

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN NUOVO IMPIANTO AGRIVOLTAICO  
E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RTN  
LOCALITA' MASSERIA BARONI  
COMUNE DI PRESICCE ACQUARICA (LE)  
DENOMINAZIONE IMPIANTO - PVA003 ACQUARICA MASSERIA BARONI  
POTENZA NOMINALE 24.0 MW

## PROGETTO DEFINITIVO - SIA

### PROGETTAZIONE E SIA

#### HOPE engineering

ing. Fabio PACCAPELO  
ing. Andrea ANGELINI  
arch. Andrea GIUFFRIDA  
arch. Gaetano FORNARELLI  
dott.ssa Anastasia AGNOLI

#### Studio ALAMI

Arch.Fabiano SPANO  
Arch. Valentina RUBRICHI  
Arch. Susanna TUNDO

### PROGETTAZIONE DEGLI IMPIANTI ELETTRICI

ing. Roberto DI MONTE

### AGRONOMIA E STUDI COLTURALI

dott. Donato RATANO

### STUDI SPECIALISTICI E AMBIENTALI

MICROCLIMATICA  
dott.ssa Elisa GATTO

ARCHEOLOGIA  
dott. Cristian NAPOLITANO

GEOLOGIA  
Apogeo Srl

ACUSTICA  
dott.ssa Sabrina SCARAMUZZI

### COLLABORAZIONE SCIENTIFICA

**UNIVERSITÀ CATTOLICA DEL SACRO CUORE**  
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLE PRODUZIONI VEGETALI SOSTENIBILI  
prof. Stefano AMADUCCI

## R.2 RELAZIONI SPECIALISTICHE

### R.2.5 Ottimizzazione del sistema agrivoltaico e monitoraggio

REV.	DATA	DESCRIZIONE
	10-23	prima emissione





UNIVERSITÀ  
CATTOLICA  
del Sacro Cuore

## Ottimizzazione del sistema agrivoltaico e piano di monitoraggio

**Responsabile scientifico:**  
Stefano Amaducci

### Indice

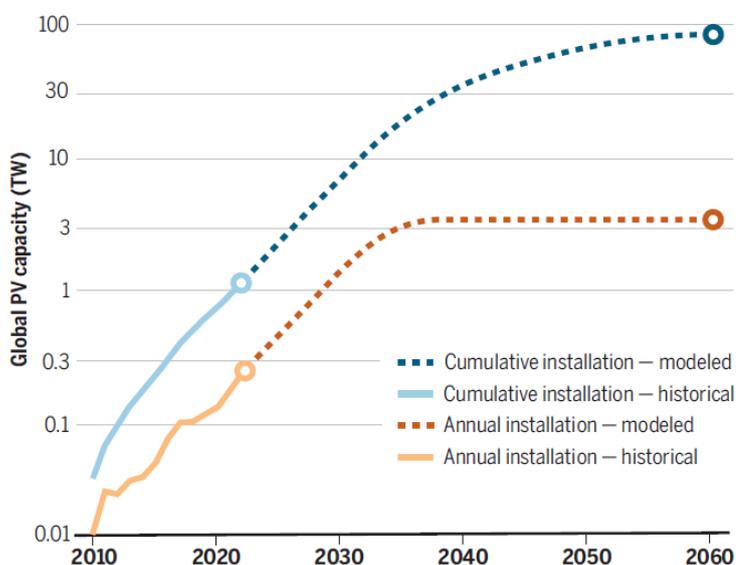
Ottimizzazione del sistema agrivoltaico e piano di monitoraggio .....	1
Indice .....	1
1. ....	Introduzione
1	

2.Ottimizzazione 6	degli	impianti	agrivoltaici
2.1.Descrizione 6	della	piattaforma	di simulazione
2.2.Descrizione 7	degli impianti	agrivoltaici e dell'impianto	fotovoltaico di riferimento
2.3.Radiazione solare incidente e ombreggiamento simulati nei diversi scenari di pitch degli impianti agrivoltaici.....			9
2.4.Produzione energia elettrica nei diversi scenari di pitch degli impianti agrivoltaici 11			
2.5.Produzione 12	dell'olivo	sotto	gli impianti agrivoltaici
2.6.Considerazioni 14			conclusive
3.Monitoraggio 15	dei	sistemi	Agrivoltaici
3.1.Monitoraggio 16	del	risparmio	idrico
3.2.Monitoraggio 17	della	continuità	dell'attività agricola
3.3.Monitoraggio 18	del	recupero	della fertilità del suolo
3.4.Monitoraggio 18		del	microclima
3.5.Monitoraggio 19	della	resilienza	ai cambiamenti climatici
4.Monitoraggio 21	sperimentale	applicato	allo studio dei sistemi agrivoltaici
4.1.Clima 22		e	Suolo
4.2.Analisi 23	delle	colture	e campionamenti

5. .... Bibliografia  
24

# 1. Introduzione

L'attuale congiuntura storica, tra crisi energetiche e ambientali, offre le condizioni ideali per lo sviluppo delle energie rinnovabili e fra queste si ritiene che il fotovoltaico avrà un ruolo fondamentale. Nel 2022 la potenza installata a livello mondiale ha raggiunto la storica soglia di 1 TWp, di cui circa un quinto o 208 GW (SolarPower Europe, 2022) sono installati in Europa. Le più recenti stime sullo sviluppo del fotovoltaico, che considerano sia gli obiettivi politici che i trend commerciali, indicano un incremento esponenziale che porterà la potenza installata in Europa nel 2030 a 730 GW. La crescita del PV non si arresterà al 2030, quando raggiungerà circa 10 TW a livello mondiale, ma continuerà con un ritmo di installazione pari circa 3 TW ogni anno per portare la potenza installata fino ai 100 TW previsti al 2060 (Haegel et al., 2023)



**Figura 1** Dati storici (linee continue) e simulati (tratteggiati) della potenza fotovoltaica cumulata (blu) e di quella installata annualmente (arancio) a livello mondiale (Haegel et al., 2023)

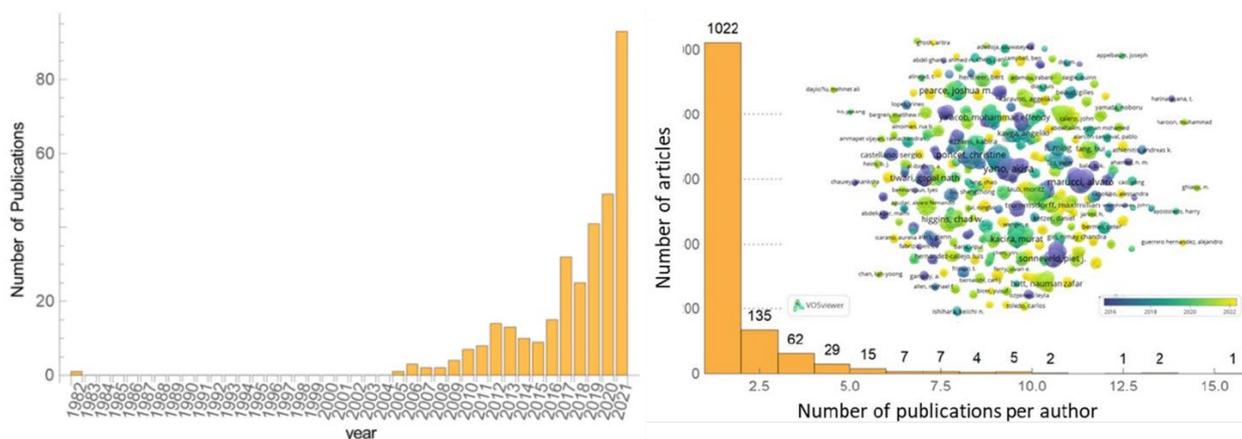
Questa crescita rappresenta una vera e propria rivoluzione che, seppur mossa dalla necessità di decarbonizzare i sistemi produttivi attraverso la produzione di energia rinnovabile, deve fare i conti con importanti investimenti per la realizzazione delle infrastrutture fotovoltaiche e soprattutto con l'identificazione dei siti di installazione.

Si stima che circa il 50% del fotovoltaico sarà integrato agli edifici (prevalentemente sui tetti) o sarà installato in aree urbane o su terreni marginali non adibiti alla coltivazione, il restante 50% è invece destinato ad occupare terreno agricolo. Ad oggi la superficie agricola occupata da impianti PV a terra è molto bassa, circa 100.000 ha a livello europeo (92 GW) che corrispondono allo 0.024% della SAU, una superficie pari a una piccola frazione di quanto è invece occupato da colture bionergetiche (coltivate in europa su circa 10 Mha). La coltivazione di queste ultime riduce sì la produzione attuale di alimenti, ma non intacca la possibilità di produrne in futuro, in quanto il terreno agricolo potrà essere facilmente riconvertito da colture energetiche a colture alimentari. Nel caso degli impianti fotovoltaici a terra il terreno rimane invece indisponibile per la

coltivazione, per questo sono stati posti limiti stringenti alla diffusione di impianti fotovoltaici a terra.

In questo contesto assumono un notevole interesse le tecnologie agrivoltaiche. Il concetto di agrivoltaico, cioè l'integrazione sullo stesso terreno della produzione di energia elettrica da pannelli fotovoltaici e delle coltivazioni agricole, è stato proposto per la prima volta nel 1982 da Adolf Goetzberger, fondatore del Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE.

L'agrivoltaico nacque proprio dalla considerazione che un'espansione massiccia della tecnologia fotovoltaica avrebbe aumentato il consumo di suolo agricolo, che è una risorsa non rinnovabile, fondamentale per la fornitura di numerosi servizi ecosistemici, già sottoposta alla pressione dell'espansione urbanistica e alle conseguenze negative di gestioni agronomiche inopportune. Per 30 anni circa dalla sua concettualizzazione non si è praticamente sentito parlare di agrivoltaico, mentre negli ultimi 10 le iniziative di ricerca (Figura 2) ed imprenditoriali sono aumentate esponenzialmente.



**Figura 2** Incremento esponenziale delle pubblicazioni sull'agrivoltaico (Blanco et al. 2023)

I risultati delle prime ricerche sull'agrivoltaico indicano che sotto i pannelli fotovoltaici le colture possono utilizzare l'acqua più efficientemente, tollerano meglio le temperature elevate e sono protette da eventi meteorologici potenzialmente dannosi. Per questo è stato proposto che soprattutto in ambienti caldi e siccitosi, l'agrivoltaico ben realizzato e gestito possa rappresentare uno strumento di resilienza nei confronti del cambiamento climatico (Figura 3). Senza entrare nel dettaglio degli aspetti eco-fisiologici che spiegano il vantaggio mutualistico della presenza contemporanea di infrastrutture fotovoltaiche e di colture di interesse agrario si ritiene necessario puntualizzare che i migliori risultati presenti in letteratura siano stati ottenuti con tecnologie agrivoltaiche avanzate, e che non possano quindi essere generalizzate e applicate a qualsiasi impianti agrivoltaico.

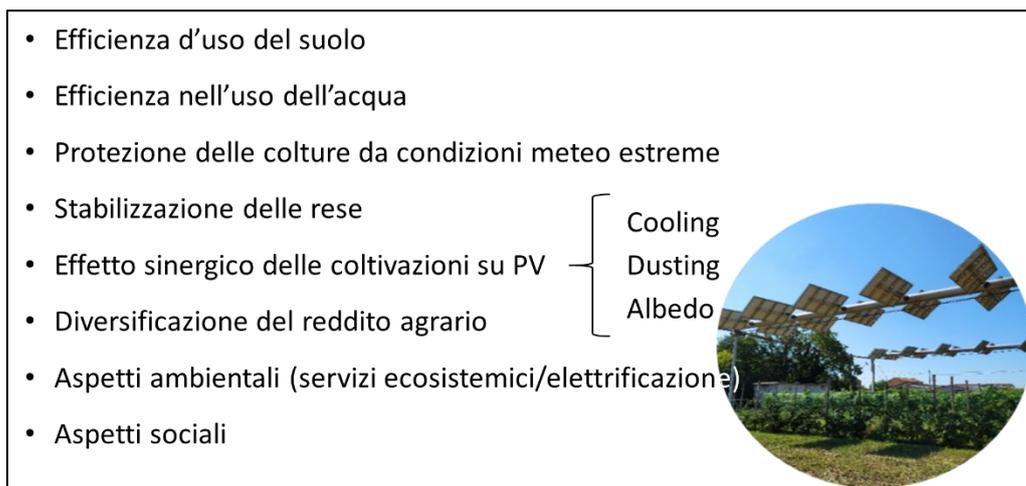


Figura 3 Benefici dell'agrivoltaico (Amaducci et al. 2022)

Preoccupa infatti che una tecnologia poco conosciuta, che promette di integrare in modo sinergico la produzione di energia elettrica fotovoltaica con quella delle colture agrarie, sia in realtà il veicolo di interventi speculativi che riducano la disponibilità di terreni agricoli.

Per promuovere e favorire lo sviluppo di tecnologie agrivoltaiche sostenibili che offrano reali benefici al mondo agricolo e garantiscano un incremento della fornitura di servizi ecosistemici, è fondamentale che ci sia un accordo sulla definizione e sulle caratteristiche costruttive e di gestione degli impianti agrivoltaici, poiché limitare la valutazione della sostenibilità dell'agrivoltaico ai soli aspetti produttivi è riduttivo e non permette di valutare appieno i vantaggi associati a questa tecnologia.

In un recente report del JRC (Chatzipanagi et al., 2023), che costituisce la base per la realizzazione nel 2024 delle linee guida sull'agrivoltaico della Commissione Europea, è stato concluso che tra gli aspetti più importanti per garantire lo sviluppo di un settore agrivoltaico efficace e sostenibile sia necessario definire in modo chiaro cosa si intenda per agrivoltaico e che siano redatti degli standard per orientare gli sviluppatori verso la realizzazione di impianti che garantiscano non solo la continuità dell'attività agricola ma che possano fornire anche dei vantaggi in termini di capacità produttiva e resilienza nei confronti del cambiamento climatico.

Di seguito si riporta una sintesi delle principali conclusioni del report del JRC:

- Stabilire una definizione chiara e concreta di Agri-FV insieme a uno standard per i sistemi Agri-FV;
- Garantire la continuità dell'attività agricola;
- Ulteriore sviluppo di R&S, R&I e progetti pilota;
- Identificazione/classificazione di potenziali terreni agricoli per l'utilizzo dell'agrivoltaico attraverso la pianificazione territoriale;

- Sensibilizzare e garantire formazione e supporto tecnico;
- Prevenire il green washing con una chiara e robusta differenziazione tra sistemi AGRI-FV e FV tradizionale a terra;
- Mantenere gli agricoltori e le comunità rurali al centro della promozione Agri-FV garantendo vantaggi economici e sicurezza della proprietà;
- Aumentare la consapevolezza e l'accettazione da parte del pubblico rispetto a tutte le azioni sopra menzionate.
- Pianificare gli impianti Agri-FV tenendo conto contemporaneamente dell'energia, della resa delle colture e della biodiversità;

In Italia, i documenti che indicano la definizione e gli standard dell'agrivoltaico sono ad oggi limitati alle linee guida del Mite (2022), la prima versione della PAS CEI 82-93 (2023), la Prassi di Riferimento UNI "Sistemi agrivoltaici: integrazione di attività agricole e impianti fotovoltaici" che è in corso di elaborazione dopo essere stata in consultazione pubblica ad aprile 2023 e il documento "Sistemi agrivoltaici" del GSE in consultazione pubblica dal 5 al 21 luglio 2023. Nonostante questi documenti non forniscano ancora delle norme chiare sulla realizzazione e gestione degli impianti agrivoltaici, forniscono un quadro chiaro di come si intenda promuovere tecnologie agrivoltaiche che non solo garantiscano la continuità dell'attività agricola ma che ne garantiscano una funzione centrale per scongiurare il rischio che si realizzino impianti speculativi in cui l'attività agricola sia marginale o possa addirittura essere abbandonata.

A questo riguardo, e con l'obiettivo di garantire lo sviluppo di sistemi agrivoltaici efficaci, un importante campo di ricerca e sviluppo nel settore agrivoltaico è relativo all'ottimizzazione dei sistemi agrivoltaici per mezzo di piattaforme informatiche che permettono di simulare l'effetto di diverse combinazioni di infrastrutture agrivoltaiche e scelte agronomiche, su una serie di indicatori chiave di performance (KPI).

Nell'ambito della Facoltà di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali dell'Università Cattolica del Sacro Cuore, con sede a Piacenza, il Dipartimento di Produzioni Vegetali Sostenibili (DI.PRO.VE.S) ha una comprovata esperienza nei settori di ricerca relativi allo studio dei sistemi agrivoltaici. Il responsabile e referente per le attività del DI.PRO.VE.S in quest'ambito è Stefano Amaducci, professore ordinario di Agronomia e Coltivazioni Erbacee, coordinatore del gruppo di ricerca Field Crops Group, presidente della società Citimap Scarl e membro del comitato direttivo del CRAFT e responsabile dell'area telerilevamento. Relativamente alle attività su agrivoltaico il DI.PRO.VE.S, nella figura del Prof. Stefano Amaducci, ha organizzato a Piacenza, giugno 2022, la 3a edizione del convegno mondiale sull'agrivoltaico "Agrivoltaics2022" (<https://www.agrivoltaics-conference.org>), partecipa a comitati tecnici e networks per lo sviluppo dell'agrivoltaico in Italia (Comitato Tecnico 82 CEI "Sistemi di conversione fotovoltaica dell'energia solare", Tavolo "Sistemi agrivoltaici: integrazione di attività agricole e impianti fotovoltaici" condotto da UNI, rete Agrivoltaico Sostenibile, International Energy Agency Subtask

13.2.2 - Agrivoltaics) ed ha sviluppato una piattaforma di calcolo che permette di simulare la risposta produttiva delle colture al variare delle caratteristiche dell'impianto agrivoltaico, oltre che alle condizioni agronomiche e ambientali (Amaducci et al., 2018).

Il lavoro descritto in questa relazione è stato realizzato, utilizzando la piattaforma di calcolo sviluppata presso il DI.PRO.VE.S, per ottimizzare le principali variabili progettuali dell'impianto agrivoltaico proposto, per stimare l'impatto dell'impianto sulla produzione agricola futura dell'area su cui insisterà l'impianto.

## 2. Ottimizzazione degli impianti agrivoltaici

### 2.1. Descrizione della piattaforma di simulazione

Per simulare la radiazione e l'ombra in un sistema agrivoltaico, è stata utilizzata una piattaforma software sviluppata dall'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 GECROS (Yin and van Laar, 2005). Questa piattaforma (Figura 4) calcola la radiazione diretta e diffusa a livello del suolo permettendo di identificare se una specifica porzione di suolo è ombreggiata o riceve radiazione diretta (Figura 5). 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 e successivamente calcola 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 gli angoli vengono impostati come fissi. Questa piattaforma permette di simulare l'effetto di diverse configurazioni di impianti agrivoltaici nella radiazione presente sotto un impianto, permettendo l'ottimizzazione nella progettazione e nella gestione degli impianti agrivoltaici.

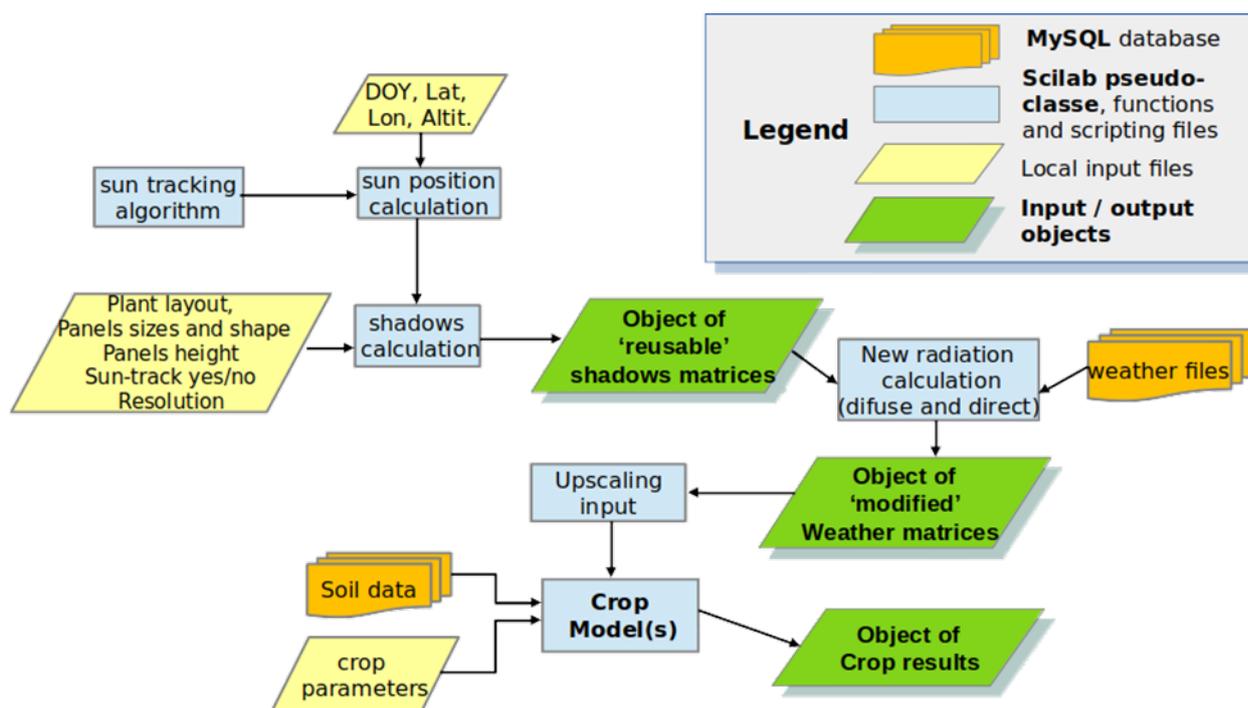
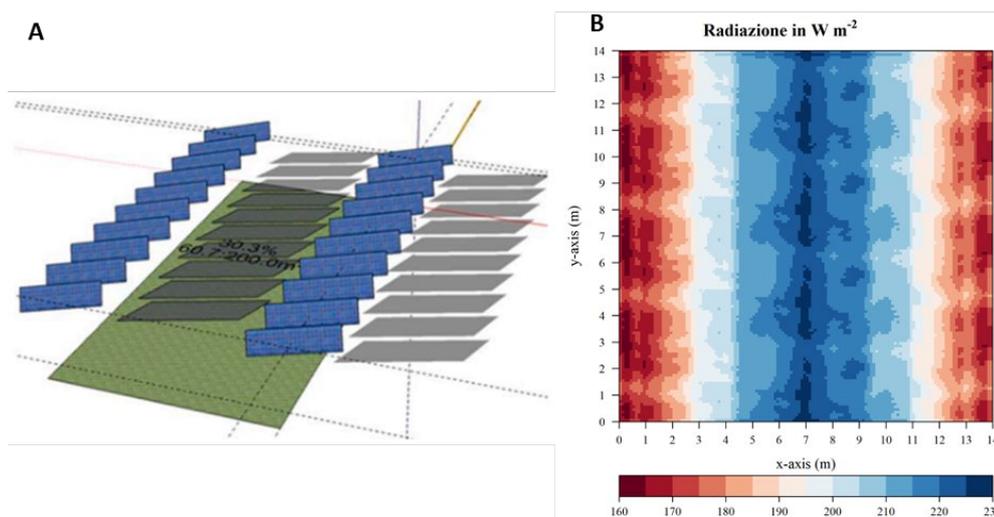


Figura 4 Diagramma della piattaforma di simulazione utilizzata nello studio e che integra algoritmi per il calcolo dell'ombreggiamento a un modello di simulazione colturale (Amaducci et al. 2018)

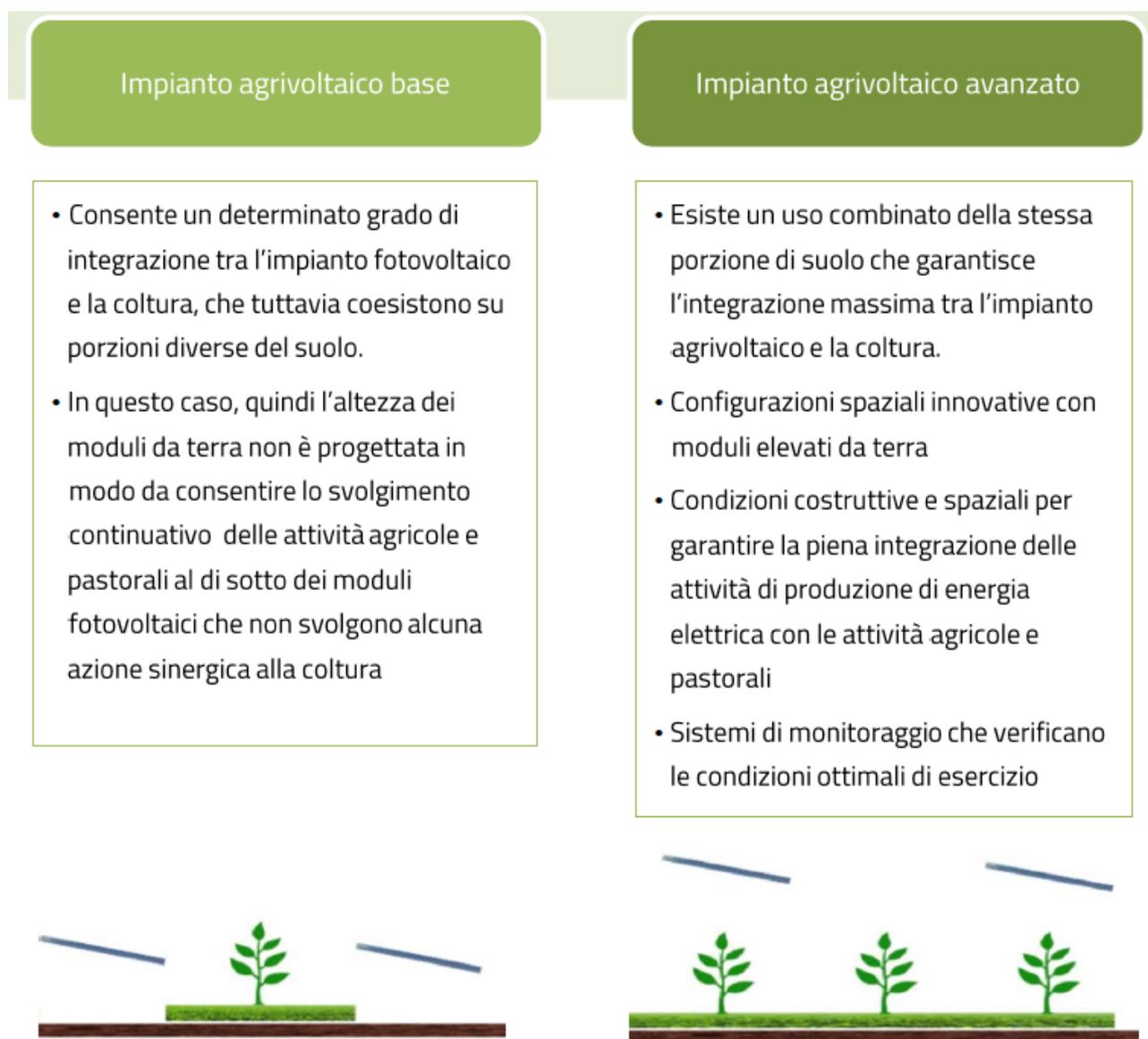


**Figura 5** Rappresentazione della porzione compresa tra due file di tracker di un sistema AV bi-assiale con proiezione delle ombre dei moduli sul suolo (A). Esempio di distribuzione della radiazione media incidente sul suolo (B).

## 2.2. Descrizione degli impianti agrivoltaici e dell'impianto fotovoltaico di riferimento

L'utilizzo della piattaforma di simulazione per la realizzazione di questo studio ha l'obiettivo di ottimizzare la progettazione e la gestione dell'impianto agrivoltaico per renderlo sostenibile e ben differenziato da impianti speculativi, scongiurando quindi il rischio di *greenwashing* (riferimento al report JRC, Chatzipanagi et al., 2023). In ricerche preliminari sono stati individuati i criteri progettuali maggiormente coinvolti nell'ottimizzazione della produzione agricola e della produzione energetica. Tra questi i più rilevanti, e di maggior impatto pratico ai fini della progettazione, sono il pitch (distanza tra i tracker) e la tipologia di impianto agrivoltaico (ad esempio monoassiale o biassiale), e la combinazione tra questi due criteri. Il pitch, che indica la distanza tra le file di pannelli fotovoltaici, determina la quantità di radiazione che raggiunge le colture sotto i pannelli fotovoltaici. Il pitch ottimale dipende da vari fattori come il tipo di coltura, la posizione geografica, l'irradiazione solare e l'inclinazione dei pannelli. La scelta di un pitch adeguato nei sistemi agrivoltaici mira a trovare un equilibrio tra la massimizzazione della produzione energetica e il mantenimento di condizioni idonee per la crescita delle colture. La determinazione del pitch ottimale nei sistemi agrivoltaici richiede una pianificazione accurata, la modellazione e il monitoraggio per garantire i migliori risultati possibili in termini di produzione di energia e resa delle colture.

In questo studio è stato ottimizzato l'impianto biassiale elevato (agrivoltaico avanzato) proposto dal committente. Questa tipologia di impianto permette la coltivazione anche sotto i pannelli fotovoltaici a differenza, ad esempio, di un impianto monoassiale (agrivoltaico base) (Figura 6) in cui la coltivazione è possibile solo nello spazio interfilare.



**Figura 6** Differenza tra impianto base ed avanzato (Sistemi agrivoltaici, consultazione sulle regole operative - GSE, 2023)

Il sistema biassiale presenta l'asse principale di rotazione degli impianti posto ad una altezza di 5 m. Nel processo di ottimizzazione, sono stati valutati 3 valori di pitch: 14 m, 16 m, e 18 m, a cui corrispondono Ground Cover Ratio (GCR) rispettivamente di 0.34, 0.30, e 0.27. Il GCR rappresenta un criterio importante e che deve essere attentamente considerato durante la progettazione e la gestione degli impianti agrivoltaici. Ad esempio, un valore di GCR più alto indica una maggiore densità di pannelli fotovoltaici per unità di suolo, il che può offrire diversi vantaggi per la crescita della coltura. È stata utilizzata una serie di dati climatici di 5 anni scaricati da Agri4Cast (<https://agri4cast.irc.ec.europa.eu/dataportal/>), per la località di interesse del committente, per mappare la radiazione solare incidente e la produzione di energia dei diversi scenari simulati.

La produzione di energia degli impianti agrivoltaici è stata simulata utilizzando il software PVSol, specializzato per la progettazione e l'analisi di impianti fotovoltaici. PVSol utilizza algoritmi avanzati per calcolare in modo accurato la produzione di energia solare in base alla disposizione dei moduli

fotovoltaici, all'orientamento, all'inclinazione e all'ombreggiamento, permettendo di confrontare e valutare i risultati delle simulazioni di diverse tipologie e configurazioni di impianti agrivoltaici.

### 2.3. Radiazione solare incidente e ombreggiamento simulati nei diversi scenari di pitch degli impianti agrivoltaici

La presenza degli impianti agrivoltaici riduce la radiazione solare incidente sulle colture, e il livello di ombreggiamento dipende principalmente dal tipo di impianto, dalla sua altezza e dall'orientamento e dall'angolazione dei pannelli solari. In condizioni di piena luce, la radiazione media in piena luce nei 5 anni valutati è stata pari a  $351.80 \pm 10.98$  ( $W m^{-2}$ ) mentre la radiazione ( $W m^{-2}$ ) e l'ombreggiamento (%) medi sotto gli impianti agrivoltaici simulati con la piattaforma sviluppata dall'Università Cattolica del Sacro Cuore sono riportati in Tabella 1. I dati riportati in Tabella 1 sono la media dei 5 anni simulati e la deviazione standard rappresenta la variabilità tra gli anni. I risultati mostrano come la radiazione aumenta e l'ombreggiamento diminuisce all'aumentare del pitch e del GCR, con un ombreggiamento medio di 8.65 % in più nel pitch 14 m rispetto al pitch di 18 m.

**Tabella 1** Media e deviazione standard della radiazione e dell'ombreggiamento nelle diverse configurazioni di pitch e di GCR.

<b>Pitch (m)</b>	<b>GCR (%)</b>	<b>Radiazione (<math>W m^{-2}</math>)</b>	<b>Ombreggiamento (%)</b>
14	34	$194.59 \pm 36.68$	$44.64 \pm 10.37$
16	30	$210.50 \pm 41.88$	$40.11 \pm 11.83$
18	27	$224.98 \pm 45.29$	$35.99 \pm 12.79$

In realtà l'ambiente agrivoltaico non è efficacemente rappresentato da valori medi di radiazione e/o ombreggiamento in quanto questi cambiano dinamicamente (durante il giorno e in funzione dell'orientamento dei pannelli) e in funzione della posizione rispetto ai pannelli stessi. Questo aspetto è visibile osservando la variazione della deviazione standard all'aumentare del pitch. La variazione della radiazione e dell'ombreggiamento tra due filari di pannelli fotovoltaici per ogni pitch viene riportata in Figura 7, Figura 8 e Figura 9. Se si considerano i primi due metri di coltivazione sotto un filare di pannelli fotovoltaici, la Figura 7 mostra una minore differenza di ombreggiamento tra i diversi pitch. Tuttavia, considerando la porzione di suolo al centro tra due filari di pannelli fotovoltaici la percentuale di ombreggiamento si differenzia maggiormente tra i pitch, con valori di 32% per il pitch 14m e 21% per il pitch a 18 m.

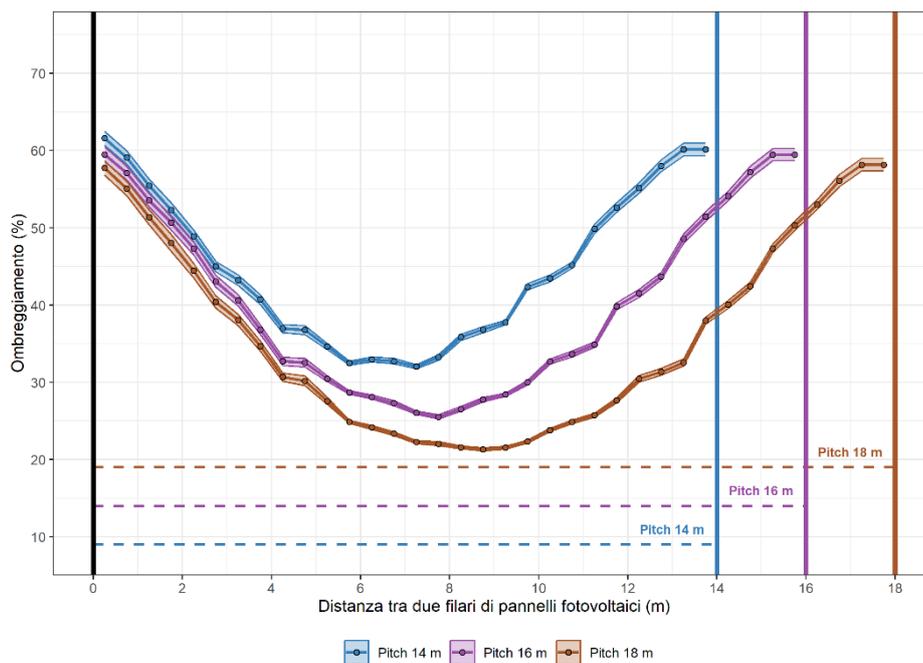


Figura 7 Variazione dell'ombreggiamento tra due filari di pannelli fotovoltaici nelle diverse configurazioni di pitch.

Radiazione media ( $W m^{-2}$ )

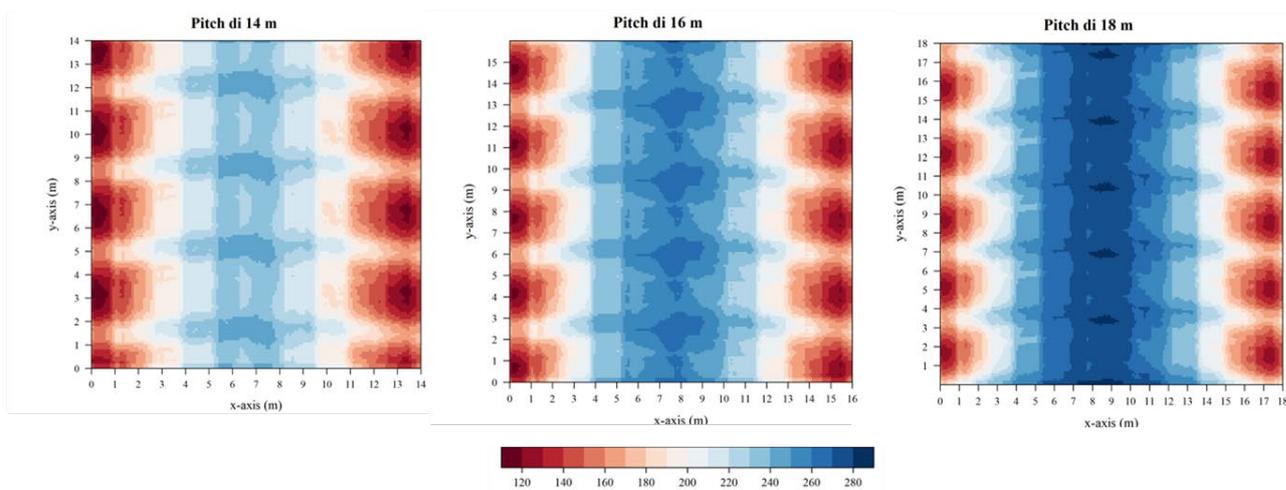
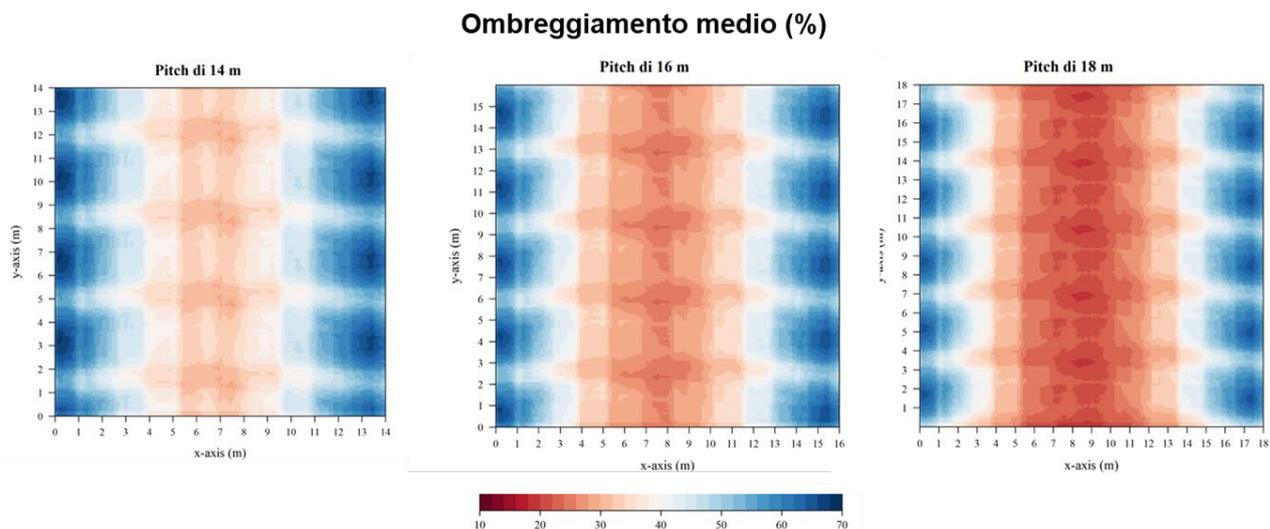


Figura 8 Mappe della radiazione media nelle diverse configurazioni di pitch.



*Figura 9 Mappe dell’ombreggiamento medio nelle diverse configurazioni di pitch.*

## 2.4. Produzione energia elettrica nei diversi scenari di pitch degli impianti agrivoltaici

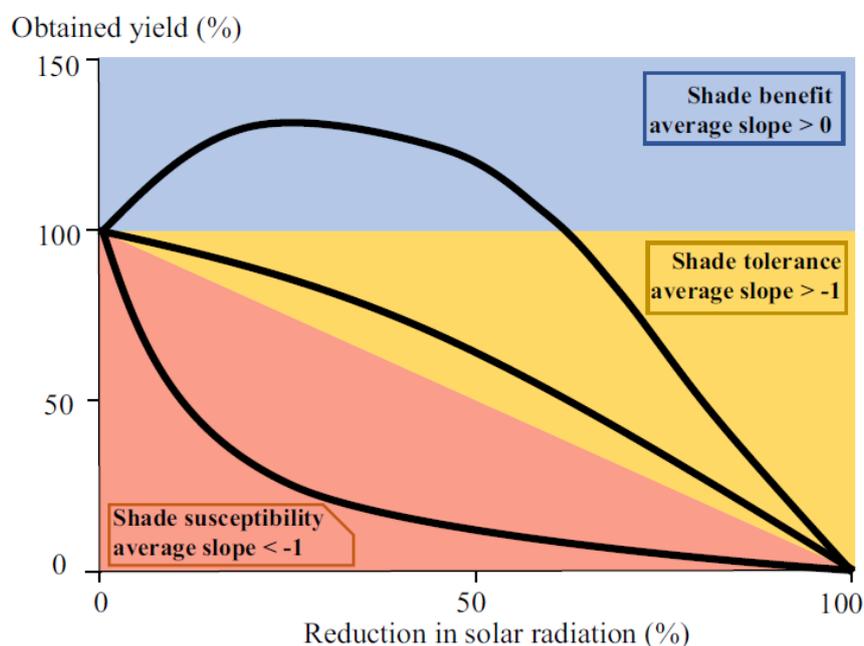
I risultati delle produzioni di energia dei diversi impianti agrivoltaici simulate tramite il software PVSol sono riportati in Tabella 4. In genere, i risultati mostrano minime differenze per la produzione energetica annuale in kWh kWp<sup>-1</sup> tra i diversi pitch, con valori compresi tra 1471.44 kWh kWp<sup>-1</sup> e 1473.91 kWh kWp<sup>-1</sup> rispettivamente per pitch tra 18 m e 14 m. Per quanto riguarda l’energia prodotta annualmente in MWh ha<sup>-1</sup>, essa risulta maggiore per pitch 14 m. Questo perché riducendo il pitch aumenta il numero di pannelli per unità di superficie, e se anche questo comporta un incremento dell’auto-ombreggiamento (e della conseguente riduzione dei kWh prodotti per kWp installati) si ottiene un massimo dell’energia prodotta per unità di superficie.

*Tabella 2 Media e deviazione standard della produzione di energia degli impianti agrivoltaici nelle diverse configurazioni di pitch e di Ground Cover Ratio – GCR.*

Pitch (m)	GCR (%)	Produzione energetica (kWh kWp <sup>-1</sup> )	Produzione energetica (MWh ha <sup>-1</sup> )
14	34	1471.44 ± 24.53	1914.07 ± 31.91
16	30	1472.89 ± 24.54	1690.56 ± 28.17
18	27	1473.91 ± 24.56	1522.55 ± 25.37

## 2.5. Produzione dell'olivo sotto gli impianti agrivoltaici

La risposta delle colture all'ombreggiamento non è generalizzabile, in quanto vi sono colture sensibili all'ombreggiamento che subiscono forti contrazioni alla resa a fronte di limitate riduzioni di radiazione mentre altre che ne beneficiano e altre ancora che hanno comportamenti intermedi. Alcuni ricercatori (Laub et al. 2022) hanno recentemente condotto una metanalisi mirata a valutare quantitativamente la risposta di diverse colture ai livelli crescenti di ombreggiamento. La loro analisi ha permesso di distinguere le colture in base alle curve di risposta produzione × livello di ombreggiamento. Le curve, realizzate confrontando le rese ottenute da colture ombreggiate rispetto a quelle in piena luce, hanno permesso di identificare le specie agrarie che, in funzione del livello di ombreggiamento, ne traggono beneficio, che lo tollerano o che ne sono suscettibili (Figura 10).



**Figura 10** Modello concettuale che mostra tre diverse risposte all'ombra delle colture: effetto positivo, tolleranza e suscettibilità. Le colture nell'area blu traggono beneficio dall'ombra anche a livelli elevati di ombreggiamento. Molte colture sono classificate nell'area di tolleranza all'ombra (zona gialla). Le colture nella zona arancione non tollerano l'ombra.

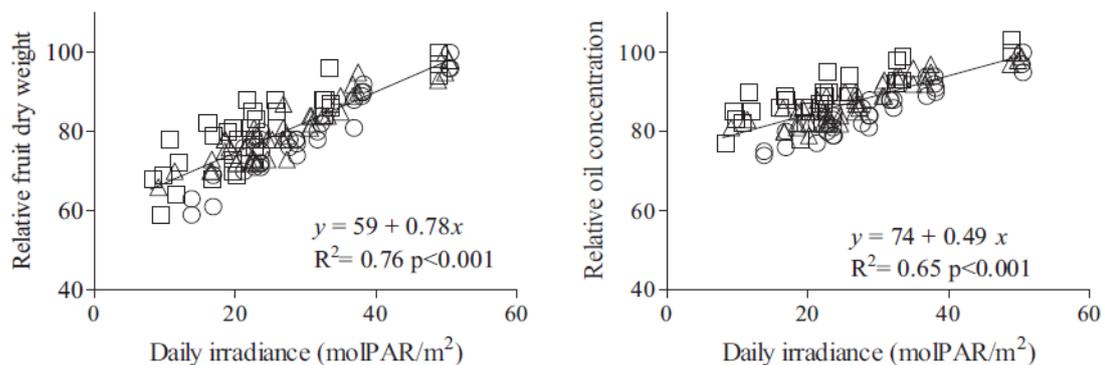
Un risultato importante di questa analisi è costituito dall'osservazione che la risposta all'ombreggiamento non è sempre lineare ed è quindi poco efficace una classificazione semplicistica (ad es. Beck et al. 2012) in cui vi sono colture che si avvantaggiano o sono sensibili indipendentemente dal livello di ombreggiamento.

Tra le colture ampiamente coltivate nel bacino Mediterraneo, l'olivo rappresenta una delle più importanti. L'olivo è una pianta eliofila che necessita di un livello radiativo compreso tra 500 e 800  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  per il raggiungimento della saturazione luminosa. L'insorgenza di fenomeni fotoinibitori è tuttavia possibile alle latitudini meridionali italiane in cui il livello medio della PAR si attesta tra i 500 e le 1000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . La fotoinibizione, insieme agli altri stress a cui può essere soggetta una coltura di olivo può riflettersi negativamente sulla produzione favorendo una più marcata alternanza produttiva tra le annate agricole contigue.

Tuttavia, una scarsa illuminazione può provocare una riduzione dell'allungamento della nuova vegetazione (da cui dipende la produttività dell'annata successiva), della quantità di gemme indotte a fiore, della percentuale di fiori allegati, della pezzatura dei frutti, del contenuto in olio e nell'aumento del fenomeno di aborto dell'ovario. Questo genere di effetti negativi è possibile anche a causa dell'auto-ombreggiamento che la chioma stessa esercita sulle parti più interne quando gli interventi di potatura non vengono eseguiti per l'ottimizzazione della penetrazione della luce. È necessario che non vi siano porzioni della chioma di ulivo che siano costantemente ombreggiate per non pregiudicare la produttività della pianta. Una buona illuminazione influisce positivamente sulla differenziazione delle gemme a fiore; infatti, nel caso in cui si verifichi una riduzione della radiazione pari a circa il 30% di quella presente all'esterno della chioma non si avrà la formazione di fiori che verranno invece formati nelle zone illuminate della chioma causando disomogeneità della distribuzione della produzione. Inoltre, frutti formati nelle zone non adeguatamente illuminate avranno un accrescimento stentato ed un ridotto processo di inolizione.

Di contro, un'eccessiva penetrazione della luce all'interno della chioma può favorire lo sviluppo di gemme a legno avventizie che daranno vita successivamente a succhioni nelle branche e polloni a livello del piede della pianta. Sotto questo aspetto un giusto equilibrio nella gestione della chioma può determinare minori costi di gestione per quanto riguarda interventi di potatura ed una maggiore produzione.

In ambito agrivoltaico, in considerazione di queste caratteristiche della pianta di ulivo, occorre favorire l'installazione di impianti agrivoltaici con pitch largo per favorire la penetrazione della luce all'interno dell'impianto congiuntamente ad una oculata gestione della chioma. Varietà contraddistinte da bassa vigoria condotte con sesto di impianto denso in una coltivazione intensiva potrebbero mostrare il miglior adattamento a questa tipologia di sistemi agricoli. Infatti, diversi studi scientifici hanno dimostrato che, in condizioni di bassi valori di PAR, la resa dell'olivo decresce in corrispondenza di elevato volume della chioma (Cherbiy-Hoffmann et al. 2012), suggerendo che è possibile trovare un equilibrio produttivo riducendo il volume della chioma in accordo con la riduzione di PAR. È stata trovata una riduzione lineare della densità delle drupe nella chioma di ulivo con il decremento della PAR incidente fino al 37%, mentre per quanto riguarda il peso secco delle drupe, la soglia entro cui il decremento si mostra lineare è fino al 60 % di riduzione della PAR incidente (Connor et al., 2009). Altre ricerche scientifiche hanno dimostrato una stretta correlazione tra la radiazione solare incidente e la produttività degli oliveti intensivi, sia in termini di peso delle drupe che di resa in olio. Un esempio di questa relazione è stato evidenziato in uno studio condotto in Spagna nel 2016 da Connor et al. sulla varietà di ulivo Arbequina, dove i ricercatori hanno osservato una relazione lineare tra la quantità di radiazione solare incidente e la resa delle olive (Figura 11).



**Figura 11** Relazione tra l'irradianza giornaliera e il peso secco della drupa (a sinistra) e la resa in olio (a destra).

In particolare, hanno osservato che una diminuzione del 50% della radiazione solare incidente ha causato una riduzione del 30% nel peso secco delle drupe e una diminuzione del 20% nella resa in olio. I risultati dello studio hanno chiaramente indicato che è importante evitare un eccessivo ombreggiamento degli oliveti, poiché questo comporterebbe una significativa riduzione della produzione.

Per quanto riguarda gli impianti super intensivi di olivo, essi sono condotti con piante di taglia ridotta disposte in filari continui. In queste tipologie di impianti la raccolta viene eseguita meccanicamente con macchine semoventi scavallartici che effettuano la raccolta in continuo (Lodolini et al., 2023). Rispetto ad impianti convenzionali dove la raccolta viene eseguita con macchine scuotitrici, portate o semoventi, queste necessitano di minor spazio per muoversi all'interno dell'impianto e ben si adattano agli impianti AV bi-assiali avanzati di altezza adeguata. Inoltre, gli impianti bi-assiali assicurano una buona distribuzione dinamica della radiazione luminosa all'interno dell'impianto assicurando che non vi siano porzioni delle chiome delle piante di ulivo esposte ad un continuo ombreggiamento così da non compromettere la produttività dell'impianto. Adottando un pitch per l'impianto agrivoltaico bi-assiale di 18 m, in riferimento alla figura 7, è possibile ottenere livelli di ombreggiamento che nelle fasce più centrali si mantengono ben al di sotto del 30% rispetto alla piena luce. Congiuntamente con la forma di allevamento a spalliera tipica degli impianti super intensivi e alla raccolta meccanica con macchina scavallatrice, questa ipotesi è quella che meglio si adatta alla coltivazione dell'olivo in sistema agricolo agrivoltaico. Con un pitch di 14 m, a causa delle fasce di sicurezza che devono essere previste per questi impianti non si riuscirebbe a sfruttare adeguatamente la superficie disponibile per la coltivazione con una contrazione della densità d'impianto. Invece adottando un sistema bi-assiale con pitch 16 m, pur non avendo una riduzione della densità di impianto si otterrebbe un ombreggiamento troppo elevato, oltre il 30%, che provocherebbe un decremento della produzione ed una maggiore disomogeneità della produzione nel corso degli anni.

## 2.6. Considerazioni conclusive

Il principale ostacolo allo sviluppo sostenibile di impianti agrivoltaici è la carenza di conoscenze tecniche, scientifiche e di strumenti informatici in grado di ottimizzare la loro progettazione e

gestione. Si teme infatti che l'agrivoltaico, che promette di integrare in modo sinergico la produzione energetica con la produzione agricola, sia invece veicolo di speculazioni e porti alla realizzazione di impianti fotovoltaici a terra in cui la coltivazione di specie agricole è relegata agli spazi interfilari.

Questo studio ha riportato l'esistenza di una relazione tra ombreggiamento e produzione dell'oliveto, ed in particolare, sebbene la produzione massima di energia elettrica sia stata ottenuta con un pitch di 14 m e con un GCR più alto rispetto agli altri scenari valutati, occorre progettare impianti agrivoltaici con pitch elevati e GCR bassi per massimizzare la produzione agricola ottenibile sotto gli impianti agrivoltaici. In base ai risultati di radiazione e ombreggiamento ottenuti dalla piattaforma di simulazione, il pitch ottimale che massimizza la produzione agricola, sia in termini di peso secco della drupa che di resa in olio, è risultato quello con pitch di 18 m. Questo diverso comportamento produttivo dell'olivo nei diversi scenari di pitch valutati è principalmente dovuto ad un diverso livello di ombreggiamento, infatti, l'impianto agrivoltaico con pitch di 18 m ha prodotto un valore medio di ombreggiamento di 35.99% rispetto a un pitch di 14 m che invece ha prodotto un ombreggiamento medio del 44,64%.

### 3. Monitoraggio dei sistemi Agrivoltaici

In questo report è stata proposta una modalità, basata su una procedura innovativa messa a punto dal team di ricerca dell'Università Cattolica del Sacro Cuore di Piacenza (UCSC), per ottimizzare la progettazione di un impianto agrivoltaico avanzato. In base alle simulazioni effettuate con la piattaforma informatica realizzata presso UCSC è emerso che l'ottimizzazione dell'impianto è ottenibile con un impianto con pitch di 18 m.

In questo paragrafo si propone la realizzazione di un sistema di monitoraggio che, in linea con le indicazioni fornite dalle linee guida del Mite, ha l'obiettivo principale di monitorare:

- l'impatto dell'installazione fotovoltaica sulle colture;
- il risparmio idrico;
- la produttività agricola per diverse tipologie di colture;
- la continuità delle attività dell'azienda agricola.
- Il recupero della fertilità del suolo;
- il microclima;
- la resilienza ai cambiamenti climatici

La condizione fondamentale perché un impianto sia considerabile come agrivoltaico è che la continuità dell'attività agricola sia mantenuto su almeno il 70% della superficie totale del sistema agrivoltaico. Questa è la principale condizione richiesta dalle linee guida del Mite (Requisito A) perché un impianto sia considerabile come agrivoltaico.

Questo progetto mira alla realizzazione di un impianto avanzato con caratteristiche sperimentali che risponde pienamente a tutti e 5 i requisiti (A-E) proposti dal Mite e per i quali è in corso una consultazione pubblica proposta dal GSE.

Il sistema di monitoraggio proposto, grazie anche al coinvolgimento diretto dei ricercatori di UCSC, non solo permetterà di monitorare i parametri sopraindicati ma sarà combinato con la

realizzazione di una serie di sperimentazioni con la finalità di ottimizzare la gestione del sistema agrivoltaico. Come indicato nei paragrafi 1 e 2 di questa relazione, il contributo di UCSC nella fase di progettazione ha permesso di individuare una configurazione dell'impianto che permettesse di ottimizzare i principali indicatori chiave di performance che sono generalmente utilizzati per valutare le performance dei sistemi agrivoltaico. Nella fase operativa UCSC contribuirà ad ottimizzare le performance dell'impianto attraverso la combinazione di scelte agronomiche adeguate con strategie di movimento dei pannelli fotovoltaici che non siano limitate alla massimizzazione della produzione energetica (full sun-tracking) ma che considerino anche le esigenze specifiche in termini di radiazione delle colture durante le diverse fasi fenologiche.

Di seguito vengono illustrate le modalità con cui UCSC effettuerà il monitoraggio per i diversi aspetti indicati sopra e in conformità con le attuali linee guida del MiTe.

### 3.1. Monitoraggio del risparmio idrico

Il risparmio idrico è uno dei principali vantaggi che l'adozione dei sistemi agrivoltaici può determinare per gli imprenditori agricoli. Tuttavia, al fine di poter quantificare questo risparmio è opportuno tenere traccia dei volumi irrigui impiegati durante il ciclo colturale. Le superfici contraddistinte da un maggior ombreggiamento medio durante l'anno necessiteranno di minori apporti irrigui per effetto della minore domanda evapotraspirativa determinata dalla minore radiazione incidente.

Il monitoraggio del risparmio idrico può essere effettuato solo tenendo traccia del consumo idrico della coltura. Per tenere traccia delle fluttuazioni dello stato idrico del suolo è necessario eseguire delle analisi del suolo per definirne la curva di ritenzione idrica e, da essa, la quantità di acqua contenuta nel terreno utilizzabile dalle colture. Tale quantità è definita come quella quantità compresa tra le due seguenti costanti idrologiche: punto di appassimento e capacità idrica di campo.

Si prevede l'installazione di sonde indicanti in tempo reale il potenziale idrico dell'acqua nel suolo (correlato con la quantità di acqua in esso contenuta) con cui è possibile monitorare le fluttuazioni dello stato idrico di un preciso volume di suolo. Inoltre, conoscendo le costanti idrologiche e la portata degli ugelli dell'impianto irriguo, è possibile determinare il tempo necessario all'impianto per ristabilire la capacità idrica di campo. In questo modo i dati relativi all'acqua consumata saranno derivabili a partire dai dati registrati e conservati nei data logger connessi alle sonde.

Il bilancio sarà evidentemente completato anche dal calcolo degli input idrici (misura delle piogge con pluviometro) e dei principali output (evapotraspirazione calcolata con equazione di Penman-Monteith grazie all'acquisizione dei dati meteorologici)

Il calcolo del risparmio idrico sarà stimato sia valutando il bilancio idrico e la produttività di due aree dell'impianto agrivoltaico caratterizzate da diversi livelli di ombreggiamento che confrontando il bilancio idrico dell'impianto con quello di una parcella che verrà realizzata appena fuori dall'impianto, e quindi non influenzata dall'ombreggiamento, gestita esattamente con le stesse modalità agronomiche utilizzate nell'agrivoltaico.

La realizzazione di una parcella di controllo, esterna all'impianto agrivoltaico, si può considerare il sistema più efficace ed affidabile per ottenere dati accurati con cui calcolare l'effetto

dell'ombreggiamento dell'agrivoltaico sui principali parametri colturali. Questo sistema è stato proposto da AFNOR per il sistema di certificazione dei sistemi avanzati in Francia (Label Project Agrivoltaique). Lo scrivente considera che la realizzazione di una parcella di controllo per la raccolta dei dati di riferimento, rappresenta il metodo più efficace per acquisire informazioni oggettive e scientifiche da utilizzare per lo studio e il successivo sviluppo di sistemi agrivoltaici ottimizzati. Grazie all'implementazione di un'area di controllo sarà inoltre possibile raccogliere i dati necessari alla validazione del processo di ottimizzazione descritto nel paragrafo 2.

### 3.2. Monitoraggio della continuità dell'attività agricola

Le linee guida indicano che per l'accesso agli incentivi chi realizza e gestisce un impianto agrivoltaico dovrebbe dimostrare di proseguire l'attività agricola sul sito di installazione nel rispetto delle Buone Pratiche Agricole (BPA). Questo requisito non solo vincola il conduttore a mantenere inalterata la destinazione agricola del proprio fondo, ma inoltre è volto a limitare i cali produttivi e i cali di redditività delle pratiche agricole aziendali attraverso lo studio dei fascicoli aziendali e della Produzione Lorda Vendibile (PLV).

L'obiettivo principale di questa attività di monitoraggio è quella di permettere al GSE di verificare che l'azienda stia gestendo l'agrivoltaico in conformità alle normative vigenti. Nella proposta che è attualmente in consultazione, il GSE propone di valutare la continuità dell'attività agricola attraverso il calcolo della media triennale della PLV relativa alla produzione agricola in agrivoltaico e di confrontarla con la PLV di riferimento, stimata in base ai dati relativi alla banca dati RICA. Come indicazione generale l'azienda che gestisce l'impianto agrivoltaico non potrà convertire il proprio indirizzo produttivo indicato al catasto, in uno meno remunerativo (generalmente contraddistinto da maggiore semplicità operativa e minori costi), mentre non viene impedito il passaggio ad indirizzi produttivi di categoria superiore. Ad esempio, un agricoltore dotato di un suolo indicato come seminativo non potrà convertirlo in pascolo, ma potrà convertirlo in frutteto. Nella corrente proposta del GSE si ritiene che la PLV calcolata per l'attività agricola dell'agrivoltaico non possa essere inferiore di oltre il 20% di quella calcolata in base al database RICA.

Il monitoraggio della continuità dell'attività agricola e pastorale verrà svolto presso le aziende indicate attraverso la stesura di una relazione tecnica annuale dove attraverso la consultazione dei fascicoli aziendali sarà possibile ottenere le informazioni necessarie per comprovare la conformità dell'attività aziendale ed il mantenimento degli incentivi concessi per l'installazione dei sistemi agrivoltaici.

Le informazioni necessarie per compiere l'attività di monitoraggio sono contenute nel fascicolo aziendale cui è incluso il piano colturale aziendale introdotto con DM 12 gennaio 2015 n. 162. L'adesione dell'impresa alla Rete di Informazione Contabile Agricola – RICA è auspicabile e può semplificare le operazioni di verifica della conformità dell'azienda.

Il sistema di monitoraggio proposto per la valutazione della continuità dell'attività agricola si fonda su:

- analisi documentale relativa al fascicolo aziendale;

- relazioni agronomiche e tecniche con particolare analisi della PLV e successiva comparazione con i dati storici e con i dati delle aziende affini nelle vicinanze;
- benchmarking degli indicatori produttivi mediante indicatori economici e tecnici provenienti dalla banca dati RICA;
- verifica in situ della documentazione ricevuta su un campione di impianti.

Lo scrivente ritiene che il sistema di monitoraggio proposto dal GSE abbia il limite di essere relativo solo ad una valutazione economica e documentale, e soprattutto il confronto con i database RICA non garantisce la disponibilità di un benchmark affidabile e rappresentativo delle specifiche caratteristiche del sito di installazione dell'impianto. Inoltre, con l'obiettivo di ottimizzare l'impianto e soprattutto di raccogliere dati utili ad un continuo sviluppo e miglioramento della tecnologia è necessario raccogliere dati puntuali sulla performance e produttività delle colture rispetto a condizioni agronomiche ben definite, come quelle presenti nella parcella di confronto che si realizzerà in questo sistema di monitoraggio.

Ovviamente il sistema di monitoraggio proposto permetterà di calcolare gli indicatori proposti dal GSE ma a questi affiancherà un sistema di monitoraggio delle rese agronomiche molto più preciso e dettagliato basato su determinazioni e rilievi in campo effettuati da UCSC.

### 3.3. Monitoraggio del recupero della fertilità del suolo

I sistemi agrivoltaici fanno parte delle tecnologie capaci di diminuire le emissioni di carbonio nell'atmosfera. Inoltre, e in particolare se i sistemi AV vengono gestiti adottando pratiche di agricoltura conservativa, il microclima che si genera al di sotto dei moduli, unito alla maggiore umidità del suolo e alla mitigazione della radiazione solare incidente, può comportare un miglioramento della fertilità del suolo con un incremento del contenuto di sostanza organica cui consegue un incremento dell'attività biotica con ripercussioni positive per l'attività agricola e la biodiversità.

Per questo principio, nel caso di suoli agricoli dismessi o poco produttivi dove un agricoltore non avrebbe convenienza a coltivare, l'impiego dei sistemi AV può contribuire a restituire tali terreni all'agricoltura incrementando la capacità produttiva alimentare ed energetica del Pese.

Il monitoraggio e la valutazione dell'incremento della fertilità dei suoli verranno eseguiti attraverso la programmazione a lungo termine di campionamenti annuali di suolo al fine di valutare nei laboratori di UCSC il contenuto di sostanza organica e azoto totale utilizzando un analizzatore elementare; attività microbica (enzimatica), e la dotazione di elementi nutritivi attraverso l'utilizzo di metodi colorimetrici.

Inoltre, verrà confrontata la produttività delle colture per unità di superficie durante i diversi anni di funzionamento dell'impianto per monitorare un eventuale incremento di resa attribuibile all'incremento di una o più delle componenti della fertilità del suolo. I dati relativi alla produzione saranno ottenuti attraverso le relazioni agronomiche di cui ai puti precedenti.

### 3.4. Monitoraggio del microclima

I moduli dei sistemi AV agiscono fisicamente modificando il microclima dell'area sottostante. Le diverse intensità di ombreggiamento, individuabili nell'area di saggio compresa tra due filari opposti

di moduli AV, generano un microclima con temperatura, umidità dell'aria, radiazione incidente e velocità del vento diverse rispetto all'ambiente esterno al sistema AV.

Il monitoraggio del microclima al di sotto dei moduli verrà eseguito attraverso:

- installazione di sensori di temperatura ambientale del tipo PT100. Verrà collocata, una sonda al di fuori dell'influenza dei moduli PV fondamentale per verificare una diversa temperatura dell'aria nell'area sottostante i moduli PV rispetto l'ambiente esterno. Verrà collocata una sonda per ogni punto interno al sistema AV (almeno 4) in cui viene individuata una omogenea riduzione della radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) (come raffigurato in figura 5). Ogni sonda sarà munita di un data logger accessibile in remoto in cui verranno raccolti e stoccati i dati relativi alle temperature medie su base oraria, giornaliera e i rispettivi picchi di massima e minima;
- Installazione di igrometri/psicrometri con registrazione oraria per monitorare l'umidità dell'aria dell'ambiente sottostante ai moduli e dell'ambiente esterno, seguendo un criterio di installazione analogo a quello delle sonde della temperatura dell'aria di cui al punto precedente;
- Installazione di anemometri per il monitoraggio della velocità dell'aria retro-modulo e dell'ambiente esterno. Il fine è di valutare l'azione frangivento dei moduli di un sistema AV.
- Installazione di sonde per il monitoraggio della temperatura del suolo poste a 5 e 10 cm di profondità. L'installazione delle sonde deve seguire il criterio dell'individuazione delle aree omogenee per riduzione di PAR (almeno 4), inoltre una sonda supplementare andrà installata al di fuori del sistema AV l'ontano l'influenza dell'impianto come sonda di controllo. I dati verranno registrati all'interno di data logger accessibili in remoto.
- Installazione di sonde per il monitoraggio della radiazione diretta e per la radiazione diffusa al di sotto dei moduli del sistema AV. Verranno installate almeno 4 sonde per ciascun parametro seguendo lo stesso criterio delle aree contraddistinte da omogenea riduzione media della PAR. Inoltre, saranno installate, una sonda per il monitoraggio della radiazione diretta ed una per il monitoraggio della radiazione diffusa, al di fuori dell'influenza del sistema AV. I dati saranno registrati a cadenza oraria in dei data logger.

I dati registrati nei data logger saranno raccolti ed elaborati dall'Università Cattolica del Sacro Cuore che gestirà il pieno monitoraggio anche degli aspetti microclimatici.

### 3.5. Monitoraggio della resilienza ai cambiamenti climatici

La mitigazione delle temperature eccessive, la riduzione dell'eccessiva radiazione, il risparmio idrico, la maggiore umidità dell'aria e l'effetto frangivento sono tutti aspetti che contribuiscono a donare alle colture poste al di sotto dei sistemi AV una certa resilienza rispetto ai cambiamenti climatici.

Il monitoraggio verrà eseguito valutando l'efficienza d'uso dell'acqua (WUE), ovvero valutando il rapporto tra la produzione agricola e la quantità di acqua utilizzata per ottenere quella produzione, e la produttività delle colture rispetto ad eventuali tesi di controllo poste lontano dall'influenza degli AV.

Alla conclusione di ogni ciclo colturale verrà redatta una relazione tecnico-agronomica dove, in riferimento all'andamento climatico, si determinerà se vi siano stati degli effetti positivi sulla produzione delle colture attribuibili agli impianti AV.

L'ipotesi di riferimento è che in annate in cui si verificano eventi atmosferici sfavorevoli (elevate temperature e/o bassa disponibilità idrica) si stima che il divario produttivo tra colture poste in un sistema AV rispetto le colture poste in piena luce sia inferiore (assumendo che le colture in piena luce abbiano normalmente una produzione superiore a quelle in agrivoltaico) fino anche a registrare vantaggi produttivi per le colture in agrivoltaico.

## 4. Monitoraggio sperimentale applicato allo studio dei sistemi agrivoltaici

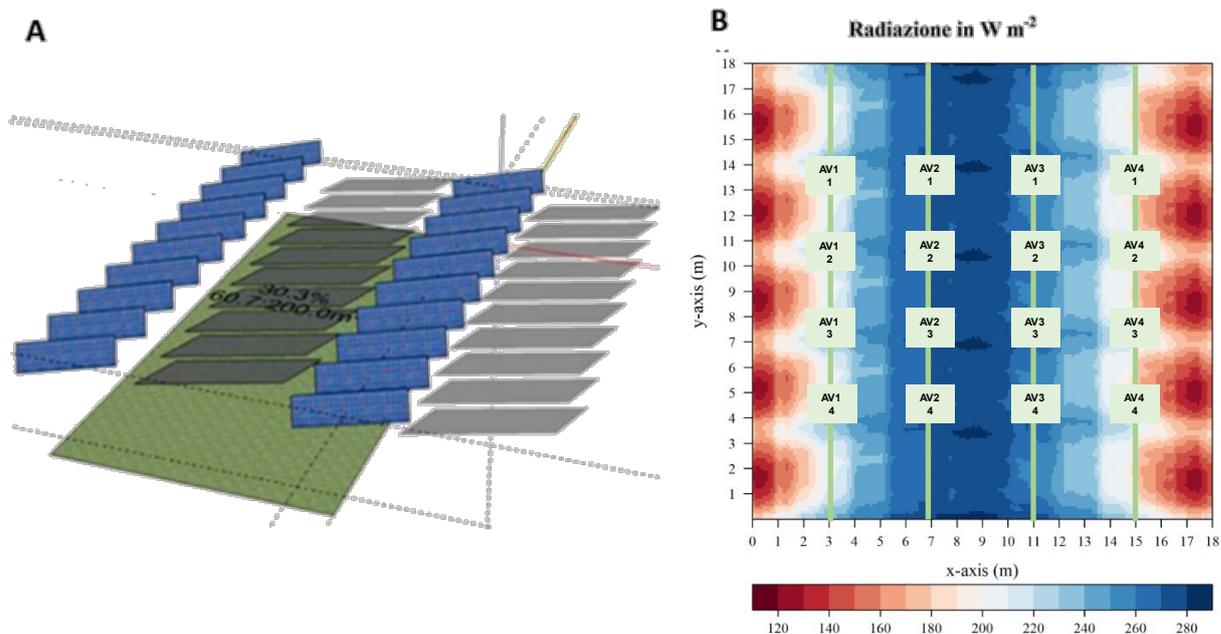
È stato dimostrato che la riduzione di radiazione fotosinteticamente attiva che si osserva all'interno di un impianto agrivoltaico è fortemente influenzata dal design del sistema agrivoltaico adottato (Zainali et al., 2023).

Si prevede di attuare un ulteriore piano di monitoraggio sperimentale delle colture condotte al di sotto del sistema AV indicato al fine di validare e prevedere gli effetti dell'ombreggiamento su una più ampia gamma di colture in condizioni di AV.

Nell'ottica di prestare servizio di consulenza e di monitoraggio presso l'impianto agrivoltaico in oggetto UCSC mette a disposizione il proprio *know how*, i propri laboratori e le attrezzature al fine di produrre idonei protocolli sperimentali e di eseguire le elaborazioni e le valutazioni dei dati ottenuti dalle sperimentazioni in campo.

### 4.1 Design Sperimentale

Indicando come area di saggio, quell'area compresa tra due filari opposti di moduli, è possibile osservare al suo interno una diversa distribuzione della radiazione che giunge al suolo spostandosi orizzontalmente rispetto ad un punto perpendicolare ad un tracker del sistema AV. Con questo approccio è possibile costituire delle parcelle sperimentali contraddistinte da una diversa distribuzione media annua della radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) (composta dalla somma della radiazione netta e della radiazione diffusa) incidente sul suolo sotto l'impianto agrivoltaico (Figura 12), in modo analogo a quanto fatto per l'installazione delle sonde nelle procedure di monitoraggio del microclima.



**Figura 12** Rappresentazione della porzione compresa tra due filari di tracker di un sistema AV bi-assiale con proiezione delle ombre dei moduli sul suolo (A). Distribuzione della radiazione media incidente sul suolo di un anno di simulazione; è possibile notare le porzioni di radiazione omogenea che discriminano le diverse parcelle sperimentali (B).

Al fine di ottenere dati statisticamente significativi, dovranno essere individuate almeno quattro aree omogenee per radiazione PAR, replicate quattro volte, in cui costituire le parcelle sperimentali. Non è essenziale che queste superfici siano dotate della medesima area.

Le **parcelle di controllo** non devono subire l’influenza del sistema AV e dunque devono essere costituite fuori dall’impianto in modo che in nessuna ora del giorno vi sia ombreggiamento causato dai moduli o dai supporti dei moduli del sistema AV.

#### 4.1. Clima e Suolo

Sarà necessario monitorare l’effettivo andamento climatico dell’areale in cui sono state costituite le parcelle al fine di eseguire un accurato controllo dello stadio fenologico delle colture e registrare eventuali fattori di stress. Durante le prove sperimentali si monitorerà:

- volume di pioggia stagionale [mm], attraverso l’installazione di una stazione meteo posta nell’immediato perimetro dell’impianto AV;
- umidità del suolo: attraverso sonde poste nel suolo a diversa profondità che eseguono monitoraggio in continuo, considerando i diversi trattamenti (ovvero i 4 livelli di radiazione individuati);
- temperatura dell’aria e temperatura del suolo: sia per poter riscontrare una differenza con la parcella di controllo non ombreggiata che per il corretto settaggio delle simulazioni;
- umidità relativa all’interno delle parcelle, disponendo le sonde come per il monitoraggio di cui al capitolo 3.4;
- radiazione globale incidente e PAR incidente sulle diverse superfici costituite (Cap. 3.4);

- tessitura del suolo: possibilmente individuando più orizzonti per i quali verranno valutati anche il contenuto di sostanza organica e di azoto seguendo le procedure riportate nel capitolo 3.3;
- Acqua disponibile per la coltura alla capacità idrica di campo, seguendo la tecnica riportata nel capitolo relativo al monitoraggio del risparmio idrico e del microclima (3.1; 3.4).

## 4.2. Analisi delle colture e campionamenti

Dopo aver costituito le parcelle sperimentali per ciascuna coltura oggetto di studio seguendo il criterio indicato precedentemente, bisognerà seguire il ciclo colturale dell'olivo attraverso rilevamenti di campo e analisi di laboratorio.

In particolare, è possibile monitorare:

- contenuto di clorofilla delle foglie: tramite **SPAD** o **CM100**;
- *Specific leaf area (SLA)*; è il rapporto tra l'area fogliare e il peso secco della foglia. In condizioni di ombreggiamento si ottengono valori di SLA più elevati. Il campionamento e la rilevazione del dato verranno eseguiti per più fasi fenologiche [ $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ];
- altezza della pianta misurata su un campione rappresentativo per ogni parcella;
- contenuto di umidità delle foglie;
- resa in olio delle diverse parcelle sperimentali;
- caratteristiche bio-chimiche dell'olio di olivo;
- peso fresco e peso secco delle drupe delle diverse parcelle sperimentali;
- *Water productivity* o *Water Use efficiency (WUE)*: indica il rapporto tra la produzione ottenuta e l'acqua utilizzata per ottenere quella produzione [ $\text{g m}^{-3}$ ].

### **Monitoraggio Dinamico del sistema agrivoltaico**

Il sistema che viene indicato dopo aver eseguito l'elaborazione e l'analisi dei dati di output ottenuti tramite le simulazioni è un sistema altamente innovativo che si presta al dinamismo di cui necessita l'agricoltura. Potendo controllare i tracker del sistema AV, sarà possibile, durante lo svolgimento delle fasi di monitoraggio, movimentare i pannelli in modo da fare giungere più o meno radiazione sulla *canopy*. In questo modo si valuterà il costo, in termini di energia non prodotta, di una maggiore radiazione incidente sulla *canopy* durante le fasi fenologiche individuate come più sensibili all'ombreggiamento.

Si monitorerà come le tare e le strutture di supporto influiscano sulle pratiche di raccolta meccanizzata e di come la scelta della disposizione dei moduli possa semplificare le procedure di raccolta.

## 5. Bibliografia

- Amaducci, S., Potenza, E., Colauzzi, M., 2022. Developments in agrivoltaics: Achieving synergies by combining plants with solar photovoltaic power systems. In *Energy-Smart Farming: Efficiency, Renewable Energy and Sustainability*; Ralph, E., Sims, H., Eds.; Burleigh Dodds Science Publishing: Cambridge, UK, pp. 231–262.
- 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>
- Beck, M., Bopp, G., Goetzberger, A., Obergfell, T., Reise, C., & Schindele, S. (2012). Combining PV and food crops to agrophotovoltaic optimization of orientation and harvest . [https://doi.org/10.4229/27thEUPVSEC2012\\_5AV.2.25](https://doi.org/10.4229/27thEUPVSEC2012_5AV.2.25)
- Blanco et al., 2023. Presentazione a Agrivoltaics2023, Korea.
- Campana, P.E., Stridh, B., Amaducci, S., Colauzzi, M., 2021. Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems. *J. Clean. Prod.* 325, 129091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129091>
- Chatzipanagi, A., Taylor, N., Thiel, C., Jaeger-Waldau, A., Dunlop, E. and Kenny, R., *Agri-photovoltaics (Agri-PV): how multi-land use can help deliver sustainable energy and food*, European Commission, 2022, JRC129225.
- Cherbiy-Hoffmann, S. U., Searles, P. S., Hall, A. J., & Rousseaux, M. C. (2012). Influence of light environment on yield determinants and components in large olive hedgerows following mechanical pruning in the subtropics of the Southern Hemisphere. *Scientia Horticulturae*, 137, 36-42.
- L'ulivo e l'olio, Coltura e cultura.
- Connor, D. J., Centeno, A., & Gómez-del-Campo, M. (2009). Yield determination in olive hedgerow orchards. II. Analysis of radiation and fruiting profiles. *Crop and Pasture Science*, 60(5), 443-452.
- Connor, D. J., Gómez-del-Campo, M., & Trentacoste, E. R. (2016). Relationships between olive yield components and simulated irradiance within hedgerows of various row orientations and spacings. In *Scientia Horticulturae* (Vol. 198, pp. 12–20). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.009>
- 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. *Renew. Energy* 36, 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Haegel, N.M., Verlinden, P., Victoria, M., Altermatt, P., Atwater, H., Barnes, T., Breyer, C., Case, C., De Wolf, S., Deline, C. and Dharmin, M., 2023. Photovoltaics at multi-terawatt scale: waiting is not an option. *Science*, 380(6640), pp.39-42.
- Laub, M., Pataczek, L., Feuerbacher, A. et al. Contrasting yield responses at varying levels of shade suggest different suitability of crops for dual land-use systems: a meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* 42, 51 (2022). <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00783-7>

Lodolini, E. M., Polverigiani, S., Giorgi, V., Famiani, F., & Neri, D. (2023). Time and type of pruning affect tree growth and yield in high-density olive orchards. *Scientia Horticulturae*, 311, 111831.

SolarPower Europe (2022): European Market Outlook for Solar Power 2022-2026

Tombesi, A., Boco, M., Pilli, M., 1999. Influence of light exposure on olive fruit growth and composition. *Acta Hortic.* 474, 255-258.

Tombesi, A., Cartechini, A., 1986. L' effetto dell' ombreggiamento della chioma sulla differenziazione delle gemme a fiore dell'olivo. *Riv. Ortoflorofrutt. It.* 70, 277-285.

Tombesi, A., Standardi, A., 1977. Effetti della illuminazione sulla fruttificazione dell' olivo. *Riv. Ortoflorofrutt. It.* 61, 368-380.

Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., Weselek, A., Högy, P., Oberfell, T., 2021. Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 140, 110694. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>

Villalobos, F.J., Testi, L., Hidalgo, J., Pastor, M., Orgaz, F., 2006. Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europea* L.) canopies. *Eur. J. Agron.* 24, 296-303.

Yin, X., van Laar, H.H., 2005. *Crop Systems Dynamics*. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands. <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-539-0>

Zainali, S., Ma Lu, S., Stridh, B., Avelin, A., Amaducci, S., Colauzzi, M., Campana, P.E., 2023. Direct and diffuse shading factors modelling for the most representative agrivoltaic system layouts. *Appl. Energy* 339, 120981. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120981>