

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN NUOVO IMPIANTO AGRIVOLTAICO
LOCALITA' CASCINA POMPOGNO
COMUNI DI BARENGO E BRIONA NELLA PROVINCIA DI NOVARA
E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RTN
DENOMINAZIONE IMPIANTO - PVA001 CAMERONA
POTENZA NOMINALE - 43.1 MW

PROGETTO DEFINITIVO - SIA

PROGETTAZIONE E SIA



HOPE engineering
ing. Fabio PACCAPELO
ing. Andrea ANGELINI
arch. Gaetano FORNARELLI
arch. Andrea GIUFFRIDA
ing. Francesca SACCAROLA

PROGETTAZIONE DEGLI IMPIANTI ELETTRICI

ing. Roberto DI MONTE

AGRONOMIA E STUDI COLUTRALI



dott. agr. Mauro CERFEDA
dott. agr. Davide CERFEDA
dott. agr. Marco MASCIADA

STUDI SPECIALISTICI E AMBIENTALI



Ambiente & Paesaggio
dott. agr. Ivo RABBOGLIATTI
dott. agr. Fabrizio BREGANNI
dott.ssa Valeria GOSMAR
dott. geol. Palo MILLEMACI

ARCHEOLOGIA

dott.ssa Elena POLETTI

COLLABORAZIONE SCIENTIFICA

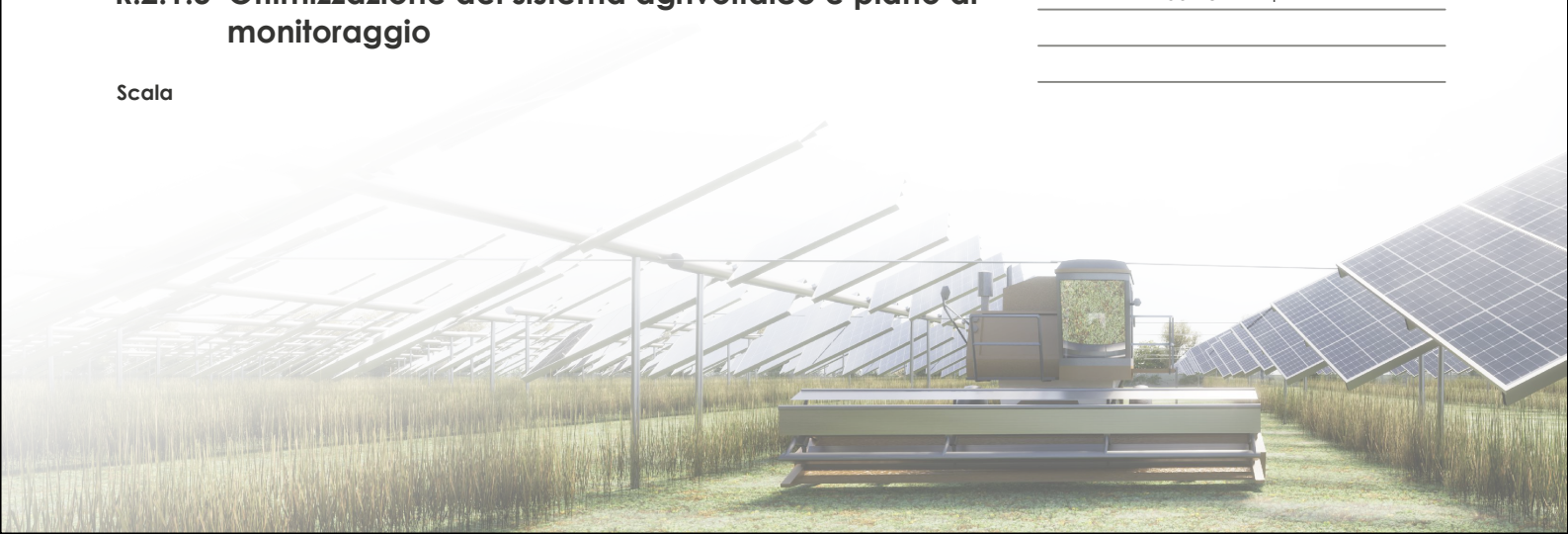
UNIVERSITÀ CATTOLICA DEL SACRO CUORE
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLE PRODUZIONI VEGETALI SOSTENIBILI
prof. Stefano AMADUCCI

PD.R.2 RELAZIONI SPECIALISTICHE

R.2.1.3 Ottimizzazione del sistema agrivoltaico e piano di monitoraggio

Scala

REV.	DATA	DESCRIZIONE
	06-23	prima emissione





UNIVERSITÀ
CATTOLICA
del Sacro Cuore

Ottimizzazione del sistema agrivoltaico e piano di monitoraggio

Responsabile scientifico:

Stefano Amaducci

Indice

1	Introduzione	1
2	Ottimizzazione degli impianti agrivoltaici	6
2.1	Descrizione della piattaforma di simulazione	6
2.2	Descrizione degli impianti agrivoltaici e dell'impianto fotovoltaico di riferimento	9
2.3	Definizione delle simulazioni degli impianti agrivoltaici	11
2.4	Risultati	14
2.4.1	Radiazione negli impianti agrivoltaici	14
2.4.2	Produzione delle colture sotto gli impianti agrivoltaici	18
2.4.3	Produzione energetica degli impianti agrivoltaici.....	22
2.4.4	Land Equivalent Ratio – LER	25
2.5	Considerazioni conclusive.....	26
3	Monitoraggio dei sistemi Agrivoltaici	28
3.1	Monitoraggio del risparmio idrico	29
3.2	Monitoraggio della continuità dell'attività agricola	30
3.3	Monitoraggio del recupero della fertilità del suolo	32
3.4	Monitoraggio del microclima	32
3.5	Monitoraggio della resilienza ai cambiamenti climatici	34

4	Framework sperimentale applicato ai sistemi agrivoltaici	34
4.1	Clima e Suolo.....	36
4.2	Analisi delle colture	36
5	Bibliografia	38

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)

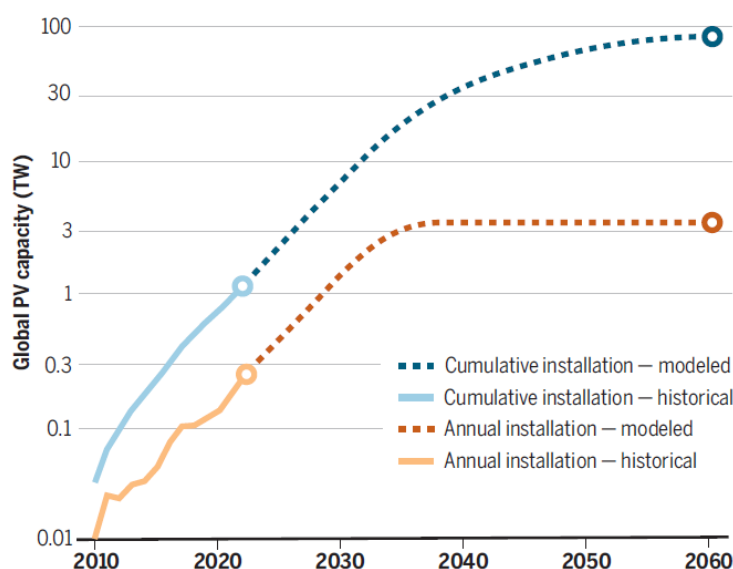


Figura 1 Dati storici (linee continue) e simulati (tratteggiati) della potenza fotovoltaica cumulata (blu) e di quella installata annualmente (arancio) a livello mondiale (Haegel et al., 2023)

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.

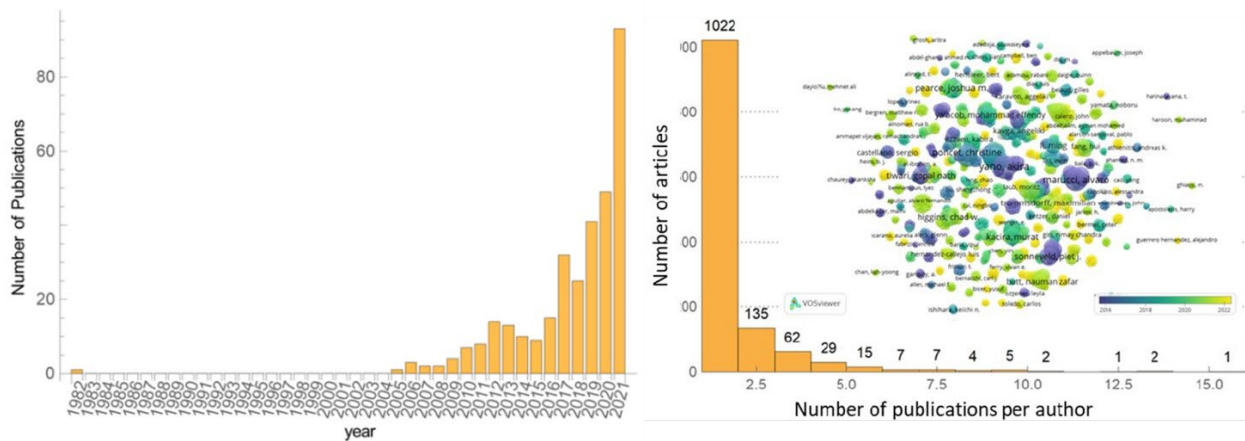


Figura 2 Incremento esponenziale delle pubblicazioni sull’agrivoltaico (Blanco et al. 2023)

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.

- Efficienza d’uso del suolo
- Efficienza nell’uso dell’acqua
- Protezione delle colture da condizioni meteo estreme
- Stabilizzazione delle rese
- Effetto sinergico delle coltivazioni su PV
- Diversificazione del reddito agrario
- Aspetti ambientali (servizi ecosistemici/elettrificazione)
- Aspetti sociali

}

Cooling

Dusting

Albedo




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'agrovoltaico 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'agrovoltaico 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'agri-fotovoltaico 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 CRAST 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 ed anche per fornire delle indicazioni su come gestire le coltivazioni agricole.

A questo scopo sono stati identificati e calcolati i principali KPI, utilizzati in letteratura per la caratterizzazione degli impianti agrivoltaici, per valutare un set di configurazioni dell'impianto proposto in confronto ad un impianto agrivoltaico base.

2. Ottimizzazione degli impianti agrivoltaici

2.1. Descrizione della piattaforma di simulazione

Per simulare la crescita e la produzione di colture coltivate all'ombra di 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. Le informazioni di radiazione diretta, diffusa e ombreggiamento simulati dal modello sotto l'impianto agrivoltaico vengono trasmesse al modello colturale GECROS che ne tiene conto per simulare la crescita della coltura. GECROS permette di stimare la produzione di biomassa e la resa delle colture in base ai fattori climatici (ad esempio radiazione, temperatura e velocità del vento) e alla quantità di acqua e azoto disponibile nel suolo. Il modello simula le risposte dei singoli processi fisiologici alle variabili ambientali, riproducendo i meccanismi che guidano le dinamiche di crescita delle colture. La combinazione di questi due modelli permette di simulare l'effetto di diverse configurazioni di impianti agrivoltaici nella produzione delle colture, permettendo l'ottimizzazione nella progettazione e nella gestione degli impianti agrovoltaici.

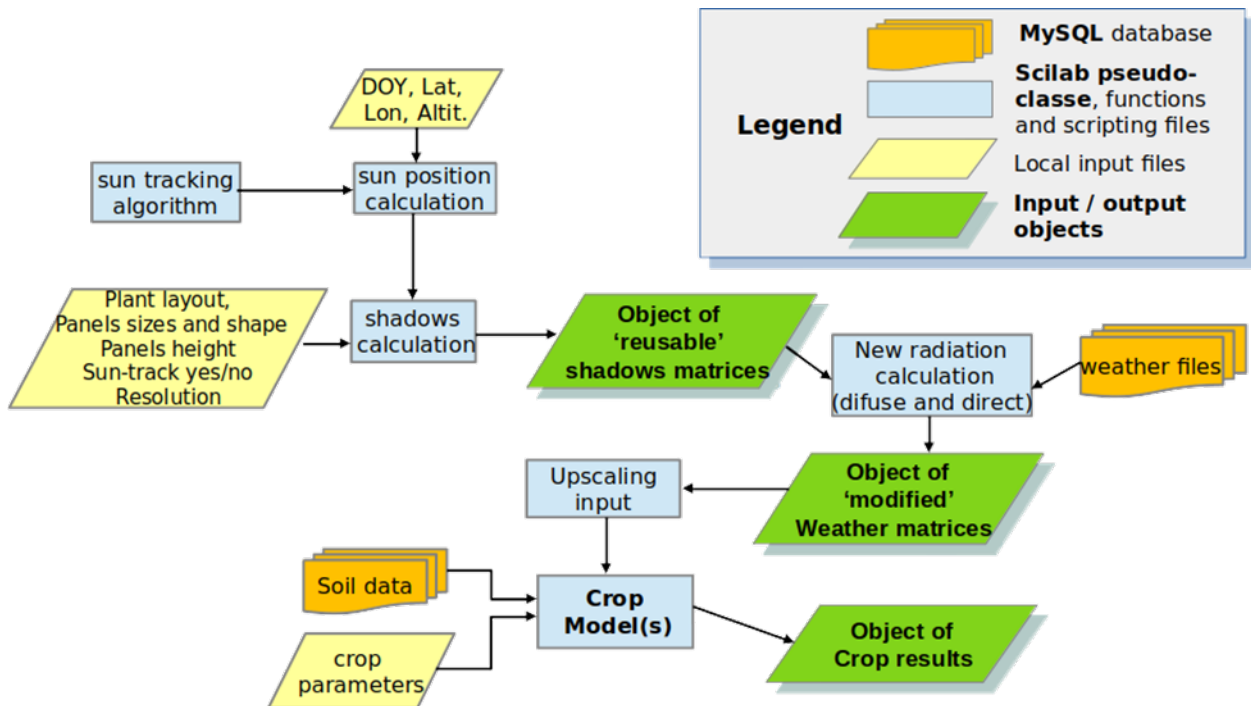


Figura 4 Diagramma della piattaforma di simulazione utilizzata nello studio e che integra algoritmi per il calcolo dell'ombreggiamento a un modello di simulazione colturale (Amaducci et al. 2018)

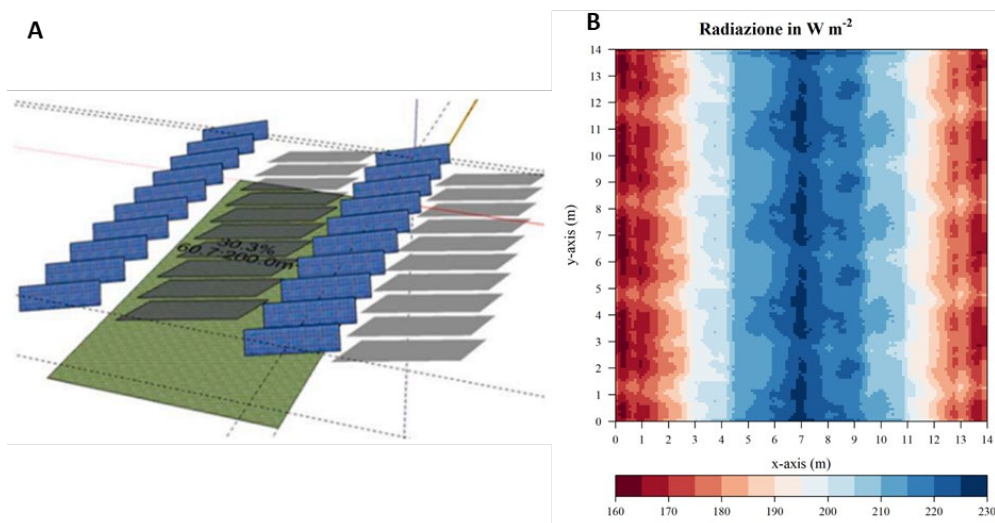


Figura 5 Rappresentazione della porzione compresa tra due filari di tracker di un sistema AV bi-assiale con proiezione delle ombre dei moduli sul suolo (A). Distribuzione della radiazione media incidente sul suolo dei 12 anni di simulazione considerati (B).

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 di ottimizzazione è stato posto a confronto l'impianto biassiale elevato (agrivoltaico avanzato) proposto dal committente, con un impianto monoassiale (agrivoltaico base) (Figura 6). Quest'ultimo rappresenta una tecnologia consolidata nel campo del fotovoltaico a terra che molte aziende stanno adattando per realizzare impianti agrivoltaici base, cioè non sopraelevati in cui la coltivazione è possibile solo nello spazio interfilare, mentre è possibile anche sotto i pannelli fotovoltaici nel caso dell'avanzato.

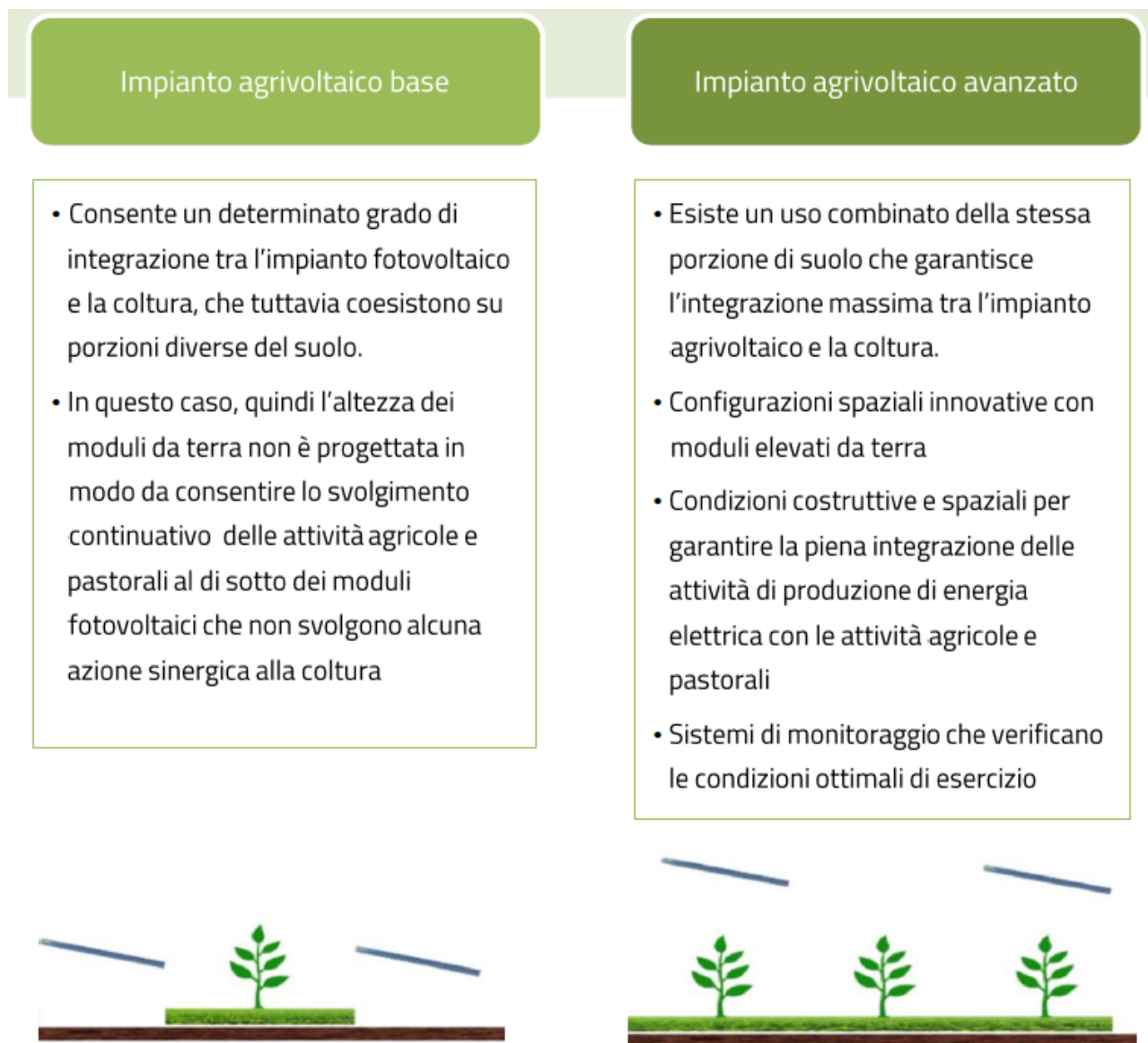


Figura 6 Differenza tra impianto base ed avanzato (Sistemi agrivoltaici, consultazione sulle regole operative - GSE, 2023)

Gli impianti sono stati orientati Nord-Sud, dotati di una vela larga 4.77 m e con moduli di una potenza di 650 W. L'asse principale di rotazione degli impianti è stato posto ad una altezza di 5.5 m nel biassiale mentre ad una altezza di 2.3 m per il monoassiale. Nel processo di ottimizzazione, per ognuna delle due tipologie di impianto sono stati valutati 3 valori di pitch: i 9 m, 11 m, e 13 m per il monoassiale e 14 m, 16 m, e 18 m per il biassiale; a cui corrispondono Ground Cover Ratio (GCR) rispettivamente di 0.53, 0.43, 0.37, 0.34, 0.30, e 0.27. Esso 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 elevato (in questo studio un GCR=0.53 per il monoassiale a pitch 9 m) indica una alta densità di pannelli fotovoltaici per unità di suolo, il che può offrire diversi svantaggi per la crescita della coltura ed anche per l'accessibilità del campo al fine di realizzare le operazioni colturali.

La producibilità energetica delle diverse soluzioni agrivoltaiche oggetto di studio è stata confrontata con quella di un impianto fisso a terra caratterizzato da pannelli monofacciali, larghezza della vela di 2 m, pitch di 3.35 m, e GCR di 0.59. 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. Definizione delle simulazioni degli impianti agrivoltaici

Per valutare l'effetto degli impianti agrivoltaici sulla produzione delle colture è stata utilizzata una serie rappresentativa di dati climatici di 12 anni, dal 2001 al 2012 scaricati da Agri4Cast (<https://agri4cast.jrc.ec.europa.eu/dataportal/>), per la località di interesse del committente. Di seguito vengono riportati i dati cumulati di precipitazione (Tabella 1) e i dati medi di temperatura dell'aria (Tabella 2).

Tabella 1 Dati di precipitazione cumulati mensilmente (mm) osservati nei 12 anni di simulazione

Mese	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Media
Gennaio	225	0	24	11	9	57	101	142	17	64	32	42	60
Febbraio	66	0	1	44	201	98	18	43	32	157	147	9	68
Marzo	35	0	1	9	7	42	137	72	80	101	0	72	46
Aprile	0	31	42	93	0	204	11	198	235	126	17	184	95
Maggio	47	307	25	70	31	129	47	267	9	376	1	123	119
Giugno	2	25	79	16	5	64	127	196	84	80	56	112	71
Luglio	5	110	155	38	44	89	15	92	13	89	75	42	64

Agosto	0	23	14	70	126	227	262	110	61	180	16	30	93
Settembre	0	32	25	56	104	499	222	62	160	167	66	58	121
Ottobre	29	23	43	6	158	31	105	90	43	260	39	68	75
Novembre	3	436	188	140	47	94	97	266	170	305	207	233	182
Dicembre	0	53	49	4	69	274	15	205	94	186	0	29	82
Totale	412	1040	646	557	801	1808	1157	1743	998	2091	656	1002	1076

Tabella 2 Dati di temperatura media mensile (°C) osservati nei 12 anni di simulazione.

Mese	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Media
Gennaio	1.9	-1.2	1.2	0.9	0.7	-1.7	3.0	4.5	-1.0	0.2	1.0	1.0	0.9
Febbraio	4.2	4.2	-0.1	2.5	1.4	1.0	4.2	5.6	2.0	2.7	4.1	-0.6	2.6
Marzo	8.9	9.1	7.4	6.0	7.4	5.6	7.9	9.3	6.7	7.0	8.1	10.4	7.8
Aprile	10.9	12.1	12.0	11.8	11.9	11.8	15.0	12.7	12.4	12.4	15.5	11.8	12.5
Maggio	18.8	16.8	19.8	15.4	17.5	16.7	18.2	18.3	18.7	16.2	19.3	17.3	17.8
Giugno	21.3	23.0	26.2	22.0	22.7	21.2	21.6	22.6	22.2	21.9	21.3	23.0	22.4
Luglio	24.1	22.8	25.4	23.6	23.9	25.6	23.7	24.5	24.2	25.8	22.5	24.9	24.3
Agosto	24.8	22.0	26.6	23.1	21.2	20.6	21.6	24.4	25.3	22.1	24.7	25.4	23.5
Settembre	16.2	17.5	18.3	18.0	18.4	19.7	16.9	18.7	20.0	17.2	21.3	19.0	18.4
Ottobre	15.5	12.4	11.0	12.3	12.4	14.2	11.8	14.9	12.4	10.0	12.7	13.2	12.7
Novembre	5.6	8.8	7.4	6.7	5.6	8.3	5.0	7.8	7.6	5.7	6.2	8.1	6.9
Dicembre	-0.6	4.2	2.6	3.4	-0.8	3.2	2.2	3.1	0.5	0.1	2.7	0.5	1.8
Media	12.6	12.6	13.2	12.1	11.9	12.2	12.6	13.9	12.6	11.8	13.3	12.8	12.6

Le colture simulate sono quelle proposte dal committente per il sistema agrivoltaico, in alternativa alla coltivazione di riso ed in particolare frumento, soia e sorgo. Considerando che il progetto agrivoltaico nasce anche dalla necessità di trovare alternative sostenibili alla coltivazione del riso, che è diventata sempre più difficile a causa della scarsità idrica degli ultimi anni, le simulazioni sono state realizzate considerando di non effettuare nessuna irrigazione, limitando la produzione alla disponibilità idrica naturale e ad un unico intervento

di soccorso nel caso della coltura di sorgo. Al fine di determinare il calo (o l'incremento) produttivo delle colture realizzate in ambiente agrivoltaico è stata necessario simulare anche la produzione delle colture in condizioni di piena luce ovvero quella raggiunta senza l'impianto agrivoltaico. Un aspetto fondamentale per l'ottimizzazione dei diversi sistemi agrivoltaici è costituito dall'individuazione di indicatori chiave di processo (KPI) che permettano di valutare complessivamente la produttività degli impianti agrivoltaici, sia in termini di resa agricola che energetica. Sono stati utilizzati cinque KPI che riassumono in maniera esaustiva sia la componente fotovoltaica sia la componente agricola dell'impianto agrivoltaico. Nello specifico, i KPI sono i seguenti:

- i) la produzione di granella ($t\ ha^{-1}$),
- ii) la diminuzione della produzione di granella in agrivoltaico rispetto alla produzione di granella in piena luce,
- iii) la produzione energetica annuale sia in $kWh\ kWp^{-1}$ che in $MWh\ ha^{-1}$,
- iv) la produzione energetica in agrivoltaico rispetto alla produzione energetica del sistema fotovoltaico di riferimento, e
- v) il Land Equivalent Ratio (LER).

Il LER è un indicatore sviluppato in ecologia e poi utilizzato in agro-ecologia per valutare l'efficienza delle consociazioni rispetto alle monoculture; infatti, in analogia con le consociazioni ed in particolare con i sistemi agroforestali, i sistemi agrivoltaici permettono di ottenere un incremento significativo dell'efficienza d'uso del suolo rispetto alla realizzazione di monoculture e impianti fotovoltaici a terra tenuti separati (Amaducci et al., 2018; Campana et al., 2021; Dupraz et al., 2011; Trommsdorff et al., 2021). Il LER è stato calcolato sommando il rapporto tra la produzione di granella in agrivoltaico e la produzione di granella in piena luce e il rapporto tra la produzione energetica in agrivoltaico e la produzione energetica del sistema fotovoltaico di riferimento.

$$LER = \frac{\text{produzione granella in agrivoltaico}}{\text{produzione granella in piena luce}} + \frac{\text{produzione energetica in agrivoltaico}}{\text{produzione energetica sistema fotovoltaico}}$$

Le simulazioni sono state effettuate considerando tutta l'area dell'impianto agrivoltaico, le rese delle colture sono state successivamente decurtate della resa relativa alle aree

prossime alle strutture di sostegno. La dimensione di questa area dipende dalle caratteristiche dell'impianto, in particolare è stata considerata una tara di 0.5 m per il biassiale e una tara di 1.5 m per il monoassiale.

2.4. Risultati

2.4.1. Radiazione negli 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 12 anni valutati è stata pari a 309 ± 19.10 (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 3. In generale, i risultati mostrano valori di radiazione più alti nell'impianto biassiale rispetto all'impianto monoassiale. In entrambi gli impianti la radiazione è aumentata, e l'ombreggiamento è diminuito, all'aumentare del pitch. Il maggior ombreggiamento generato dall'impianto monoassiale è una conseguenza sia della minor altezza da terra dei pannelli ma soprattutto dal fatto che l'impianto monoassiale è stato simulato utilizzando GCR più alti rispetto a quello biassiale. Questa scelta è motivata dalla nostra intenzione di simulare impianti agrivoltaici rappresentativi delle soluzioni proposte dagli operatori del settore.

Tabella 3 Media e deviazione standard della radiazione e dell'ombreggiamento sotto i due impianti agrivoltaici nelle diverse configurazioni di pitch e di GCR.

Impianto agrivoltaico	Pitch (m)	GCR (%)	Radiazione (W m^{-2})	Ombreggiamento (%)
Biassiale	14	34	186.12 ± 22.72	39.28 ± 6.79
Biassiale	16	30	196.66 ± 24.08	36.52 ± 6.99
Biassiale	18	27	207.40 ± 25.26	33.24 ± 7.44
Monoassiale	9	53	145.20 ± 41.49	53.11 ± 13.28
Monoassiale	11	43	165.60 ± 48.66	46.51 ± 15.65

Monoassiale	13	37	182.00 ± 54.07	41.20 ± 17.43
-------------	----	----	----------------	---------------

I dati riportati in Tabella 3 sono la media dei 12 anni simulati e la deviazione standard rappresenta la variabilità tra gli anni. 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 sia all'aumentare del pitch ma soprattutto tra le due tipologie di impianti agrivoltaici. In particolare, la deviazione standard sia della radiazione che dell'ombreggiamento risulta inferiore nel biassiale rispetto al monoassiale. La variazione della radiazione e dell'ombreggiamento tra due filari di pannelli fotovoltaici per ogni impianto agrivoltaico e 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 come, indipendente dal pitch, il sistema biassiale presenta un ombreggiamento medio più basso (45%) rispetto sistema monoassiale (68%). Tuttavia, considerando la porzione di suolo al centro tra due filari di pannelli fotovoltaici la percentuale di ombreggiamento varia in relazione al pitch e al sistema agrivoltaico. Nello specifico, il monoassiale a pitch 13 m presenta i valori di ombreggiamento più bassi (23%) mentre a pitch 9 m i valori più alti (37%). Mentre, il biassiale presenta valori di ombreggiamento compresi tra 24% a pitch 18 m e 30% a pitch 14 m.

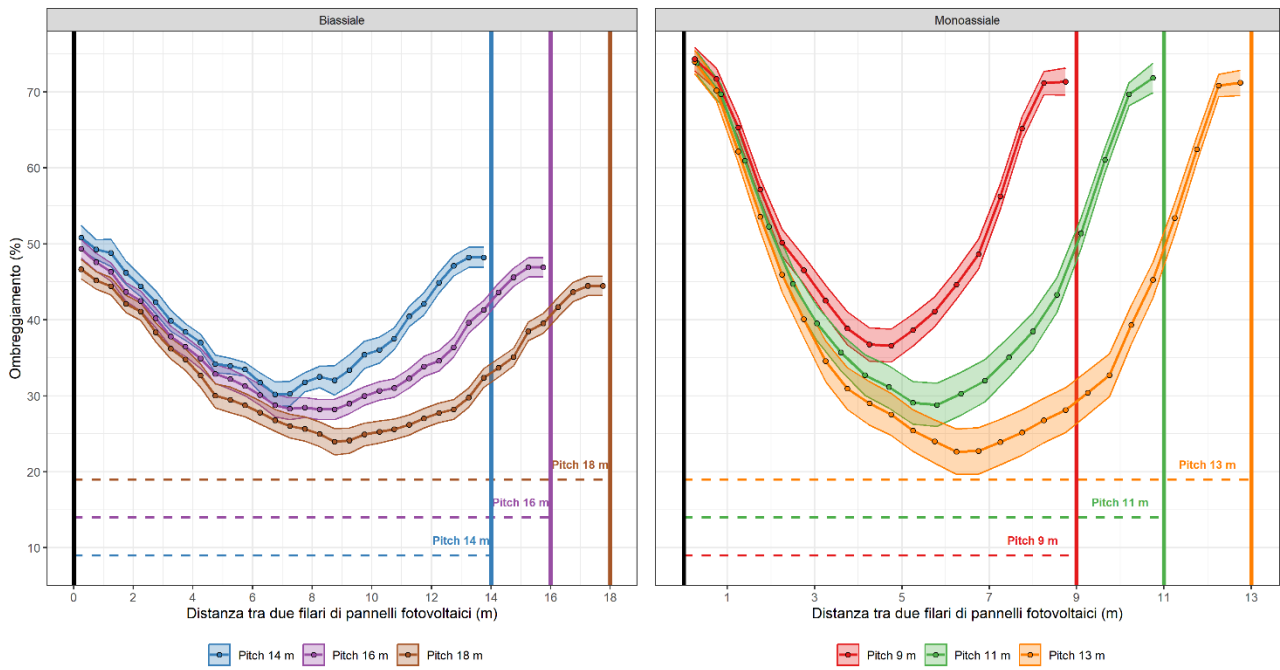


Figura 7 Variazione dell'ombreggiamento tra due filari di pannelli fotovoltaici nei due impianti agrivoltaici nelle diverse configurazioni di pitch.

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

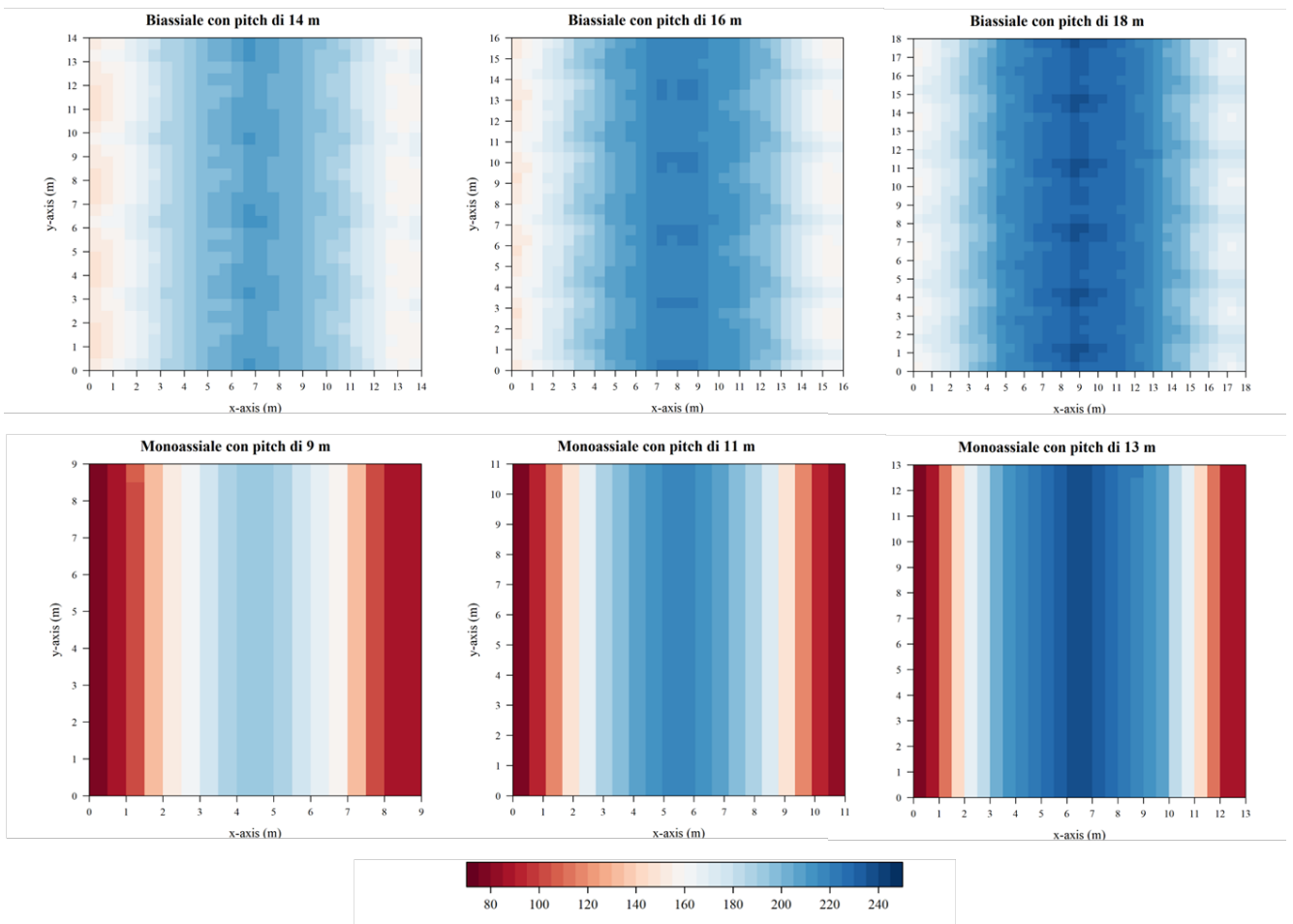


Figura 8 Mappe della radiazione media sotto i due impianti agrivoltaici nelle diverse configurazioni di pitch.

Ombreggiamento medio (%)

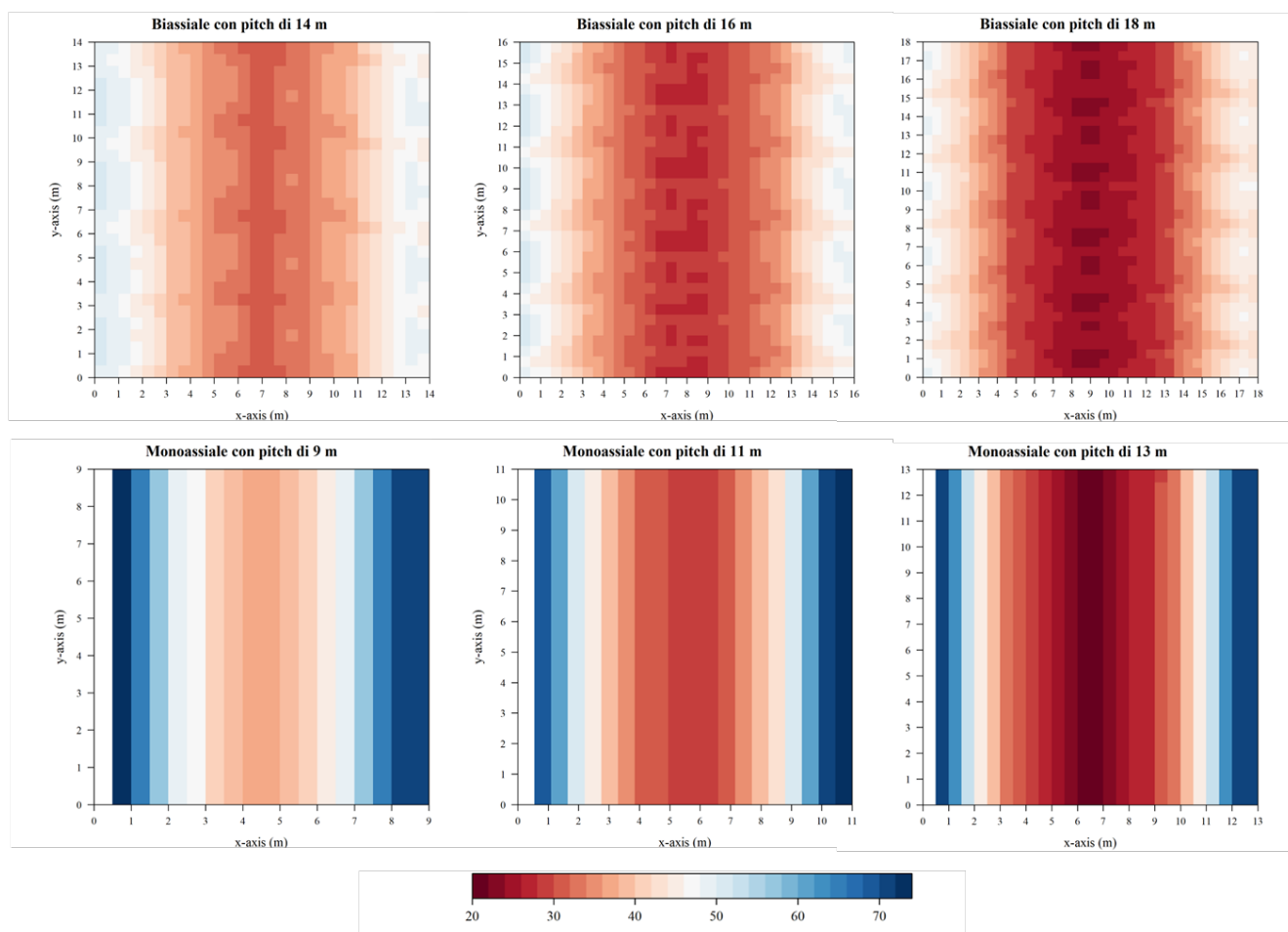


Figura 9 Mappe dell'ombreggiamento medio sotto i due impianti agrivoltaici nelle diverse configurazioni di pitch.

2.4.2. Produzione delle colture sotto gli impianti agrivoltaici

La variazione di ombreggiamento sotto gli impianti agrivoltaici influenza direttamente la crescita e la produzione delle colture. In particolare, in Figura 10 vengono riportati i risultati della piattaforma di simulazione in modo da valutare l'effetto dell'ombreggiamento sulla resa in granella del frumento, della soia e del sorgo. Il grafico mostra un aumento lineare della resa al diminuire dell'ombreggiamento, sia per frumento, soia e sorgo. Le produzioni maggiori per frumento e soia si sono ottenute in condizioni di piena luce (ombreggiamento = 0%) mentre per il sorgo la maggiore produzione è stata ottenuta con valori di

ombreggiamento intorno al 25%, quindi, per il sorgo, ombreggiamenti moderati permette di massimizzare la resa in granella.

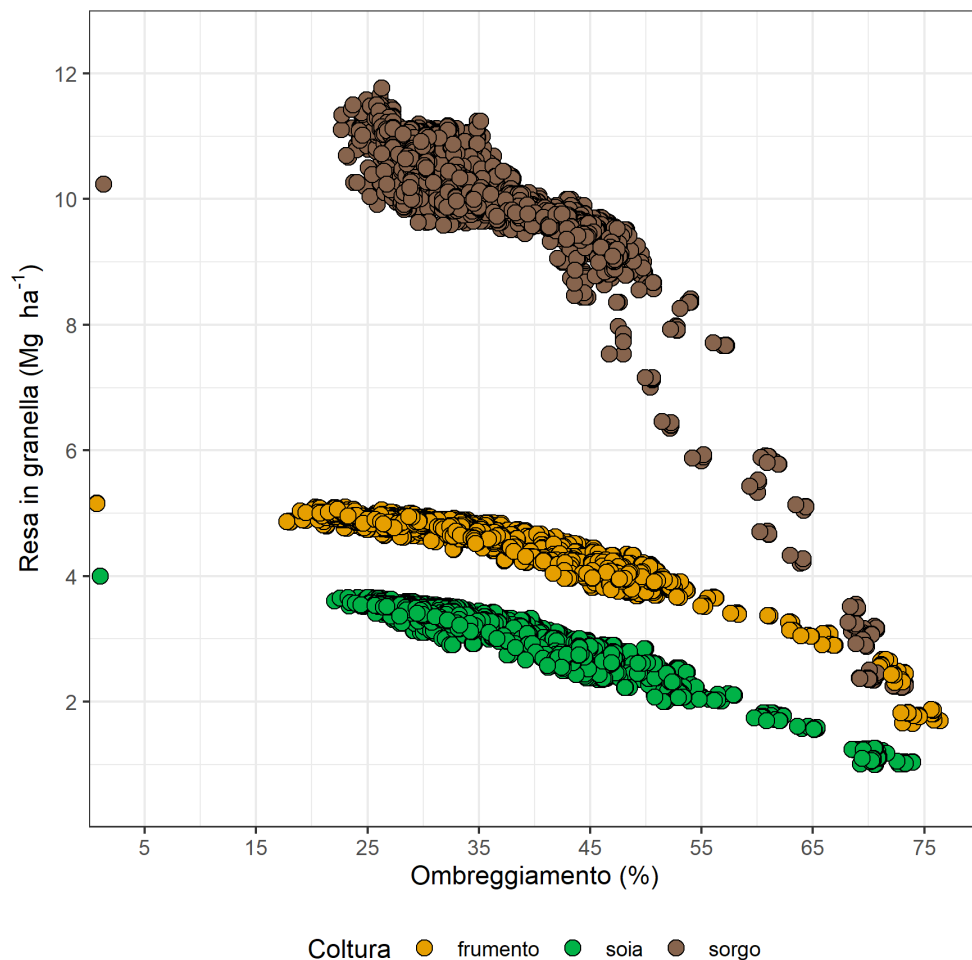


Figura 10 Effetto dell'ombreggiamento sulla resa in granella di frumento, soia e sorgo in 12 anni di simulazione.

La Figura 11 riporta l'effetto del GCR sulla resa in granella, media di 12 anni, delle colture. A valori bassi di GCR, ovvero quando i pitch sono alti e c'è una minore superficie di pannelli fotovoltaici a parità di superficie di suolo, la resa in granella simulata dalla piattaforma risulta più alta, per tutte le colture simulate. Risultati simili sono riportati in Figura 12, dove vengono illustrati i valori medi e la deviazione standard della resa in granella per i 12 anni di simulazione, sia in condizioni di piena luce che nei due impianti agrivoltaici nelle diverse configurazioni di pitch. Oltre ad un aumento della resa all'aumentare del pitch, già osservato in Figura 11, la Figura 12 mostra una diminuzione generale della deviazione standard in

agrivoltaico rispetto a condizioni di piena luce. Questa diminuzione è stata già osservata in altri studi scientifici (Amaducci et al. 2018), e dimostra come le rese delle colture coltivate sotto gli impianti agrivoltaici siano più stabili e meno suscettibili alla variabilità climatica.

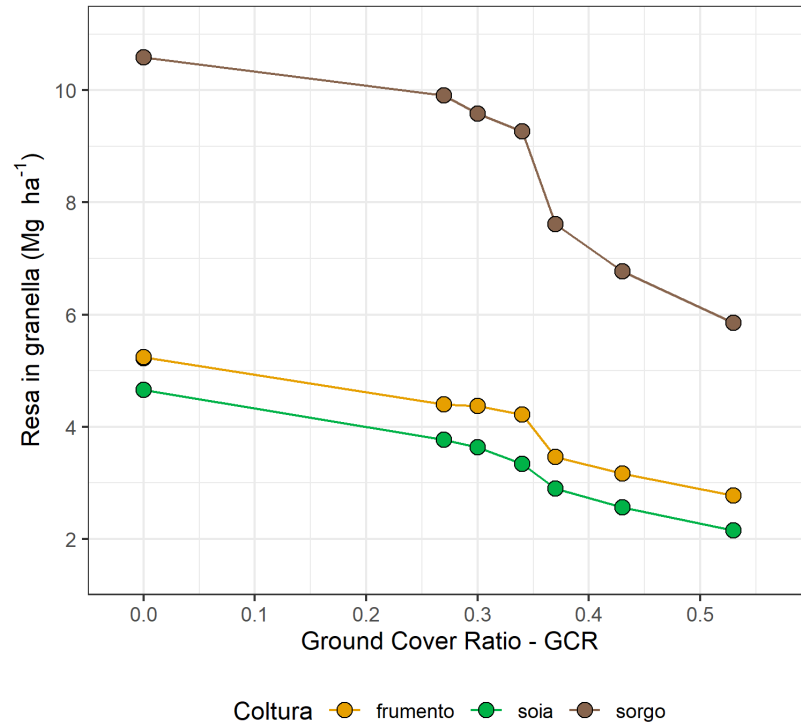


Figura 11 Resa in granella media di 12 anni di simulazione in relazione al Ground Cover Ratio (GCR) dell'impianto agrivoltaico.

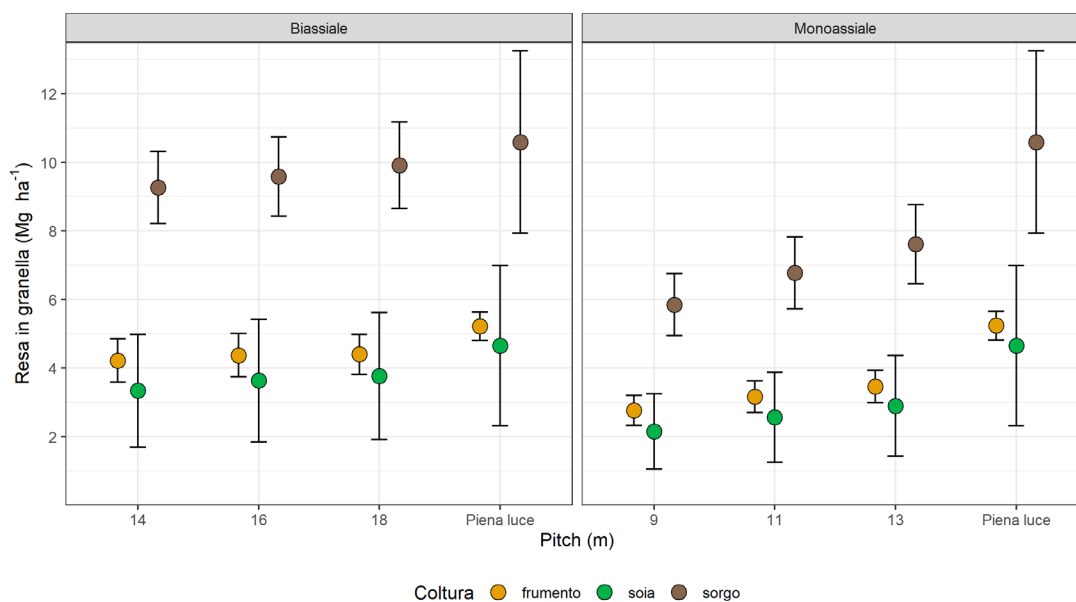


Figura 12 Media e deviazione standard della resa in granella in piena luce e nei due impianti agrivoltaici nelle diverse configurazioni di pitch.

Il calo produttivo delle colture coltivate sotto l’agrivoltaico è stato calcolato, utilizzando come riferimento la resa prodotta in condizioni di piena luce, per identificare tra i sistemi agrivoltaici ed i pitch valutati quelli più adatti da utilizzare per ottimizzare e massimizzare la crescita e la produzione delle colture (Figura 13). Nonostante le linee guida del Mite non facciano riferimento esplicito ad un limite massimo di riduzione della resa in agrivoltaico, in conformità con le indicazioni riportate dalla prassi di riferimento UNI (in corso di pubblicazione) e delle normative internazionali riportate nel report del JRC (Chatzipanagi et al., 2023) abbiamo scelto di utilizzare una soglia di calo produttivo del 30% per selezionare gli impianti agrivoltaici. I risultati mostrano che gli impianti monoassiali presentano cali produttivi mediamente superiori al 30%, ad eccezione del sorgo a pitch 13m. Mentre i cali produttivi medi delle colture per gli impianti biassiali risultano sempre inferiori al 30%. Tuttavia, nel caso della soia coltivata sotto ad un impianto con pitch 14 m, in alcuni anni sono stati raggiunti cali produttivi superiori al 35%.

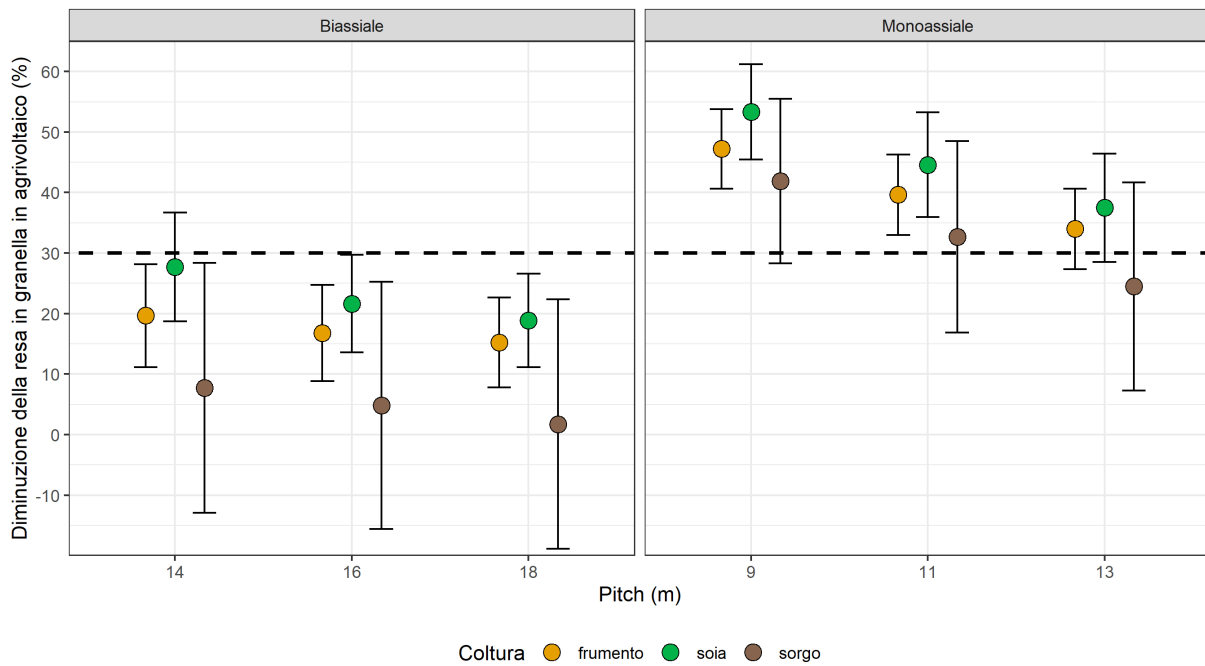


Figura 13 Media e deviazione standard della diminuzione di produzione di granella nei due impianti agrivoltaici nelle diverse configurazioni di pitch, calcolata considerando la produzione di granella in condizioni di piena luce. La linea tratteggiata nera rappresenta un calo della resa in granella del 30%.

2.4.3. Produzione energetica degli impianti agrivoltaici

La produzione di energia dei diversi impianti agrivoltaici è stata simulata tramite il software PVSol. In genere, i risultati delle simulazioni, riportati in Tabella 4, evidenziano che gli impianti biassiali hanno raggiunto produzioni energetiche in kWh kWp⁻¹ superiori rispetto agli impianti monoassiali. In particolare, i risultati mostrano minime differenze per la produzione energetica annuale in kWh kWp⁻¹ per il biassiale, con valori compresi tra 1982.62 kWh kWp⁻¹ e 1984.32 kWh kWp⁻¹ rispettivamente per pitch tra 18 m e 14 m. Simili risultati sono stati raggiunti anche dal monoassiale (Tabella 4). Per quanto riguarda l'energia prodotta annualmente in MWh ha⁻¹, essa risulta maggiore per l'impianto monoassiale a pitch 9 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. In generale, in una certa quantità di terreno (un ettaro in questo caso), un pitch più basso produce più energia indipendentemente dal tipo di tecnologia della

struttura fotovoltaica, ma a parità di pitch (o con poca differenza tra i pitch), il tipo di tecnologia della struttura fotovoltaica risulta determinante per massimizzare la produzione di energia. Infatti, a parità di pitch (una piccola differenza tra il pitch 13 m del monoassiale e del pitch 14 m del biassiale), si può notare che la quantità di energia prodotta in MWh ha⁻¹ per biassiale a pitch di 14 m è superiore rispetto al monoassiale a pitch di 13 m a causa della maggior efficienza della tecnologia biassiale nell'intercettare la radiazione solare incidente.

Tabella 4 Media e deviazione standard della produzione di energia dei due impianti agrivoltaici nelle diverse configurazioni di pitch e di Ground Cover Ratio – GCR.

Impianto agrivoltaico	Pitch (m)	GCR (%)	Produzione energetica (kWh kWp ⁻¹)	Produzione energetica (MWh ha ⁻¹)
Biassiale	14	34	1982.62 ± 98.90	1411.63 ± 70.41
Biassiale	16	30	1983.62 ± 98.87	1235.80 ± 61.60
Biassiale	18	27	1984.32 ± 98.86	1099.31 ± 54.77
Monoassiale	9	53	1782.15 ± 91.96	1974.62 ± 101.89
Monoassiale	11	43	1785.16 ± 92.00	1619.14 ± 83.45
Monoassiale	13	37	1787.08 ± 92.03	1370.70 ± 70.59

Per quanto riguarda il Ground Cover Ratio (GCR), sia la Tabella 4 che la Figura 14 mostrano la variazione di energia prodotta in MWh ha⁻¹ al variare del GCR degli impianti agrivoltaici. I dati riportati mostrano un chiaro aumento della produzione di energia in MWh ha⁻¹ all'aumentare del GCR mentre per la produzione di energia in kWh kWp⁻¹ non viene influenzata dal GCR ma solo dal tipo di impianto agrivoltaico.

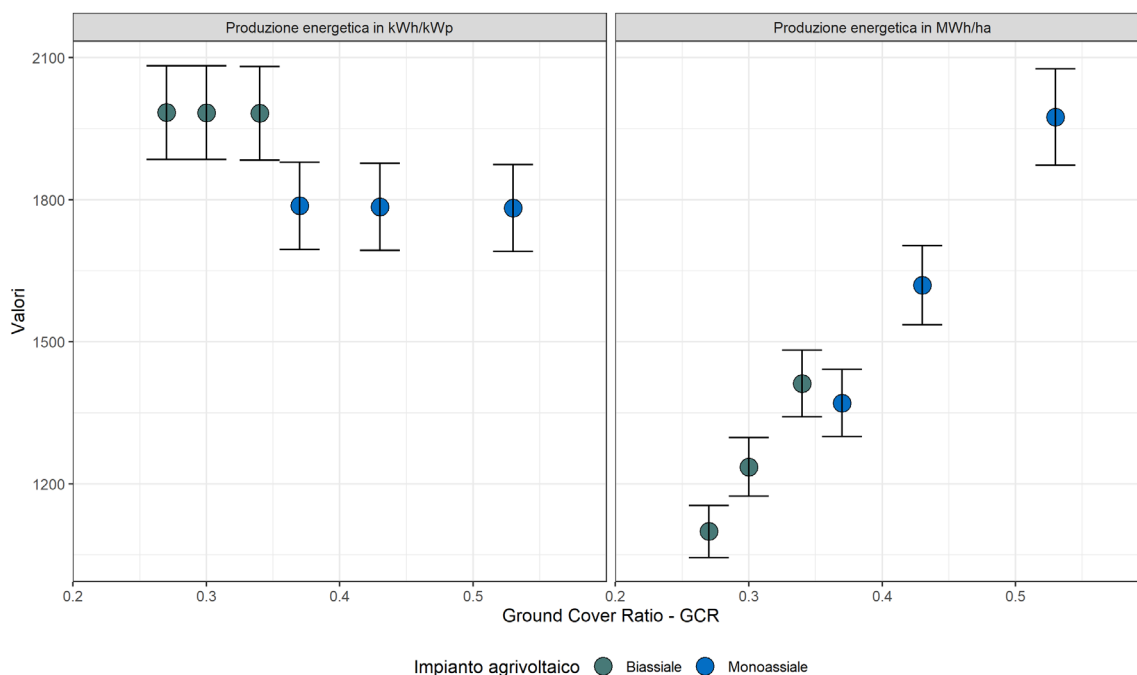


Figura 14 Media e deviazione standard della produzione di energia al variare dei Ground Cover Ratio – GCR relativi ai due impianti agrivoltaici.

L'energia prodotta da due sistemi agrivoltaici con i relativi diversi pitch è stata confrontata con la produzione di energia del sistema fotovoltaico di riferimento (Figura 15). In termini di produzione annuale di energia in kWh kWp⁻¹, il sistema biassiale e il sistema monoassiale producono rispettivamente il 53% ed il 38% in più rispetto al sistema fotovoltaico di riferimento, con una differenza minima di produzione energetica tra i diversi pitch. Per quanto riguarda le produzioni di energia in MWh ha⁻¹, il monoassiale ha prodotto il 28% ed il 6% in più rispetto al sistema di riferimento, rispettivamente con pitch di 9 m e 11m; mentre ha prodotto il 12% in meno rispetto a pitch di 13 m. Il biassiale ha raggiunto produzioni energetiche in MWh ha⁻¹ inferiori del 28%, 19% e 8% rispetto al sistema di riferimento rispettivamente a pitch 18 m, 16 m e 14 m.

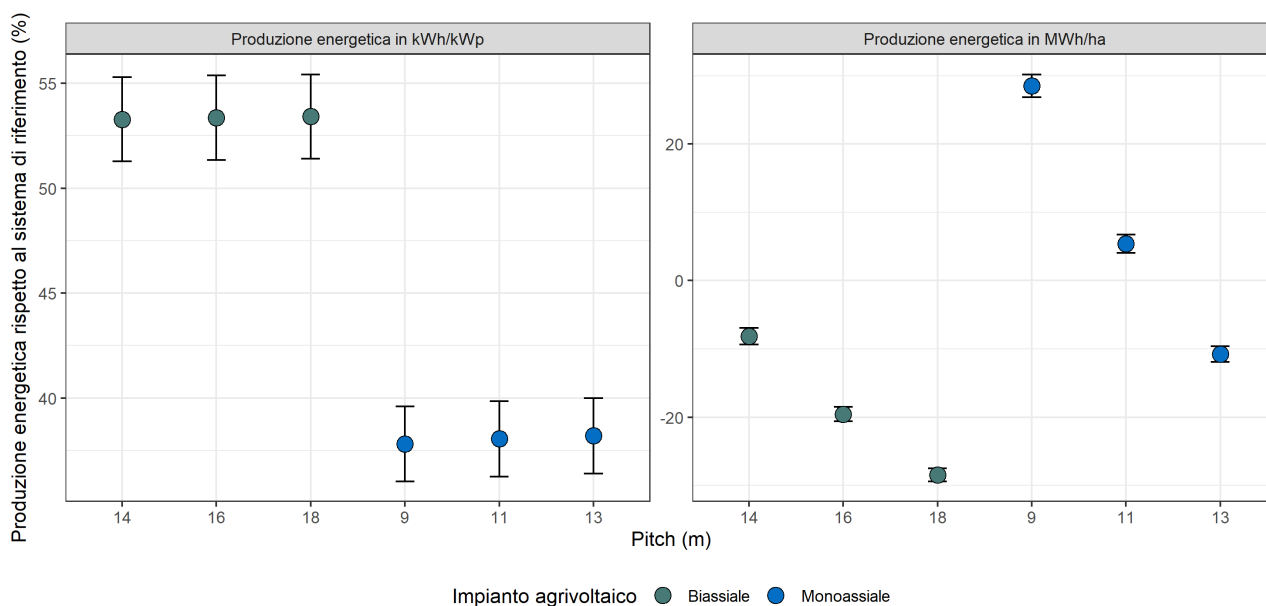


Figura 15 Media e deviazione standard dell'incremento (valori positivi) o decremento (valori negativi) in percentuale della produzione di energia dei due impianti agrivoltaici nelle diverse configurazioni di pitch rispetto al sistema fotovoltaico di riferimento.

2.4.4. Land Equivalent Ratio – LER

In Figura 16 vengono confrontati i valori di LER delle diverse configurazioni degli impianti agrivoltaici analizzati. I risultati mostrano un chiaro decremento nei valori di LER all'aumentare del pitch, sia nei diversi impianti (biassiale e monoassiale) che nelle diverse colture (frumento, soia e sorgo). Il valore di LER più alto è stato ottenuto con il monoassiale a pitch 9 m, seguito dal biassiale a pitch 14 m. I valori di LER più bassi sono stati ottenuti invece nel monoassiale a pitch di 13 m e nel biassiale a pitch di 18 m. Per quanto riguarda le tre colture valutate, il sorgo ha mostrato i valori di LER più alti mentre i valori più bassi sono stati ottenuti dalla soia.

Considerando che il LER è variato da un valore minimo superiore a 1,4 fino a quasi 2,0, gli impianti agrivoltaici considerati hanno sempre avuto un vantaggio in termini di efficienza d'uso del suolo rispetto alle soluzioni "mono-uso" (colture senza agrivoltaico e fotovoltaico terra). Questo risultato è perfettamente in linea con quanto riportato dalla letteratura scientifica, che indica appunto come il vantaggio in termini di efficienza d'uso del suolo dell'agrivoltaico vari tra il 20% fino al 80% in più rispetto alle soluzioni "mono-uso".

Il fatto che l'efficienza d'uso del suolo sia massima per l'impianto monoassiale e per i pitch inferiori è tuttavia indicazione del fatto che il LER è particolarmente sensibile alla variazione di produzione energetica per unità di superficie che diminuisce quasi linearmente all'aumentare del pitch, mentre la resa colturale (almeno per le colture considerate nello studio) si riduce meno che proporzionalmente al diminuire del pitch.

Da un lato il LER è quindi un indicatore efficace per dimostrare l'efficienza d'uso del suolo degli impianti agrivoltaici, ma deve essere integrato da altri indicatori e considerazioni per supportare l'ottimizzazione degli impianti agrivoltaici.

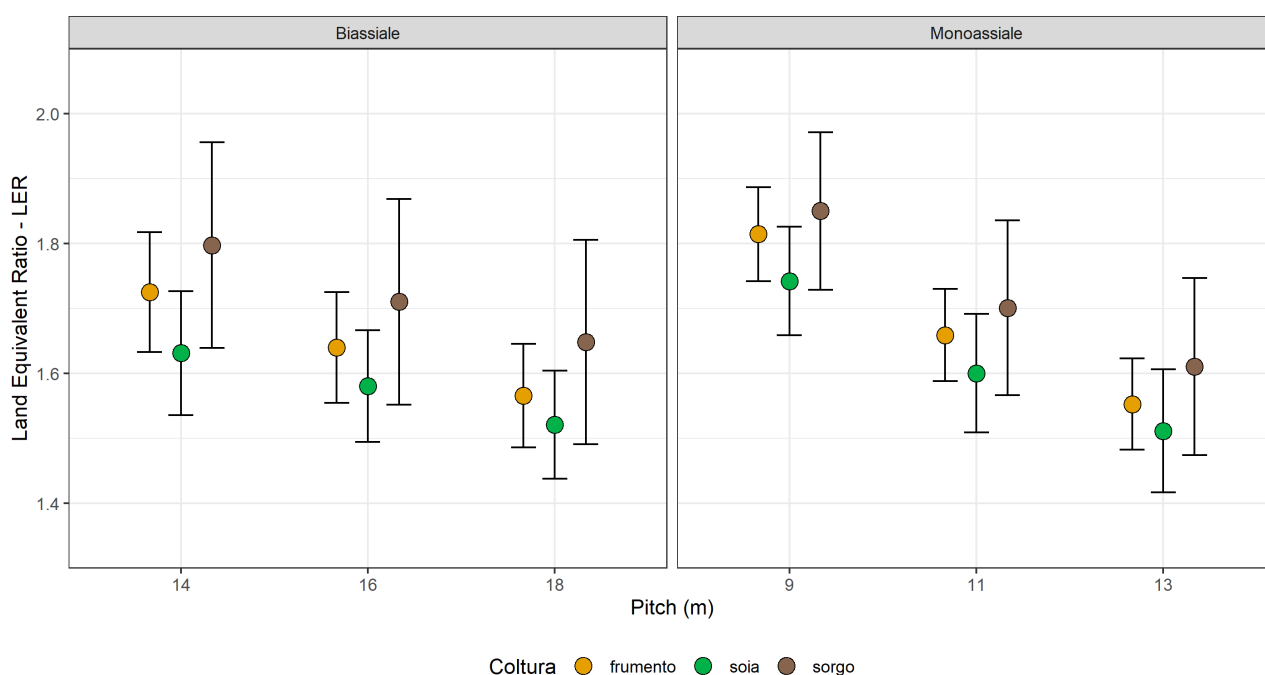


Figura 16 Media e deviazione standard del LER nei due impianti agrivoltaici e nelle diverse configurazioni di pitch.

2.5. 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. Come ha dimostrato questo studio la produzione potenziale ottenibile dalla coltivazione dell'interfila può offrire risultati soddisfacenti, ma non tiene adeguatamente conto della limitazione all'accesso al campo con le normali macchine agricole. Un altro aspetto importante da considerare è la scarsa flessibilità degli impianti monoassiali che oltre a limitare l'accesso al terreno in modo superiore rispetto all'impianto biassiale proposto, non permettono la coltivazione di un ampio range di colture, come è invece possibile con l'impianto biassiale. Un aspetto che non è stato considerato nello studio è la possibilità di ottimizzare il movimento dei pannelli non solo con l'obiettivo di massimizzare la produzione di energia attraverso il sun-tracking, ma anche per ridurre l'ombreggiamento e favorire la crescita delle colture in momenti fenologici particolari. Questa possibilità che è attualmente in corso di studio e verrà inoltre valutata anche sull'impianto proposto, è attuabile solo con impianti avanzati sopraelevati e non con impianti monoassiali a terra.

I risultati ottenuti in questo studio hanno confermato l'esistenza di una forte relazione tra ombreggiamento e produzione agricola, ed in particolare, al fine di massimizzare la produzione agricola ottenibile sotto gli impianti agrivoltaici, occorre progettare impianti agrivoltaici con pitch relativamente elevati e quindi con Ground Cover Ratio (GCR) bassi. La tipologia di impianto agrivoltaico che ha permesso di raggiungere le produzioni energetiche e agricole maggiori è stato l'impianto biassiale. Per questa tipologia di impianto, la produzione energetica maggiore è stata ottenuta con un pitch di 14 m mentre la produzione agricola maggiore è stata ottenuta con un pitch di 18 m. Tuttavia, per il biassiale a pitch 14 m la variabilità del calo produttivo (calcolato utilizzando come riferimento la resa ottenuta in condizioni di pieno campo) non rappresenta una scelta ottimale in quanto in alcuni anni la produzione della soia ha superato la soglia del 30% del calo produttivo.

In base ai risultati ottenuti dalla piattaforma di simulazione, e limitatamente alle tipologie di impianti e di colture considerate, si ritiene che l'impianto biassiale con un pitch di 16 m offra il miglior compromesso tra produzione energetica e agricola.

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 della produzione energetica ed agricola, nell'area oggetto di studio e per la rotazione colturale proposta, è ottenibile con un impianto biassiale di altezza 5,5 m e con pitch di 16 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 Paese.

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 si propone di gestire 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 17B), in modo analogo a quanto fatto per l'installazione delle sonde nelle procedure di monitoraggio del microclima.

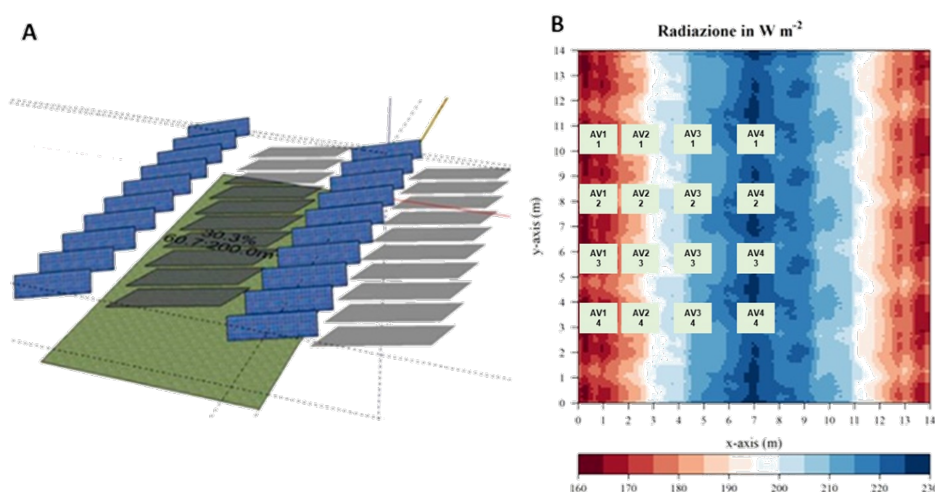


Figura 17 Rappresentazione della porzione compresa tra due filari di tracker di un sistema AV bi-assiale con proiezione delle ombre dei moduli sul suolo (A). Distribuzione della radiazione media incidente sul suolo dei 12 anni di simulazione considerati; è possibile notare le porzioni di radiazione omogenea 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 di ogni specie coinvolta attraverso rilevamenti di campo e analisi di laboratorio.

Per le tre colture coinvolte è possibile monitorare:

- contenuto di clorofilla delle foglie: tramite **SPAD** o **CM100**;

- *Leaf Area Index (LAI)*: registrato ad ogni cambio di fase fenologica, il numero di rilevamenti dipenderà dalla coltura [m^2/m^2];
- *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 [$\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$];
- capacità di scambio gassoso e fluorescenza della clorofilla. Sono misure quantitative indicative della fotosintesi. Questa misura può essere ottenuta mediante strumentazione portatile Li-6800 in stadi fenologici prestabiliti, o attraverso la predisposizione di un sistema permanente di monitoraggio degli scambi gassosi in piccole aree test;
- altezza della pianta misurata su un campione rappresentativo per ogni parcella;
- numero di internodi mediante conteggio eseguibile al momento del raccolto;
- peso fresco e peso secco di campioni della produzione prelevati da ciascuna parcella sperimentale e le comprensive repliche al fine di determinare il contenuto in sostanza secca;
- *Water productivity* o *Water Use efficiency (WUE)*: indica il rapporto tra la produzione ottenuta e l'acqua utilizzata per ottenere quella produzione [g m^{-3}].

Analisi specifica della Soia

- Peso dei baccelli raccolti per campione da ciascuna parcella sperimentale, alla raccolta [g m^{-2}];
- Numero di baccelli per campione raccolto da ciascuna parcella sperimentale, al momento della raccolta [n];
- Contenuto in sostanza secca nei baccelli [%].

Analisi specifica del frumento

- Numero di culmi per campione al momento della raccolta, ottenuto da un sub campione rappresentativo della parcella sperimentale [n m^{-2}];
- Numero di cariossidi per spiga, ottenuta da un sub campione rappresentativo della parcella sperimentale;

- Peso di granella raccolta per parcella sperimentale [g m^{-2}];
- Sostanza secca contenuta nella granella raccolta per parcella sperimentale [%].

Analisi specifica del sorgo

- Peso della granella raccolta per parcella [g m^{-2}]
- Sostanza secca contenuta nella granella [%]
- Harvest index, ottenuto come rapporto tra la massa della granella e la biomassa totale prodotta in una parcella.

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., 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>

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.

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.
- 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 Dharmrin, M., 2023. Photovoltaics at multi-terawatt scale: waiting is not an option. *Science*, 380(6640), pp.39-42.
- SolarPower Europe (2022): European Market Outlook for Solar Power 2022-2026
- 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. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 140, 110694. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>
- 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>