti fondamentale per proteggere le colture, ridurre l'eccessiva essiccazione del suolo e limitare gli effetti delle ondate di calore estive, sempre più frequenti. Allo stesso tempo, grazie a un corretto dimensionamento della distanza tra i filari, è possibile garantire che la radiazione solare diretta raggiunga i corridoi liberi, consentendo alla coltura di svolgere regolarmente la fotosintesi.

Sebbene i risultati delle simulazioni mostrino chiaramente il potenziale dell'impianto nel migliorare le condizioni microclimatiche, è opportuno precisare che il presente lavoro mantiene un'impostazione prevalentemente teorica. Il modello sviluppato non

rappresenta un progetto esecutivo pronto per la realizzazione in campo, ma uno studio accademico finalizzato alla validazione di un metodo di analisi applicato al settore agrivoltaico.

Per analisi più dettagliate, soprattutto in riferimento a progetti reali, sarà necessario ricorrere a simulazioni dinamiche estese all'intero anno solare, in grado di descrivere lo spostamento delle ombre dei pannelli giorno dopo giorno. L'obiettivo futuro sarà quindi quello di ottenere, attraverso modelli tridimensionali più avanzati, una previsione dettagliata degli effetti di un impianto agrivoltaico sul microclima locale, così da valutarne in modo più accurato le conseguenze agronomiche, energetiche e ambientali.

Riferimenti

- [1] pvgis.com - Calcolatore Solare PVGIS24 Professionale.
- [2] Eli Argaman, Wang Fei, Xiao Yan, and Ilan Stavi. Adapting empirical soil erosion models to agrivoltaic systems: Limitations of RUSLE and factor-specific adaptations. *Soil and Tillage Research*, 257:106969, March 2026.
- [3] Carlo Renno and Olga Di Marino. Agrivoltaics Across Crops and Technologies: A Systematic Review of Experimental Tests on Yield, Microclimate, and Energy Performance. *Energies*, 19(2):539, January 2026.
- [4] Maria Anna Cusenza, Andrea Danelli, Sofia Spagnolo, and Pierpaolo Girardi. Comparative life cycle assessment of an overhead agrivoltaic system: Environmental impacts and methodological insights. *Journal of Cleaner Production*, 560:148379, May 2026.
- [5] Constantin Klyk and Stephan Schindele, editors. *Agrivoltaics: Technical, Ecological, Commercial and Legal Aspects*. Energy Engineering Series. Institution of Engineering and Technology, London, 2024.
- [6] Sultan Tekie, Sebastian Zainali, Silvia Ma Lu, Mohammed Guezgouz, Tekai Eddine Khalil Zidane, Arash Khosravi, K. Max Zhang, and Pietro Elia Campana. Novel operational strategies to maximize crop and electricity production in single-axis agrivoltaic systems based on light response curve and daily light integral. *Results in Engineering*, 29:109575, March 2026.
- [7] Jerome Wei Chiang Teng, Chew Beng Soh, Shiddalingeshwar Channabasappa Devihosur, Ryan Hong Soon Tay, and Steve Kardinal Jusuf. Effects of Agrivoltaic Systems on the Surrounding Rooftop Microclimate. *Sustainability*, 14(12):7089, June 2022.
- [8] Marisa Di Sabatino, Richard Randle-Boggis, Ronald Reagon Ravi Kumar, Harry Malhi, Gabriele Lobaccaro, Helge Bonesmo, Ashok Sharma, Steve Völler, and Gaute Stokkan. Agrivoltaics in Norway: Microclimate Modelling and Grass Yields from the Highest Latitude Agrivoltaics System. *AgriVoltaics Conference Proceedings*, 3, June 2025.
- [9] Giulia Del Serrone, Paolo Peluso, and Laura Moretti. Photovoltaic road pavements as a strategy for low-carbon urban infrastructures. *Heliyon*, 9(9):e19977, September 2023.

- [10] Emre Demirezen, Talat Ozden, and Bulent G. Akinoglu. Impacts of a Photovoltaic Power Plant for Possible Heat Island Effect. In *2018 International Conference on Photovoltaic Science and Technologies (PVCon)*, pages 1–7, Ankara, July 2018. IEEE.
- [11] Uzair Jamil and Joshua M. Pearce. The potential of agrivoltaic systems to meet energy demand of data centers in the United States. *Next Research*, 9:101763, July 2026.
- [12] Rasel Ahemd, Md. Hasanul Banna Izaz, Kamrul Hasan Manik, Humayra Khatun, Antu Nath, Juhi Jannat Mim, and Nayem Hossain. Advancements in agrivoltaic systems for enhanced sustainable energy utilization- A review. *Environmental Challenges*, 20:101299, September 2025.
- [13] Emre Demirezen, Talat Ozden, and Bulent G Akinoglu. Analysis and assessment of daily and seasonal photovoltaic heat island effect on sekbandemirli rural region by local weather data records.
- [14] Emre DemiRezen. A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university.
- [15] Martin Cooney, Joakim Tell, and Edison Pignaton De Freitas. Drones in Agrivoltaics: An Exploratory Review. *Smart Agricultural Technology*, page 102264, June 2026.
- [16] Maryam Rahimi Jahangirlou, Johannes Wilhelmus Maria Pullens, Magnus Kamau Katana Lindhardt, Yannick Valentin El Khoury, Vita Antoniuk, Kiril Manevski, Carl-Otto Ottosen, and Uffe Jørgensen. Agrivoltaic systems: Trade-offs on microclimate, physiology, yield and canopy thermal-spectral maps. *Agricultural Systems*, 232:104557, February 2026.
- [17] Sebastian Zainali, Omar Qadir, Sertac Cem Parlak, Silvia Ma Lu, Anders Avelin, Bengt Stridh, and Pietro Elia Campana. Computational fluid dynamics modelling of microclimate for a vertical agrivoltaic system. *Energy Nexus*, 9:100173, March 2023.
- [18] Introduction to UMEP and the QGIS Processing framework — UMEP Tutorial documentation.
- [19] Fredrik Lindberg, C.S.B. Grimmond, Andrew Gabey, Bei Huang, Christoph W. Kent, Ting Sun, Natalie E. Theeuwes, Leena Järvi, Helen C. Ward, I. Capel-Timms, Yuanyong Chang, Per Jonsson, Niklas Krave, Dongwei Liu, D. Meyer, K. Frans G. Olofson, Jianguo Tan, Dag Wästberg, Lingbo Xue, and Zhe Zhang. Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling & Software*, 99:70–87, January 2018.

- [20] Shu-Ngwa Asa'a, Arvid van der Heide, Giacomo Bizinoto Ferreira Bosco, Harihar-sudan Sivaramakrishnan Radhakrishnan, Jef Poortmans, and Michaël Daenen. Design and light transmittance distribution measurements of semitransparent c-Si PV modules for agrivoltaic systems. *Solar Energy*, 311:114507, June 2026.
- [21] industria01. ENEA lancia una mappa nazionale per analizzare il potenziale dell'agrivoltaico, July 2023.
- [22] Giorgia Di Domenico, Andrea Colantoni, Leonardo Bianchini, Massimo Cecchini, Francesco Gallucci, and Valerio Di Stefano. Agrivoltaics Systems Potentials in Italy: State of the Art and SWOT–AHP Analysis. *Sustainability*, 17(3):925, January 2025.
- [23] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) e Gestore Servizi Energetici (GSE). Dm agrivoltaico - regole operative (allegato 1 al decreto di approvazione 31 maggio 2024). finanziato dall'unione europea - nextgenerationeu, Maggio 2024.
- [24] Ministero della Transizione Ecologica (MiTE), CREA, GSE, ENEA, RSE. Linee guida in materia di impianti agrivoltaici. gruppo di lavoro coordinato dal dipartimento per l'energia, Giugno 2022.
- [25] Massimo Mazzer and David Moser. Come l'energia solare può alimentare l'italia senza consumare più suolo. *Nature Italy*, April 2021.