

UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

Relazione tecnico-scientifica di ottimizzazione di un impianto agrivoltaico sito nei Comuni di Montechiarugolo e Traversetolo (PR)

Responsabile scientifico

Prof. Stefano Amaducci

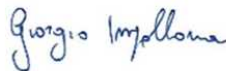


Professore Ordinario di Coltivazione Erbacee, Università Cattolica del Sacro Cuore

Responsabile agronomico, Tspin S.r.l. (spin-off dell'Università Cattolica del Sacro Cuore)

Responsabile tecnico

Dott. Agr. Giorgio Impollonia, PhD



Assegnista di ricerca, Università Cattolica del Sacro Cuore

Coordinamento tecnico e gestione della piattaforma software, Tspin S.r.l. (spin-off dell'Università Cattolica del Sacro Cuore)



CORRADO 1
PLUCHINO
27.02.2026 14:56:24
GMT+01:00

Indice

1	Premessa	3
2	Introduzione dei sistemi agrivoltaici	4
2.1	Tipologie di sistemi agrivoltaici	4
2.2	Approcci agronomici nella gestione dei sistemi agrivoltaici	4
2.2.1	Effetto dell'ombreggiamento sulle colture	5
2.2.2	Operazioni colturali	6
3	Progetto preliminare	8
4	Studio di ottimizzazione dell'impianto agrivoltaico	9
4.1.1	Descrizione della piattaforma di simulazione	9
4.1.2	Descrizione degli scenari di simulazione	10
4.1.3	Validazione della piattaforma	11
4.1.4	Indicatori chiave di prestazione	12
4.1.5	Risultati degli indicatori chiave di prestazione	13
5	Progetto ottimizzato	15
6	Bibliografia	16

1 Premessa

La società Green Frogs S.r.l ha commissionato uno studio commissionato alla società Tspin S.r.l., spin-off dell'Università Cattolica del Sacro Cuore, con l'obiettivo principale di contribuire all'ottimizzazione del progetto agrivoltaico (AV) (nei Comuni di Montechiarugolo e di Traversetolo, in Provincia di Parma) simulando e analizzando l'effetto che la modulazione di alcuni parametri di progetto ha sull'uso del suolo e sulla resa agricola. Lo sviluppo di sistemi AV sostenibili può essere effettuato attraverso procedure di ottimizzazione che prevedono l'impiego di piattaforme informatiche per simulare l'effetto che diverse combinazioni di sistemi AV e scelte agronomiche hanno su una serie di indicatori chiave di prestazione (KPI) (Bellone et al., 2024; Willockx et al., 2020). Il lavoro descritto in questa relazione è stato svolto utilizzando una piattaforma di calcolo sviluppata da Tspin S.r.l. all'interno delle attività di ricerca dell'Università Cattolica del Sacro Cuore, per l'ottimizzazione delle principali variabili progettuali dell'impianto AV proposto. La piattaforma è stata impiegata per stimare l'impatto dell'impianto sulla continuità dell'attività agricola e sulla produttività delle colture. Il progetto prevede la realizzazione di un sistema AV avanzato nel rispetto di quanto riportato nelle linee guida rilasciate dal Ministero della Transizione Ecologica (MiTE) nel 2022, oggi Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica (MASE), e della prassi di riferimento UNI/PdR 148:2023.

La relazione include: i) un'introduzione che fornisce una panoramica dello stato dell'arte dei sistemi AV; ii) una descrizione del progetto preliminare, con dettagli sulla tecnologia adottata, la potenza prevista e le principali caratteristiche del sistema AV da installare; iii) una descrizione del processo di ottimizzazione del sistema AV; e iv) una presentazione del progetto definitivo successivo all'ottimizzazione.

2 Introduzione dei sistemi agrivoltaici

L'agrivoltaico (AV) è un sistema che integra la produzione agricola con la generazione di energia fotovoltaica sulla stessa superficie. Negli ultimi anni, questo approccio ha dimostrato di ridurre la competizione tra produzione alimentare ed energetica, aumentando l'efficienza nell'uso del suolo (Dupraz et al., 2011; Trommsdorff et al., 2021). Il concetto, proposto da Adolf Goetzberger nel 1982, fondatore dell'Istituto Fraunhofer per i Sistemi Solari, nasce dall'idea che l'espansione su grande scala del fotovoltaico avrebbe intensificato il già intenso consumo di suolo agricolo.

2.1 Tipologie di sistemi agrivoltaici

I criteri di progettazione di un sistema AV differiscono da quelli dei sistemi fotovoltaici tradizionali. Per garantire un'adeguata disponibilità di radiazione per le colture e consentire la meccanizzazione agricola, i sistemi AV richiedono moduli fotovoltaici sopraelevati e pitch (spazi interfilari) più ampi (Lee et al., 2023; Reher et al., 2024; Schindele et al., 2020). L'impatto sull'attività agricola dipende dalle caratteristiche strutturali del sistema AV, come densità dei moduli, altezza e pitch, oltre al clima locale (Kim et al., 2021; Kim and Kim, 2023; Pataczek et al., 2023; Weselek et al., 2021). Le linee guida rilasciate in alcuni paesi Europei classificano i sistemi AV principalmente in base a due criteri: altezza dei moduli e superficie destinata per l'attività agricola. Si distinguono due tipologie principali (Fernández-Solas et al., 2023; Gorjian et al., 2022; Waghmare et al., 2022): AV sopraelevati, che permettono la coltivazione sotto i moduli, e AV interfilari, con una limitata altezza dei moduli dal suolo che limitano l'attività agricola e la mobilità dei mezzi. Una particolare categoria di impianto interfilare è costituita dagli AV verticali che, installando moduli bifacciali disposti perpendicolarmente al terreno, minimizzano l'occupazione di suolo. Al fine di differenziare gli impianti sopraelevati da quelli interfilari in questa relazione ci riferiremo alle linee guida sull'agrivoltaico pubblicate dal Ministero della Transizione Ecologica (MiTE, 2022) in cui si definiscono AV avanzati i sistemi con moduli che al minimo hanno un'altezza di 2,10 m dal suolo per le colture agricole e 1,30 m per il pascolo. Al di sotto di queste altezze, i sistemi sono considerati AV base (o interfilari). Il Decreto del MaSE del 22/12/2023 prevede incentivi solo per i sistemi avanzati. La scelta del tipo di sistema AV e della configurazione dei moduli (altezza, distanza tra i filari e orientamento) influenzerà l'attività aziendale a lungo termine. Questa decisione dipende da diversi fattori, tra cui il clima, la tipologia di suolo, l'ordinamento colturale, la potenza da installare, valutazioni economiche, oltre a considerazione di integrazione paesaggistica.

2.2 Approcci agronomici nella gestione dei sistemi agrivoltaici

Gli impianti AV adeguatamente progettati e gestiti possono mitigare gli effetti negativi di eventi climatici avversi come siccità, stress termico ed eccessiva insolazione, che causano notevoli danni alle colture agrarie ed in particolare a coltivazioni di pregio quali ad esempio le colture orticole e la vite. In determinate condizioni, l'AV può aumentare la tolleranza delle colture a temperature elevate e siccità (Barron-Gafford et al., 2019, 2016; Semeraro et al., 2024; Sturchio et al., 2024) e migliorare l'efficienza dell'uso dell'acqua (WUE) (Adeh

et al., 2018; Barron-Gafford et al., 2019; Y. Elamri et al., 2018); infatti, l'ombra proiettata dai pannelli riduce l'evapotraspirazione, abbassando così il consumo idrico (Pataczek et al., 2023). Oltre ai benefici per le colture, l'AV può migliorare l'efficienza energetica: la presenza delle piante, che grazie alla evapotraspirazione abbassano la temperatura dell'aria, può incrementare l'efficienza di conversione energetica dei pannelli PV; la scelta di colture adatte può aumentare l'albedo, favorendo una maggiore riflessione della luce verso i pannelli bifacciali (Barragán Sánchez-Lanuza et al., 2024; Barron-Gafford et al., 2016; Waghmare et al., 2023; Willockx et al., 2023). La gestione agronomica all'interno di un impianto AV deve adattarsi alle condizioni variabili di irradianza, all'umidità del suolo e alle limitazioni di mobilità per i mezzi meccanici. In particolare, la rotazione colturale, le lavorazioni del suolo, l'irrigazione e la raccolta richiedono modifiche e pianificazioni accurate prima dell'installazione dell'impianto. Al momento, non esiste una guida univoca sulle tecniche agronomiche da adottare negli impianti AV, né su come queste differiscano dalle pratiche tradizionali. Spesso, infatti, le tecniche agronomiche applicate alle colture in AV vengono considerate identiche a quelle comuni, senza variazioni significative. Tuttavia, la presenza delle strutture di supporto dei moduli, la disomogeneità del contenuto idrico nel suolo e la necessità di mantenere i moduli alla massima efficienza richiedono un approccio gestionale accurato, personalizzato in base al tipo di impianto AV e alla coltura scelta. Tra gli svantaggi conseguenti all'implementazione dell'AV, il più immediato è la riduzione della superficie coltivabile, anche se in misura inferiore rispetto agli impianti fotovoltaici a terra. Questo, insieme alla riduzione dell'attività fotosintetica dovuta all'ombreggiamento, contribuisce a una diminuzione della produttività agricola per unità di superficie.

2.2.1 Effetto dell'ombreggiamento sulle colture

Gli studi agronomici sui sistemi AV sono stati condotti principalmente attraverso prove in campo (Edouard et al., 2023; Ferrara et al., 2023; Jiang et al., 2022; Marrou et al., 2013b; Reeza et al., 2024; Willockx et al., 2023), simulazioni basate su modelli radiativi e colturali (Al Mamun et al., 2023; Amaducci et al., 2018; Campana et al., 2021; Dupraz et al., 2011; Ko et al., 2021; Potenza et al., 2022), e analisi tecno-economiche (Ahmed et al., 2022; Poonia et al., 2022; Schindele et al., 2020). La recente spinta delle politiche internazionali per lo sviluppo dell'AV ha determinato un incremento degli studi scientifici sia sugli effetti agricoli che sulla redditività economica degli impianti (Ahmed et al., 2022; Edouard et al., 2023; Schindele et al., 2020). Una metanalisi di Laub et al. (2022), basata su 58 studi, ha classificato le colture in tre gruppi in base alla risposta all'ombreggiamento: colture che ne beneficiano, colture che lo tollerano e colture che subiscono forti cali di resa (Figura 1). Ad esempio, mais, leguminose da granella e cereali C3 (ad esempio, frumento, orzo, avena, segale e riso) mostrano una forte reazione alla riduzione della PAR, con conseguente calo della resa. Al contrario, le colture da tubero e da radice mostrano un calo della resa ridotto. Con valori di ombreggiamento maggiori del 50 % rispetto la piena luce, tutte le colture analizzate nello studio si comportano come suscettibili (Laub et al., 2022). La metanalisi, però, includeva solo due studi su sistemi AV, mentre gli altri si basavano su teli ombreggianti o agroforestali, limitando la possibilità di generalizzare i risultati. Un'altra analisi di Dupraz (2023) ha correlato la resa delle colture con il Ground Cover Ratio (GCR), un indice di copertura del suolo

calcolato come rapporto tra la superficie dei moduli fotovoltaici presenti nell'impianto ed il totale della superficie di suolo impiegata per ospitare l'impianto stesso.

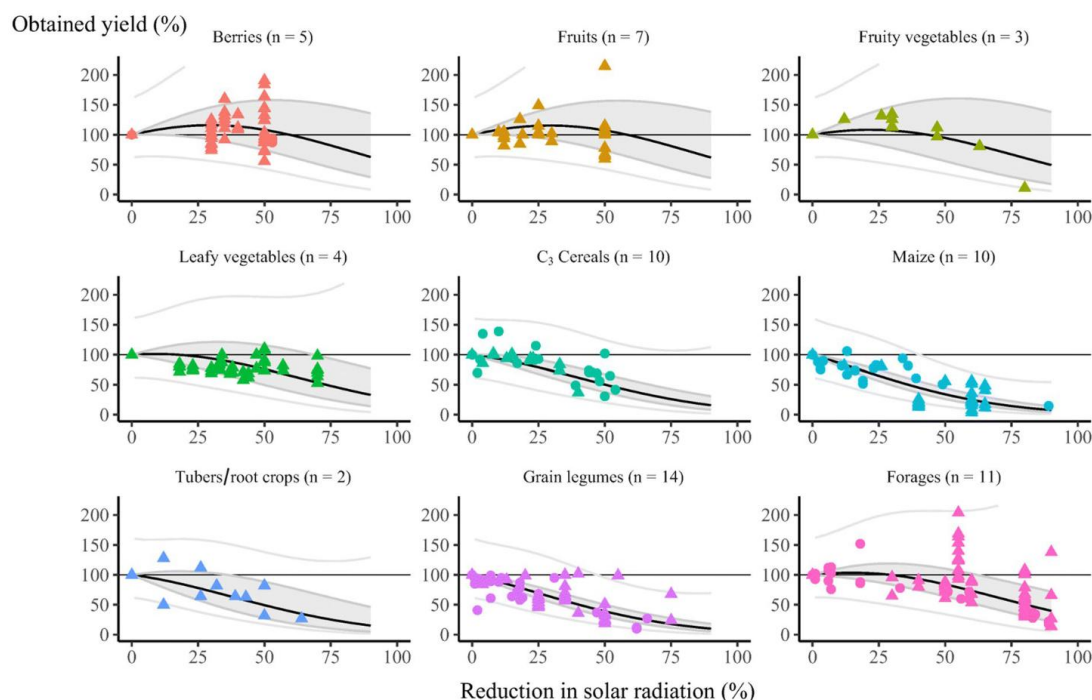


Figura 1. Dettaglio della risposta all'ombreggiamento per le singole specie o categorie di colture (Laub et al., 2022).

Sebbene questi studi presentino limiti legati al numero di dati disponibili, entrambi forniscono indicazioni utili per progettare impianti AV. Tuttavia, queste informazioni spesso non sono sufficienti e poter disporre di una piattaforma di simulazione per prevedere la risposta produttiva delle colture risulta fondamentale per la progettazione e gestione dei sistemi AV. I modelli di simulazione possono stimare l'impatto dell'AV su caratteristiche chiave delle colture, quali resa, fenologia, consumo idrico e morfologia delle piante. L'uso di piattaforme di simulazione permette di identificare, tramite analisi di scenario, l'impatto che determinate scelte costruttive dell'impianto AV possono avere sulla crescita e produttività delle colture oltre che sulla producibilità energetica. Queste informazioni possono quindi essere utilizzate per ottimizzare la progettazione ed anche la gestione degli impianti AV, secondo criteri che tengano in considerazione gli obiettivi imprenditoriali e nel rispetto dei vincoli normativi.

2.2.2 Operazioni colturali

Nonostante la definizione di AV preveda la continuità delle operazioni agricole all'interno dell'impianto, è innegabile che la presenza delle strutture possa ostacolare tali operazioni. La mobilità dei mezzi meccanici all'interno di un impianto AV deve essere adeguatamente considerata nella fase di design dell'impianto stesso (tipo di struttura, pitch, altezza minima), soprattutto nel caso dei mezzi di raccolta (Horowitz et al., 2020), che

solitamente hanno dimensioni elevate. In un sistema AV, ogni aspetto della gestione agronomica meccanizzata, dalle lavorazioni alla raccolta, risulta alterato rispetto a quella di un campo tradizionale. È quindi fondamentale garantire l'accesso dei macchinari agricoli, senza impedimenti causati dalle strutture dell'impianto. Trovare un equilibrio tra il design dell'impianto AV, le operazioni colturali e le rotazioni adottate dall'azienda è cruciale. L'altezza e la distanza interfilare tra i moduli (pitch) devono permettere il passaggio e le manovre dei mezzi agricoli necessari alle lavorazioni, tenendo conto delle specifiche esigenze delle colture scelte, anche al di sotto dei moduli fotovoltaici (Dinesh and Pearce, 2016; Weselek et al., 2019). Tra le diverse tipologie di impianti AV, quelli sopraelevati offrono maggiore libertà di movimento per i mezzi meccanici, mentre quelli interfilari, soprattutto se non avanzati, presentano maggiori difficoltà. Il dimensionamento degli impianti AV non deve considerare solo le dimensioni dei macchinari, ma anche un margine di sicurezza per evitare collisioni accidentali tra i mezzi e le strutture dell'impianto (Dinesh and Pearce, 2016; Willockx et al., 2023). Questo margine di sicurezza comporta inevitabilmente una perdita di superficie coltivabile, che è però inferiore negli impianti sopraelevati e maggiore in quelli interfilari. Inoltre, è necessario prevedere uno spazio di manovra (zona buffer) lungo il perimetro del campo, priva di strutture AV, per consentire le manovre dei mezzi meccanici. La larghezza di quest'area perimetrale deve essere dimensionata in base alle dimensioni del mezzo più grande utilizzato in azienda.

3 Progetto preliminare

Il sistema agrivoltaico (AV) proposto dal committente prevede l'installazione di un impianto ad inseguimento solare monoassiale 1P di tipo sopraelevato, classificato come AV avanzato. L'asse principale di rotazione è posizionato a un'altezza di circa 3 m, con un'altezza minima dal suolo di 2,1 m. I moduli fotovoltaici adottati presentano dimensioni pari a $2,382 \text{ m} \times 1,134 \text{ m}$.

L'obiettivo del progetto è la realizzazione di un impianto AV con una potenza nominale pari di 15,81 MW, da integrare nell'area agricola selezionata, attualmente destinata prevalentemente alla coltivazione di cereali e foraggi. Per garantire un'integrazione ottimale tra produzione energetica e agricola, è stata effettuata un'analisi sui valori minimi e massimi di distanza tra i tracker (pitch), un parametro determinante per l'ottimizzazione della produttività agricola nei sistemi AV. Il pitch influisce direttamente sul livello di ombreggiamento a terra e sull'accessibilità dell'impianto ai mezzi meccanici. La scelta del valore ottimale dipende da diversi fattori, tra cui il tipo di coltura, la posizione geografica, l'irradiazione solare e l'angolo di inclinazione dei moduli fotovoltaici. L'obiettivo è trovare un equilibrio tra la massimizzazione della produzione energetica e il mantenimento di condizioni ottimali per la crescita delle colture.

Nel presente studio sono stati analizzati cinque valori di pitch: 5 m, 5,5 m, 6 m, 6,5 m e 7 m, corrispondenti ai seguenti valori di Ground Cover Ratio (GCR):

- 5 m \rightarrow GCR 47,6 %
- 5,5 m \rightarrow GCR 43,3 %
- 6 m \rightarrow GCR 39,7 %
- 6,5 m \rightarrow GCR 36,6 %
- 7 m \rightarrow GCR 34,0 %

Il GCR è definito come il rapporto tra la larghezza della vela e il pitch e rappresenta un parametro chiave nella progettazione e gestione degli impianti agrivoltaici. Esso è strettamente correlato al livello di ombreggiamento a cui sono sottoposte le colture coltivate al di sotto dell'impianto AV (Dupraz, 2023): un GCR elevato indica una maggiore densità di moduli fotovoltaici per unità di superficie, con conseguente incremento sia della produzione energetica sia del livello di ombreggiamento sulle colture agricole.

4 Studio di ottimizzazione dell'impianto agrivoltaico

4.1.1 Descrizione della piattaforma di simulazione

Per simulare la crescita e la produzione di colture coltivate all'ombra di un sistema agrivoltaico (AV), è stata utilizzata una piattaforma software sviluppata da Tspin S.r.l. all'interno delle attività di ricerca dell'Università Cattolica del Sacro Cuore (Amaducci et al., 2018) che accoppia un modello di radiazione e ombreggiamento ad un modello di simulazione di crescita colturale chiamato DAISY (Abrahamsen and Hansen, 2000). Questa piattaforma, schematizzata in Figura 2 e utilizzata in studi precedenti (Amaducci et al., 2018; Bellone et al., 2024; Potenza et al., 2022), permette di calcolare, per ogni punto di un sistema AV collocato in un'area definita, la radiazione solare (diretta e diffusa) incidente al suolo (Figura 3). Ciò implica che ogni volta che i pannelli proiettano un'ombra sul terreno, il sistema ne tiene conto. Per una data geo-localizzazione (latitudine e longitudine) e giorno dell'anno, viene utilizzata una procedura che calcola la posizione del sole, l'azimut solare, l'elevazione, l'alba e il tramonto. Per i sistemi ad inseguimento solare, questa procedura calcola anche gli angoli di rotazione dell'asse dell'impianto, mentre per le simulazioni con impianti statici l'angolo di inclinazione è fisso. La piattaforma calcola quindi la quantità di radiazione globale disponibile per la coltura sotto l'impianto AV. Questi dati vengono poi integrati nel modello colturale DAISY, che simula l'effetto dell'ombreggiamento e la riduzione della radiazione globale sulle colture. Questa procedura permette di simulare l'effetto di diverse configurazioni di impianti AV sulla coltura, permettendo l'ottimizzazione nella progettazione e nella gestione degli impianti AV. La piattaforma permette quindi di valutare in anticipo come un sistema AV in fase di progettazione potrebbe influenzare la produzione agricola, verificando se rientra nei limiti stabiliti dalle prassi di riferimento per tali sistemi.

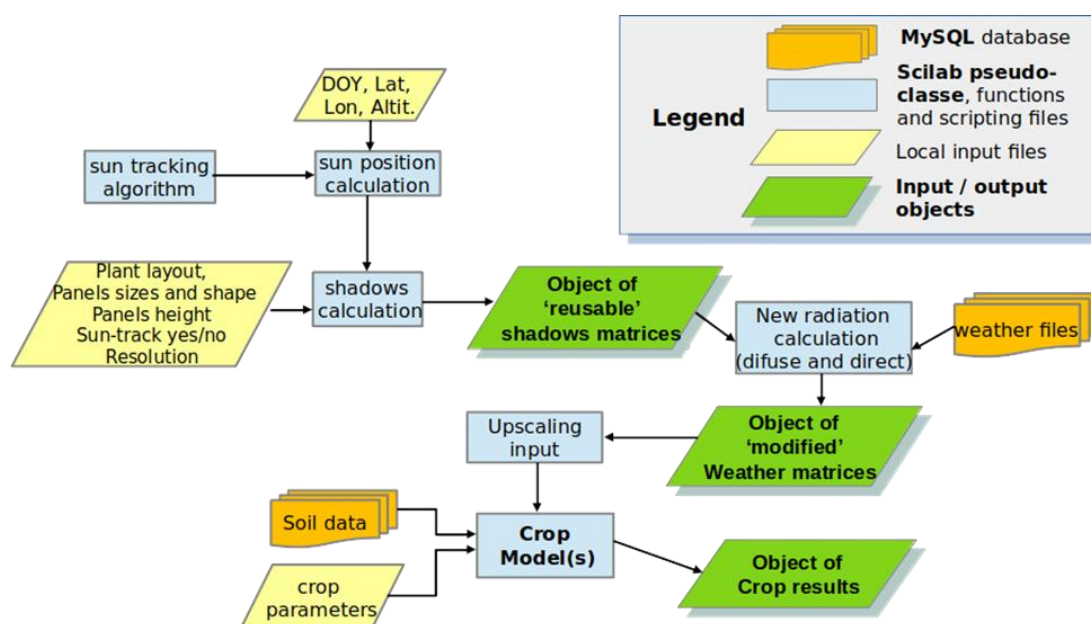


Figura 2. Diagramma del processo di simulazione dei sistemi agricoli agrivoltaici (Amaducci et al., 2018)

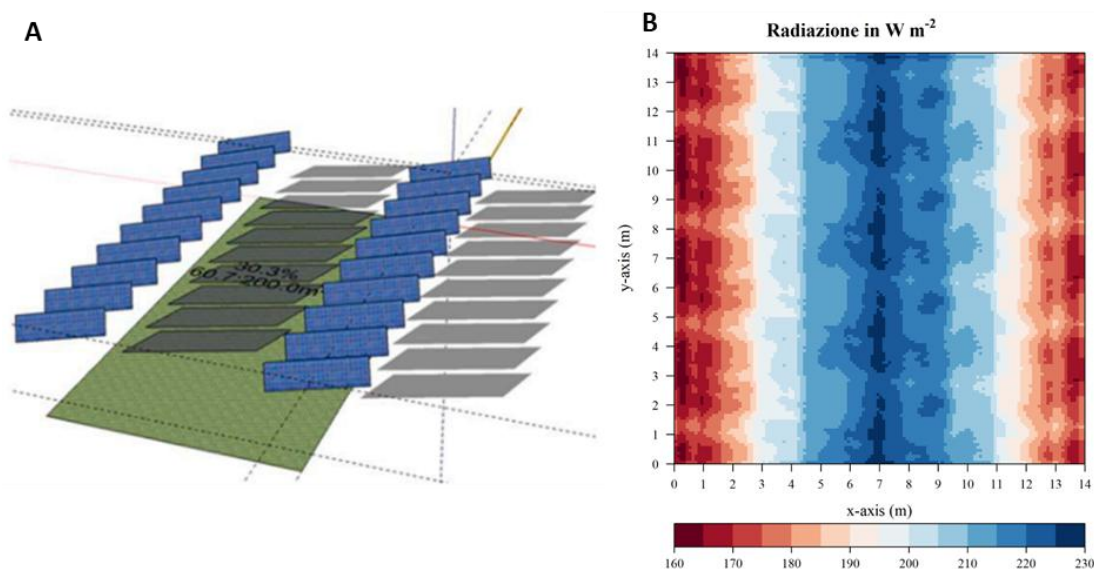


Figura 3. Rappresentazione della porzione compresa tra due filari di un sistema AV con proiezione delle ombre dei moduli sul suolo (A). Esempio di irradianza media incidente sul suolo (B), le parti centrali rispetto i filari AV sono soggette mediamente ad un minore ombreggiamento.

4.1.2 Descrizione degli scenari di simulazione

Al fine di valutare l'impatto degli impianti agrivoltaici (AV) sulla produzione agricola, è stato impiegato un set di dati meteorologici orari rappresentativo di un periodo di 24 anni. I dati sono stati ottenuti dal dataset di rianalisi ERA5-Land, fornito dal Copernicus Climate Change Service (C3S), e sono stati selezionati per il punto griglia più vicino alla località di interesse. Questi dati hanno permesso di analizzare le condizioni climatiche storiche e di simulare con maggiore precisione le dinamiche tra radiazione solare e resa agricola, garantendo una valutazione accurata dell'impatto dell'impianto AV nel contesto specifico. La piattaforma di simulazione ha permesso di analizzare diversi scenari di pitch individuati nel processo di ottimizzazione, con valori pari a: 5 m, 5,5 m, 6 m, 6,5 m e 7 m. Attraverso questa piattaforma è stato possibile simulare la riduzione della radiazione solare globale nei vari scenari del sistema AV. Un esempio di rendering dell'impianto simulato è riportato in Figura 4.

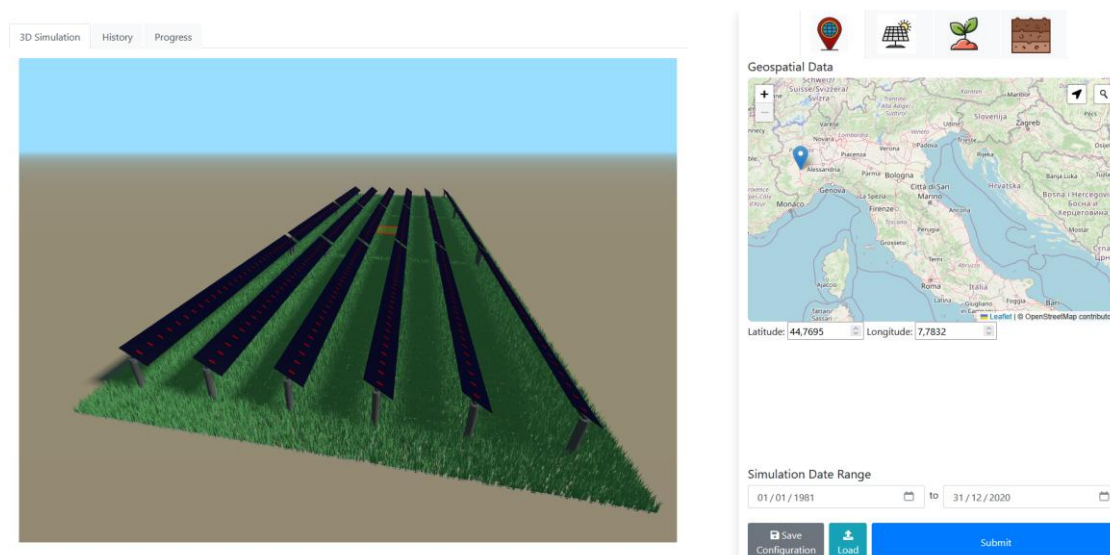


Figura 4 Rappresentazione 3D dell'impianto agrivoltaico simulato dalla piattaforma da Tspin S.r.l. all'interno delle attività di ricerca dell'Università Cattolica del Sacro Cuore.

In particolare, il quadrato rosso rappresenta l'area centrale, che viene identificato dalla piattaforma come rappresentativa dell'intero impianto per effettuare le simulazioni delle colture. I risultati indicano una riduzione media della radiazione pari al 42,6 %, 39,6 %, 37,2 %, 34,7 % e 32,5 %, rispettivamente per pitch di 5 m, 5,5 m, 6 m, 6,5 m e 7 m. Nel modello colturale DAISY sono state simulate due diverse rotazioni. La prima, una rotazione orticola irrigua, prevedeva pomodoro da mensa e cavolfiore. La seconda, una rotazione per seminativi in condizioni non irrigue, includeva frumento e pisello proteico. Oltre alle simulazioni delle colture sotto l'impianto AV, sono state effettuate simulazioni in piena luce, ossia senza l'impianto AV, per confrontare i risultati e quantificare le eventuali variazioni nella produttività agricola.

4.1.3 Validazione della piattaforma

Per fornire una valutazione più precisa del grado di incertezza associato ai valori simulati in piena luce ed anche quelli in agrivoltaico, i risultati della piattaforma sono stati validati con i dati ufficiali ISTAT a livello provinciale. Sono stati presi in considerazione i dati relativi a 22 province del Nord Italia, raccolti dal 2006 al 2023, classificate nel database ISTAT come frumento duro, pisello, pomodoro da mensa e cavolfiore. Questo approccio permette di confrontare i valori simulati con quelli reali ottenuti da fonti ufficiali, al fine di determinare la robustezza e l'affidabilità delle stime. Attraverso questa analisi, si ottiene una visione più accurata dell'incertezza associata ai modelli e delle potenzialità di previsione delle rese agricole in condizioni reali.

Per valutare l'accuratezza delle previsioni della resa delle colture, sono stati calcolati diversi indicatori statistici, tra cui:

- **RMSE (Root Mean Square Error):** questo parametro misura la deviazione media quadratica tra i valori simulati e quelli osservati, fornendo una stima globale dell'errore.

- NRMSE (Normalized Root Mean Square Error): una versione normalizzata dell'RMSE che consente di confrontare errori tra diverse colture o tra diversi set di dati, indipendentemente dall'unità di misura, migliorando la comparabilità.
- BIAS: l'indicatore che misura la differenza sistematica tra i valori simulati e quelli osservati, utile per comprendere se esiste una sovrastima o una sottostima nelle previsioni delle rese.

I risultati della validazione sono presentati in Figura 5, che illustrano le performance delle simulazioni confrontate con i dati reali. Il grafico mostra i valori di errore per ogni coltura, evidenziando la precisione dei modelli attraverso l'analisi dei principali indicatori statistici, come RMSE, NRMSE e BIAS. Queste visualizzazioni permettono di comprendere meglio la distribuzione degli errori e l'affidabilità delle previsioni rispetto ai dati osservati, offrendo una panoramica completa delle performance del modello.

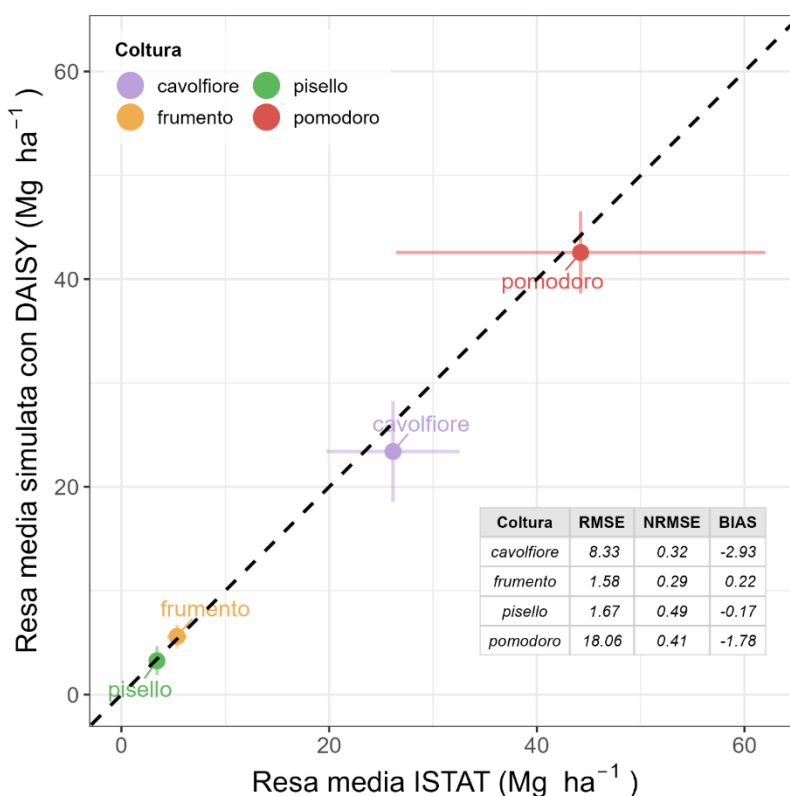


Figura 5 Confronto tra le rese simulate dal modello Daisy e le rese osservate (ISTAT) per ciascuna coltura analizzata. I punti rappresentano la resa media degli anni di simulazione. La linea tratteggiata indica la bisettrice (linea 1:1), ovvero la perfetta corrispondenza tra dato osservato e simulato. Le metriche di performance (RMSE, NRMSE e BIAS) sono riportate in tabella e permettono di valutare l'accuratezza del modello per ogni coltura.

4.1.4 Indicatori chiave di prestazione

I risultati della piattaforma di simulazione sono stati utilizzati per calcolare la resa delle colture in tonnellate per ettaro ($t\ ha^{-1}$). È stato considerato un margine di sicurezza non coltivato di 0.5 m per ciascun lato dei supporti di sostegno del sistema AV, necessario per ragioni di sicurezza durante le operazioni agricole meccanizzate, e che rappresenta una porzione di terreno improduttivo. Questo margine improduttivo comporta una riduzione della produzione che diminuisce all'aumentare del pitch. Ad esempio, con un pitch di 5 m, questo margine improduttivo comporta una riduzione della produzione del 20 % mentre con un pitch di 7 m del 14

%. Questo approccio garantisce che l'impatto del margine di sicurezza sull'area di coltivazione disponibile e sulla resa sia adeguatamente considerato nella valutazione delle produttività dei diversi pitch del sistema AV.

Inoltre, è stata valutata la resa media su un periodo triennale per ciascuna rotazione colturale, come indicato dal DM Agrivoltaico per la produzione lorda vendibile (PLV). Questo confronto permette di analizzare le differenze di produttività su base triennale tra i diversi cicli colturali.

Per confrontare i risultati e quantificare le eventuali variazioni di resa tra quelli ottenuti in AV rispetto a condizioni di piena luce, i KPI sono stati normalizzati seguendo la seguente formula:

$$KPI (\%) = \frac{KPI \text{ in piena luce} - KPI \text{ in AV}}{KPI \text{ in piena luce}} \times 100$$

4.1.5 Risultati degli indicatori chiave di prestazione

I risultati degli indicatori chiave di prestazione (KPI) utilizzati per valutare l'effetto delle diverse configurazioni di pitch nel processo di ottimizzazione del sistema AV sono riportati in Figura 6. I KPI considerati includono la resa delle colture (Figura 6a), e la resa triennale della rotazione colturale (Figura 6b), tutti rappresentati in forma normalizzata come variazione percentuale (%). Valori positivi indicano che, in AV, i valori dei KPI risultano inferiori rispetto a quelli in piena luce. In Figura 6 sono riportati i valori medi dei KPI ottenuti da 24 anni di simulazione.

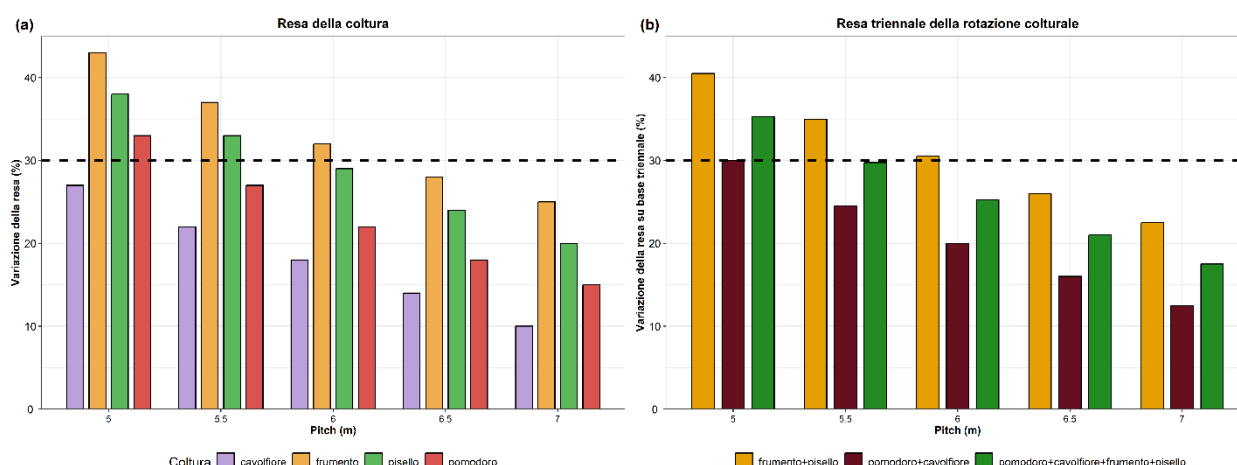


Figura 6 Media della variazione in percentuale della resa nelle diverse configurazioni di pitch. I KPI considerati sono: a) resa delle colture e b) resa triennale della rotazione colturale. La linea tratteggiata nera rappresenta la soglia del 30% di calo di resa.

I risultati evidenziano una chiara correlazione tra la spaziatura dei pannelli (pitch) e la performance agronomica delle colture. Come tendenza generale, un aumento del pitch comporta una minore riduzione della resa per tutte le specie analizzate rispetto alle condizioni di pieno sole. La soglia di riduzione massima di resa, fissata al 30% e indicata dalla linea tratteggiata nei grafici, è stata utilizzata come riferimento per valutare la sostenibilità produttiva.

L'analisi della resa per singola coltura (Figura 6a) mostra risposte differenziate all'ombreggiamento. Il frumento si conferma la coltura più sensibile, registrando la maggiore riduzione di resa, mentre il cavolfiore dimostra la migliore tolleranza. Per mantenere la riduzione di resa sotto la soglia critica del 30%, è necessario un pitch minimo di 5 m per il cavolfiore, 5.5 m per il pomodoro, 6 m per il pisello e 6.5 m per il frumento. Considerando l'impatto sulla resa cumulata in un ciclo di rotazione triennale (Figura 6b), la rotazione pomodoro-cavolfiore risulta la più performante, mantenendosi sotto la soglia del 30% già con un pitch di 5 m. Al contrario, la rotazione frumento-pisello richiede un pitch di almeno 6.5 m. Tuttavia, analizzando la media complessiva di tutte le colture, emerge che un pitch di 5.5 m è sufficiente per garantire una riduzione di resa media triennale inferiore al 30%, rappresentando così un valido compromesso tra produzione agricola ed energetica.

5 Progetto ottimizzato

I risultati dell'ottimizzazione del pitch, basati sull'analisi dei KPI, evidenziano che un valore ottimale per il sistema agrivoltaico (AV) risulta pari a 5,5 metri. Questo valore rappresenta il miglior compromesso tra efficienza energetica e sostenibilità agricola, consentendo di massimizzare la produzione di energia grazie all'aumento del Ground Coverage Ratio (GCR) dell'impianto, senza compromettere in modo significativo la resa agricola. Le simulazioni a lungo termine confermano che, con un pitch di 5,5 metri, la produttività complessiva delle due rotazioni colturali adottate nel progetto si mantiene al di sotto della soglia critica del 30% di riduzione su base media triennale. Tale valore è considerato un limite accettabile per garantire la sostenibilità economica e produttiva del sistema agrivoltaico. Inoltre, questo margine di sicurezza riduce il rischio di perdite significative, sia in termini di produzione agricola che di ritorni economici nel lungo periodo.

Dal punto di vista normativo, il layout ottimizzato dell'impianto AV, con un pitch di 5,5 metri, soddisfa tutti i requisiti per essere classificato come AV avanzato, in conformità con le linee guida del DM Agrivoltaico. In particolare:

- La superficie destinata all'attività agricola, pur riducendosi del 18%, rimane superiore al 70% della superficie totale del sistema AV, rispettando i criteri imposti dalla normativa.
- L'altezza minima dell'impianto, pari a 2,1 metri, garantisce l'idoneità per lo svolgimento di attività colturale, in linea con i requisiti previsti dal decreto.
- La produzione elettrica specifica dell'impianto AV avanzato risulta non inferiore al 60% della producibilità di un impianto fotovoltaico tradizionale di riferimento, assicurando così un adeguato equilibrio tra produzione energetica e utilizzo del suolo agricolo.

Grazie a questa configurazione ottimizzata, il sistema agrivoltaico proposto rappresenta una soluzione avanzata e sostenibile, capace di coniugare efficacemente l'efficienza energetica con la tutela della produttività agricola.

6 Bibliografia

- Abrahamsen, P., Hansen, S., 2000. Daisy: an open soil-crop-atmosphere system model. *Environmental Modelling and Software* 15, 313–330. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00003-7)
- Adeh, E.H., Selker, J.S., Higgins, C.W., 2018. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLoS ONE* 13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- Ahmed, M.S., Khan, M. Rezwana, Haque, A., Khan, M. Ryyan, 2022. Agrivoltaics analysis in a techno-economic framework: Understanding why agrivoltaics on rice will always be profitable. *Applied Energy* 323, 119560. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119560>
- Al Mamun, M.A., Garba, I.I., Campbell, S., Dargusch, P., deVoil, P., Aziz, A.A., 2023. Biomass production of a sub-tropical grass under different photovoltaic installations using different grazing strategies. *Agricultural Systems* 208, 103662. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2023.103662>
- Amaducci, S., Yin, X., Colauzzi, M., 2018. Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Appl Energy* 220, 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
- Barragán Sánchez-Lanuza, M., Lillo-Bravo, I., Egea, G., Delgado-Sanchez, J.M., 2024. Spectral irradiance, ground and crop dynamic reflectance: Key determinants in predicting photocurrent for agrovoltaic systems. *Energy Conversion and Management* 312, 118572. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118572>
- Barron-Gafford, G.A., Minor, R.L., Allen, N.A., Cronin, A.D., Brooks, A.E., Pavao-Zuckerman, M.A., 2016. The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Sci Rep* 6, 35070. <https://doi.org/10.1038/srep35070>
- Barron-Gafford, G.A., Pavao-Zuckerman, M.A., Minor, R.L., Sutter, L.F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D.T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A.K., Nabhan, G.P., Macknick, J.E., 2019. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability* 2, 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- Bellone, Y., Croci, M., Impollonia, G., Nik Zad, A., Colauzzi, M., Campana, P.E., Amaducci, S., 2024. Simulation-Based Decision Support for Agrivoltaic Systems. *Applied Energy* 369, 123490. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123490>
- Campana, P.E., Stridh, B., Amaducci, S., Colauzzi, M., 2021. Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems. *Journal of Cleaner Production* 325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129091>
- Dinesh, H., Pearce, J.M., 2016. The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 299–308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., Ferard, Y., 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 36, 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Dupraz, C., 2023. Assessment of the ground coverage ratio of agrivoltaic systems as a proxy for potential crop productivity. *Agroforest Syst.* <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00906-3>
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., Ferard, Y., 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 36, 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Edouard, S., Combes, D., Iseghem, M.V., Tin, M.N.W., Escobar-Gutiérrez, A.J., 2023. Increasing land productivity with agriphotovoltaics: Application to an alfalfa field. *Applied Energy* 329, 120207. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120207>
- Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.M., Dejean, C., Belaud, G., 2018. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuce. *Agricultural Water Management* 208, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001>
- Ferrara, G., Boselli, M., Palasciano, M., Mazzeo, A., 2023. Effect of shading determined by photovoltaic panels installed above the vines on the performance of cv. Corvina (*Vitis vinifera* L.). *Scientia Horticulturae* 308, 111595. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111595>
- Fernández-Solas, Á., Fernández-Ocaña, A.M., Almonacid, F., Fernández, E.F., 2023. Potential of agrivoltaics systems into olive groves in the Mediterranean region. *Applied Energy* 352, 121988. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121988>
- Goetzberger, A., Zastrow, A., 1982. On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy* 1, 55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>
- Gorjian, S., Bousi, E., Özdemir, Ö.E., Trommsdorff, M., Kumar, N.M., Anand, A., Kant, K., Chopra, S.S., 2022. Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158, 112126. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112126>
- Horowitz, K., Ramasamy, V., Macknick, J., Margolis, R., 2020. Capital Costs for Dual-Use Photovoltaic Installations: 2020 Benchmark for Ground-Mounted PV Systems with Pollinator-Friendly Vegetation, Grazing, and Crops (No. NREL/TP--6A20-77811, 1756713, MainId:30726). <https://doi.org/10.2172/1756713>

- Jiang, S., Tang, D., Zhao, L., Liang, C., Cui, N., Gong, D., Wang, Y., Feng, Y., Hu, X., Peng, Y., 2022. Effects of different photovoltaic shading levels on kiwifruit growth, yield and water productivity under “agrivoltaic” system in Southwest China. *Agricultural Water Management* 269, 107675. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107675>
- Kim, Sojung, Kim, Sumin, Yoon, C.-Y., 2021. An Efficient Structure of an Agrophotovoltaic System in a Temperate Climate Region. *Agronomy* 11, 1584. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081584>
- Kim, Sumin, Kim, Sojung, 2023. Optimization of the design of an agrophotovoltaic system in future climate conditions in South Korea. *Renewable Energy* 206, 928–938. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.090>
- Ko, J., Cho, J., Choi, J., Yoon, C.-Y., An, K.-N., Ban, J.-O., Kim, D.-K., 2021. Simulation of Crop Yields Grown under Agro-Photovoltaic Panels: A Case Study in Chonnam Province, South Korea. *Energies* 14, 8463. <https://doi.org/10.3390/en14248463>
- Laub, M., Pataczek, L., Feuerbacher, A., Zikeli, S., Högy, P., 2022. Contrasting yield responses at varying levels of shade suggest different suitability of crops for dual land-use systems: a meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 42, 51. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00783-7>
- Lee, S., Lee, J., Jeong, Y., Kim, D., Seo, B., Seo, Y., Kim, T., Choi, W., 2023. Agrivoltaic system designing for sustainability and smart farming: Agronomic aspects and design criteria with safety assessment. *Applied Energy* 341, 121130. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121130>
- Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., Dupraz, C., 2013. Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy* 44, 54–66. <https://doi.org/10.1016/J.EJA.2012.08.003>
- MiTE, 2022. Linee Guida in materia di Impianti Agrivoltaici. Ministero della Transizione Ecologica MiTE, Roma, Italia.
- Pataczek, L., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Lewandowski, I., Zikeli, S., Schweiger, A., 2023. Agrivoltaics mitigate drought effects in winter wheat. *Physiologia Plantarum* 175, e14081. <https://doi.org/10.1111/ppl.14081>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol Earth Syst Sci* 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Poonia, S., Jat, N.K., Santra, P., Singh, A.K., Jain, D., Meena, H.M., 2022. Techno-economic evaluation of different agrivoltaic designs for the hot arid ecosystem India. *Renewable Energy* 184, 149–163. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.11.074>
- Potenza, E., Croci, M., Colauzzi, M., Amaducci, S., 2022. Agrivoltaic System and Modelling Simulation: A Case Study of Soybean (*Glycine max* L.) in Italy. *Horticulturae* 8. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121160>
- Reher, T., Lavaert, C., Willockx, B., Huyghe, Y., Bisschop, J., Martens, J.A., Diels, J., Cappelle, J., Van De Poel, B., 2024. Potential of sugar beet (*Beta vulgaris*) and wheat (*Triticum aestivum*) production in vertical bifacial, tracked, or elevated agrivoltaic systems in Belgium. *Applied Energy* 359, 122679. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122679>
- Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Goetzberger, A., Weber, E., 2020. Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy* 265, 114737. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>
- Semeraro, T., Scarano, A., Curci, L.M., Leggieri, A., Lenucci, M., Basset, A., Santino, A., Piro, G., De Caroli, M., 2024. Shading effects in agrivoltaic systems can make the difference in boosting food security in climate change. *Applied Energy* 358, 122565. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122565>
- Sturchio, M.A., Kannenberg, S.A., Knapp, A.K., 2024. Agrivoltaic arrays can maintain semi-arid grassland productivity and extend the seasonality of forage quality. *Applied Energy* 356, 122418. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122418>
- Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Högy, P., Obergfell, T., 2021. Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>
- Waghmare, R., Jilte, R., Joshi, S., 2023. Investigations on Agrophotovoltaic System Using Different Crops with Special Attention on the Improved Electrical Output. *J. Asepe*. <https://doi.org/10.14416/j.asepe.2023.09.007>
- Waghmare, R., Jilte, R., Joshi, S., Tete, P., 2022. Review on agrophotovoltaic systems with a premise on thermal management of photovoltaic modules therein. *Environ Sci Pollut Res* 30, 25591–25612. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23202-6>
- Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., Högy, P., 2021. Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agronomy for Sustainable Development* 41, 59. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y>
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., Högy, P., 2019. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 39, 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
- Willockx, B., Uytterhaegen, B., Ronsijn, B., Herteleer, B., & Cappelle, J. (2020). A Standardized Classification and Performance Indicators of Agrivoltaic Systems. 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1995-1998. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-6CV.2.47>

Willockx, B., Lavaert, C., Cappelle, J., 2023. Performance evaluation of vertical bifacial and single-axis tracked agrivoltaic systems on arable land. *Renewable Energy* 217, 119181.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119181>