

RELAZIONE DI SOSTENIBILITA' AGRONOMICA DEGLI IMPIANTI AGRIVOLTAICI ENERLAND

Università Politecnica delle Marche

Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali

La presente relazione riassume i risultati delle attività di simulazione svolte dall'Università Politecnica delle Marche (UNIVPM) nell'ambito del Contratto di Consulenza siglato da UNIVPM con ENERLAND ITALIA SRL, aventi come obiettivo la stima della sostenibilità agronomica di alcune configurazioni di impianto agrivoltaico proposte e progettate da ENERLAND, rispetto alla coltivazione delle principali macrotipologie di coltivazioni comunemente adottate negli areali dei siti ENERLAND in cui gli impianti agrivoltaici saranno realizzati in Sardegna.

Per ciascuna macrotipologia di impianto della radiazione effettivamente disponibile per ciascuna combinazione coltura/impianto da porre a confronto con le esigenze al massimo di tre coperture vegetali erbacee attuali o previste in esercizio (pascolo, prato/erbaio o cereale/proteoleaginosa da granella) e generazione dei profili di radiazione.

Metodologia di lavoro

Le simulazioni sono state eseguite su 3 configurazioni agrivoltaiche scelte con la supervisione di ENERLAND, scegliendo tra quelle progettate e realizzate dall'azienda in Sardegna. Le specifiche

Nome progetto	Coltivazione agricole esistenti	Coordinate	Potenza picco [MWp]	Tipo vela	Tracker	Pitch [m]	Ampiezza vela [m]	Altezza asse dal suolo [m]	LAOR (%)
Sassari 3	seminativo (cereali-erbaio), pascolo	40°48'11" N, 8°18'17" E	28	2	72-36-18	9.15	4.96	3.1	54.21%
Stintino	seminativo (cereali-erbaio), pascolo	40°50'05" N, 8°15'06" E	25	Strut. Fisse	3x9	6.05	3.33	1.5	54.97%
Macomer 4	Pascolo	40°13'16" N, 8°43'37" E	42	1	56-28	5.70	2.28	3.1	40.00%

delle configurazioni sono state fornite da ENERLAND ad UNIVPM e sono riassunte nella Tabella 1:

Tabella 1. Configurazioni fotovoltaiche analizzate. Il coefficiente di copertura dei pannelli fotovoltaici sulla superficie di terreno sono espresse secondo il coefficiente LAOR (Land Area Occupation Ratio) suggerito nelle linee guida ministeriali di Giugno 2022.

Le simulazioni sono consistite nel calcolo della radiazione globale disponibile sulla superficie di coltivazione sotto i pannelli fotovoltaici, e sono state effettuate su 25 punti di rilevazione (Punti di Osservazione) disposti lungo un transetto dell'impianto, cioè lungo una linea avente lunghezza pari al pitch dell'impianto e posta al centro della vela fotovoltaica, che unisce il punto iniziale di un tracker (o di una vela fotovoltaica nel caso di impianto a pannelli fissi) col punto iniziale del successivo, ipotizzando i tracker posizionati orizzontalmente al terreno. Si è ipotizzato inoltre una movimentazione dei tracker oraria durante le simulazioni, con angolo di tilt tenuto sempre perpendicolare all'angolo zenitale solare.

L'algoritmo utilizzato è stato originariamente sviluppato per il funzionamento in serra fotovoltaica ed adattato per gli impianti agrivoltaici sia fissi che dotati di tracker monoassiale. Il funzionamento e

la validazione dell'algoritmo sono descritti in un precedente lavoro dell'Università di Sassari (Cossu et al., 2017. An algorithm for the calculation of the light distribution inside photovoltaic greenhouses, Solar Energy 141, 38-48). La stima della sostenibilità agronomica è stata fatta tramite il metodo della Radiation Use Efficiency (RUE), che misura l'efficienza di conversione in resa fresca o secca (g) per ogni unità di radiazione fotosinteticamente attiva disponibile sulla coltura (MJ m^{-2}) nell'arco del suo ciclo colturale. I valori di RUE sono stati ripresi dalla bibliografia per le specie colturali di seguito elencate, eventualmente corretti sulla base delle rese medie dell'areale considerato, alla sua vocazione agricola e all'intervista degli imprenditori agricoli che opereranno sul sito. Tali correzioni sono state stimate infatti dopo i sopralluoghi effettuati sui siti di interesse da UNIVPM, accompagnati da personale ENERLAND. Si ottiene così una stima della potenzialità agricola della configurazione agrivoltaica. I dati ottenuti sono da intendersi come stime, pertanto affetti da errore che dipendono dall'andamento climatico e dalle pratiche/tecniche agricole adottate dall'azienda.

Dopo aver quantificato la radiazione globale cumulata disponibile su base mensile e annuale per ogni tipologia, il lavoro ha proceduto con la stima delle perdite di resa e le relative previsioni produttive su alcune coperture vegetali previste nella consulenza e comunemente coltivate in Sardegna:

1. sistema cerealicolo (Frumento);
2. sistema foraggero (Erba medica);
3. sistema da pascolo (*Dactylis glomerata*).

Sulla base delle richieste di ENERLAND, sono stati poi aggiunti altri due sistemi colturali ortivi tradizionalmente coltivati in Sardegna, scelti secondo quanto previsto dalle linee di guida del Ministero della Transizione Ecologica, che suggeriscono di rispettare la vocazione e gli ordinamenti colturali del territorio:

4. leguminosa da granella (Pisello) che rientra nell'avvicendamento col frumento;
5. ortivo intensivo (Carciofo).

Di seguito sono inserite le schede relative alla valutazione di sostenibilità agronomica degli impianti sopra menzionati, in cui si mostra la radiazione globale disponibile a livello di coltura sull'area dell'impianto agrivoltaico e stimano le rese potenzialmente ottenibili dai vari sistemi colturali rispetto a quelle di un campo convenzionale.

RELAZIONE RISULTATI SIMULAZIONI

IMPIANTO AGRIVOLTAICO - SASSARI 3

Nome progetto	Coltivazione agricole esistenti	Coordinate	Potenza picco [MWp]	Tipo vela	Tracker	Pitch [m]	Ampiezza vela [m]	Altezza asse dal suolo [m]	LAOR (%)
Sassari 3	seminativo (cereali-erbaio), pascolo	40°48'11" N, 8°18'17" E	28	2	72-36-18	9.15	4.96	3.1	54.21%

Radiazione globale disponibile

La distribuzione della radiazione globale disponibile su base annua sulla superficie coltivata è mostrata in Figura 1. Le sottozone sotto i pannelli fotovoltaici risultano maggiormente penalizzate rispetto a quelle più lontano dai pannelli. L'area del transetto nel bordo est della vela risulta poco penalizzato, in quanto di frequente esposto alla luce solare.

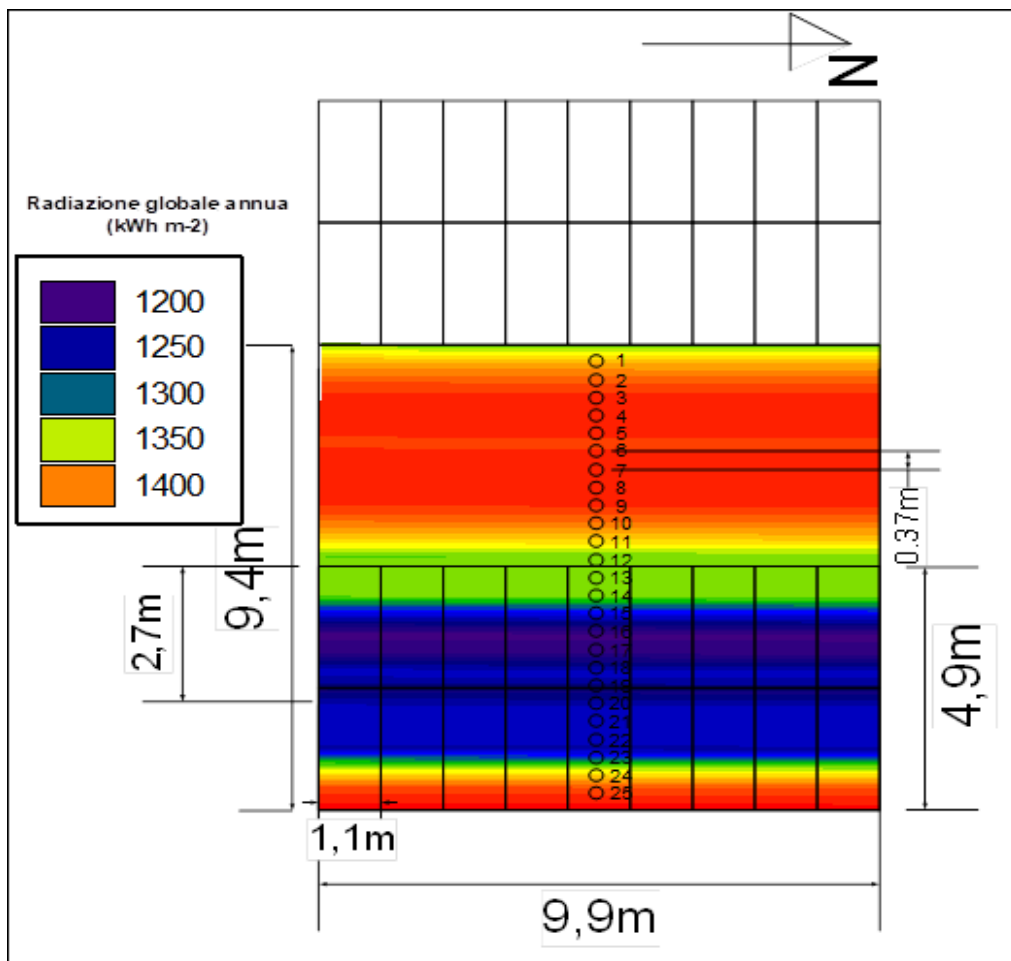


Figura 1. Mappa di distribuzione della radiazione globale cumulata annua sulla superficie del sistema agrivoltaico. La mappa è stata eseguita su una superficie rappresentativa avente come lato la lunghezza della pannelli fotovoltaici e la larghezza del transetto (pitch), calcolata a partire dall'inizio di una vela fino alla successiva.

In tabella 1 sono mostrate le distribuzioni di radiazione globale su base mensile, rispetto alla radiazione disponibile sul sito oggetto di studio su piano orizzontale. La radiazione globale annua potenzialmente disponibile in pieno campo è stata di 1740 kWh m⁻², mentre nell'impianto agrivoltaico è risultata mediamente di 1284 kWh m⁻² sul piano di coltivazione (26% in meno), con i valori minimi sotto i tracker e massimi nelle zone fra i tracker. Si nota una sostanziale omogeneità di distribuzione come menzionato sopra (mediamente del 6% durante l'anno fra i punti di osservazione più illuminati e quelli più ombreggiati), con differenze modeste tra le due sottozone. Al di là dei valori assoluti di radiazione calcolati, la disponibilità percentuale di radiazione solare è maggiore in inverno rispetto all'estate, a causa dell'angolo zenitale solare. Infatti nel periodo invernale gli angoli zenitali minori determinano una proiezione dell'ombra dei pannelli solitamente lontana dal punto di rilevazione durante la giornata, mentre in estate si proietta più di frequente sul punto di osservazione, penalizzandolo maggiormente rispetto alla radiazione potenzialmente disponibile.

Tabella 1. Distribuzioni di radiazione globale su base mensile rispetto alla radiazione disponibile. Si riporta anche il coefficiente di variazione (CV), calcolato sulle medie di impianto, che fornisce una indicazione dell'eterogeneità di distribuzione della radiazione solare sulla superficie.

Mesi	Radiazione globale su piano orizzontale in pieno campo (kWh m ⁻²)	Fra Vele	Sotto Vele	Sistema Agrivoltaico	Fra Vele	Sotto Vele	Media impianto	CV (%)
		Media mensile (kWh m ⁻²)			Media mensile (%)			
<i>Gennaio</i>	62	58	51	55	94%	83%	88%	8%
<i>Febbraio</i>	86	74	67	70	86%	77%	81%	7%
<i>Marzo</i>	140	103	99	101	74%	71%	72%	6%
<i>Aprile</i>	184	134	125	129	73%	68%	70%	7%
<i>Maggio</i>	226	167	153	160	74%	68%	71%	8%
<i>Giugno</i>	234	174	160	167	74%	68%	71%	8%
<i>Luglio</i>	233	173	160	166	74%	68%	71%	7%
<i>Agosto</i>	202	149	138	143	73%	68%	71%	7%
<i>Settembre</i>	150	109	103	106	73%	69%	71%	7%
<i>Ottobre</i>	105	86	78	82	82%	75%	78%	7%
<i>Novembre</i>	66	61	54	57	93%	82%	87%	7%
<i>Dicembre</i>	52	50	44	47	96%	84%	90%	8%
TOTALE	1740	1339	1232	1284	77%	71%	74%	6%

In Figura 2 è mostrata la radiazione cumulata annua disponibile su ogni punto di rilevazione. La disponibilità di radiazione solare è maggiore nelle zone fra i trackers, tuttavia le perdite percentuali sotto i tracker sono modeste. Infatti le perdite medie oscillano tra il 16-32% sotto i trackers, mentre risultano del 4-27% nelle zone del transetto fra i trackers. Le differenze fra le due sottozone (sotto trackers e fra trackers) oscillano pertanto dal 5 al 28%. Tali differenze minime indicano una sostanziale omogeneità di distribuzione della radiazione solare tra le due sottozone dovuta alla presenza dei trackers ad inseguimento. Il movimento del tracker è in grado di distribuire l'ombreggiamento su tutta la superficie del transetto, penalizzando quindi meno i singoli punti di osservazione (specie quelli sotto il tracker). Di converso, risultano leggermente penalizzati anche i punti di osservazione più distanti dai trackers. La distribuzione mostrata in figura risulta approssimativamente simile anche negli altri mesi dell'anno.

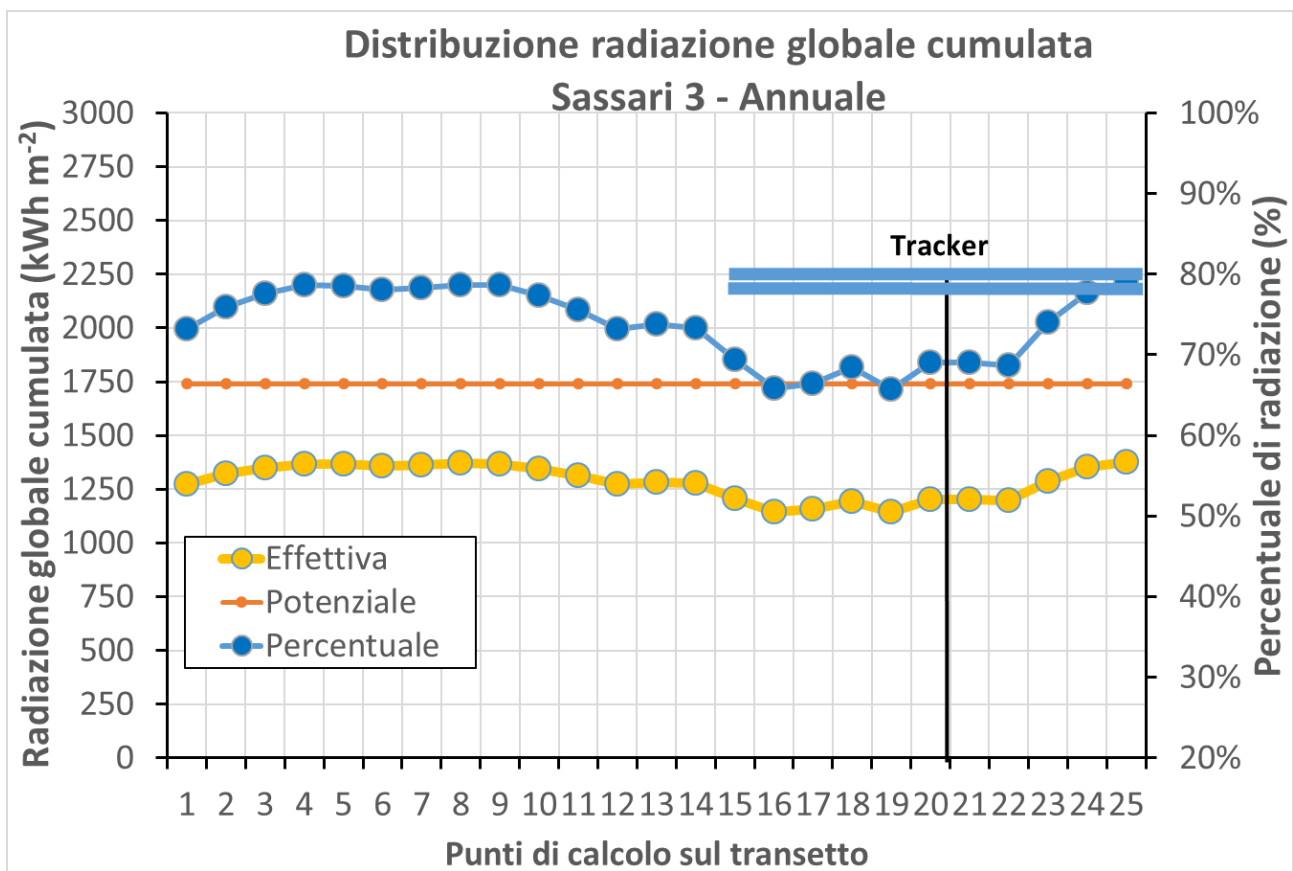


Figura 2. Radiazione cumulata annua disponibile su ogni punto di rilevazione del transetto. E' riportata sia la radiazione calcolata sul piano di coltivazione sia la relativa riduzione percentuale, rispetto a quella potenzialmente disponibile sul sito.

Sostenibilità agronomica Impianto Agrivoltaico Sassari 3

Le perdite di resa oscillano tra il 22 ed il 28% a seconda della specie considerata (Tabella 2). Solo le perdite di resa sotto il 25% possono essere considerate accettabili dal punto di vista economico ed agricolo, al netto dell'errore della presente stima. Pertanto in generale si può affermare che tutte le specie considerate sono compatibili con la coltivazione sotto la configurazione agrivoltaica analizzata, con perdite di resa moderate ma accettabili. Tuttavia è raccomandabile ridurre leggermente il LAOR per tenere le perdite sotto il 25% su tutte le specie. Differenze tra il 5-7% sono presenti tra le due sottozone.

Tabella 2. Stima delle rese dei 5 sistemi colturali rispetto a quelle potenziali di un campo convenzionale nello stesso sito.

STIMA RESE COLTURALI SOTTO IMPIANTO AGRIVOLTAICO					
	Periodo ciclo colturale	Resa potenziale (q ha⁻¹)	Fra Tracker	Sotto Tracker	Media impianto
FRUMENTO (cerealicolo)	Ottobre - Giugno				
	Riduzione (%)	0%	24%	30%	27%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	34.3	26.2	23.9	25.0
ERBA MEDICA (foraggero)	Marzo - Novembre				
	Riduzione (%)	0%	25%	31%	28%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	82.3	61.4	56.8	59.0
CARCIOFO (orticolo intensivo)	Luglio - Aprile				
	Riduzione (%)	0%	23%	29%	26%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	76.9	59.4	54.7	57.0
PISELLO (orticolo in avvicendamento)	Novembre - Aprile				
	Riduzione (%)	0%	20%	27%	24%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	29.3	23.3	21.3	22.3
DACTYLIS (pascolo)	Annuale				
	Riduzione (%)	0%	23%	29%	26%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	80.5	62.4	57.2	59.7

Le rese stimate (Figura 3) sono distribuite sul transetto secondo la distribuzione della radiazione solare mostrata anche in Figura 2. Le perdite sono presenti su tutti i punti di osservazione e risultano accentuate sotto i trackers, per poi diminuire gradualmente man mano che ci si allontana da essi. Si conferma anche per le rese una sostanziale uniformità di distribuzione delle rese, dato che le differenze fra le rese sotto i trackers e fra i trackers sono modeste (6-7%).

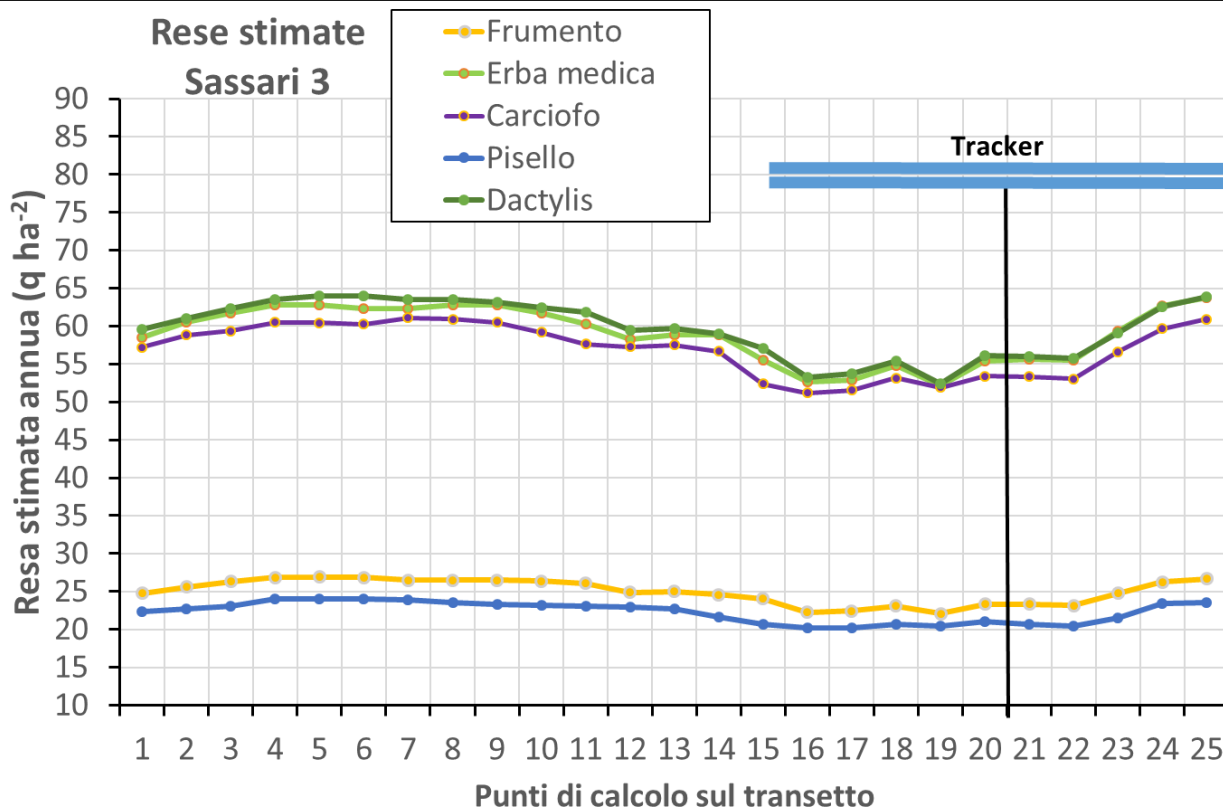


Figura 3. Rese stimate annue su tutti i punti di osservazione del transetto agrivoltaico.

IMPIANTO AGRIVOLTAICO - STINTINO

Nome progetto	Coltivazione agricole esistenti	Coordinate	Potenza picco [MWp]	Tipo vela	Tracker	Pitch [m]	Ampiezza vela [m]	Altezza asse dal suolo [m]	LAOR (%)
Stintino	seminativo (cerali-erbaio), pascolo	40°50'05" N, 8°15'06" E	25	Strut. Fisse	3x9	6.05	3.33	1.5	54.97%

Radiazione globale disponibile

La distribuzione della radiazione globale disponibile su base annua sulla superficie coltivata è mostrata in Figura 1. Le sottozone sotto i pannelli fotovoltaici risultano fortemente penalizzate rispetto a quelle più lontano dai pannelli. Il bordo sud della vela risulta meno penalizzato, in quanto spesso esposto alla luce solare diretta.

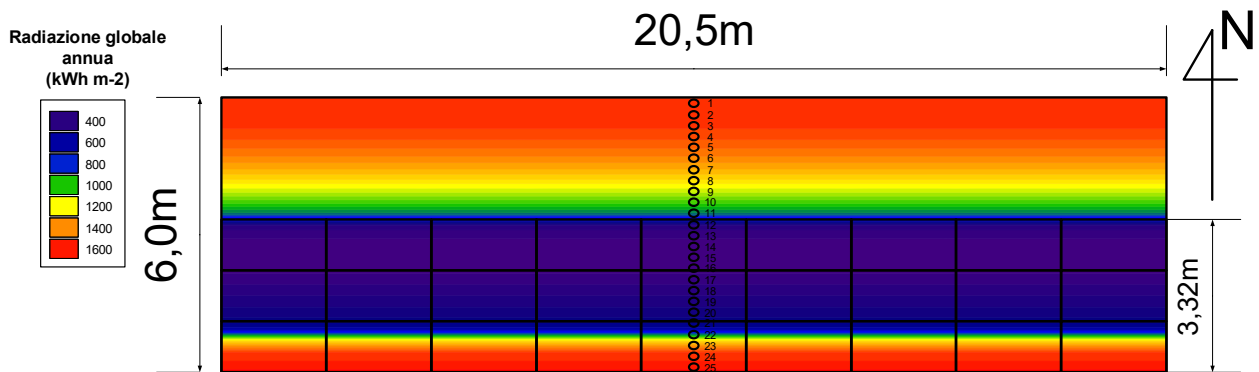


Figura 1. Mappa di distribuzione della radiazione globale cumulata annua sulla superficie del sistema agrivoltaico. La mappa è stata eseguita su una superficie rappresentativa avente come lato la lunghezza dei pannelli fotovoltaici e la larghezza del transetto (pitch), calcolata a partire dall'inizio di una vela fino alla successiva.

In Tabella 1 sono mostrate le distribuzioni di radiazione globale su base mensile, rispetto alla radiazione disponibile sul sito oggetto di studio su piano orizzontale. La radiazione globale annua potenzialmente disponibile in pieno campo è stata di 1743 kWh m⁻², mentre nell'impianto agrivoltaico è risultata mediamente di 976 kWh m⁻² sul piano di coltivazione (44% in meno), con i valori minimi sotto i pannelli fotovoltaici e nelle zone adiacenti ad essa, e massimi nei punti di osservazione del transetto più lontani dai pannelli.

Si nota forte eterogeneità di distribuzione come menzionato sopra (mediamente del 54% durante l'anno fra i punti di osservazione più illuminati e quelli più ombreggiati), con differenze percentuali di radiazione disponibile elevate tra le due sottozone (73% fra le vele contro il 39% sotto le vele). Al di là dei valori assoluti di radiazione calcolati, molto bassi sotto le vele, la disponibilità percentuale di radiazione solare sotto le vele è maggiore in inverno rispetto all'estate. Fra le vele accade invece l'opposto, per cui in inverno la percentuale di radiazione disponibile è inferiore a quella sotto le vele, per poi invertire la tendenza nelle altre stagioni, fino ai valori massimi in estate, dove la radiazione disponibile fra le vele è prossima a quella potenziale, sempre a causa dei valori diversi di angolo zenitale solare in queste due stagioni, che essendo alti in estate, proiettano l'ombra sempre sotto i pannelli e poco fra le vele.

Tabella 1. Distribuzioni di radiazione globale su base mensile rispetto alla radiazione disponibile. Si riporta anche il coefficiente di variazione (CV), calcolato sulle medie di impianto, che fornisce una indicazione dell'eterogeneità di distribuzione della radiazione solare sulla superficie.

Mesi	Radiazione globale su piano orizzontale in piano campo (kWh m ⁻²)	Fra Vele	Sotto Vele	Sistema Agrivoltaico	Fra Vele	Sotto Vele	Media impianto	CV (%)
		Media mensile (kWh m ⁻²)			Media mensile (%)			
<i>Gennaio</i>	62	15	47	32	23%	72%	50%	68%
<i>Febbraio</i>	87	23	47	37	26%	52%	41%	77%
<i>Marzo</i>	140	79	56	66	54%	38%	45%	84%
<i>Aprile</i>	184	159	56	101	83%	29%	53%	73%
<i>Maggio</i>	227	224	77	142	95%	33%	60%	65%
<i>Giugno</i>	234	240	77	149	98%	32%	61%	64%
<i>Luglio</i>	234	235	83	150	96%	34%	61%	63%
<i>Agosto</i>	203	187	63	117	89%	30%	56%	69%
<i>Settembre</i>	150	99	57	75	63%	36%	48%	81%
<i>Ottobre</i>	105	35	51	44	32%	47%	41%	79%
<i>Novembre</i>	66	15	46	32	21%	68%	47%	72%
<i>Dicembre</i>	52	14	43	30	25%	79%	55%	63%
TOTALE	1743	1324	702	976	73%	39%	54%	54%

In Figura 2 è mostrata la radiazione cumulata annua disponibile su ogni punto di rilevazione. Rispetto al transetto di 25 punti di osservazione, risulta un forte ombreggiamento sotto i pannelli fotovoltaici. Anche fra le vele vi è una modesta riduzione di radiazione disponibile. Le perdite medie oscillano tra il 21-71% sotto la vela, mentre risultano del 2-79% nelle zone del transetto fra le vele. Le differenze tra le due sottozone oscillano pertanto dal 19 al 69% su base annua, indicando una forte eterogeneità di distribuzione tra le due sottozone. Le perdite di radiazione solare sono elevate sotto la vela e sono di modesta entità anche fra le vele, dovuta all'assenza di sistema di inseguimento, associata ad un indice LAOR elevato.

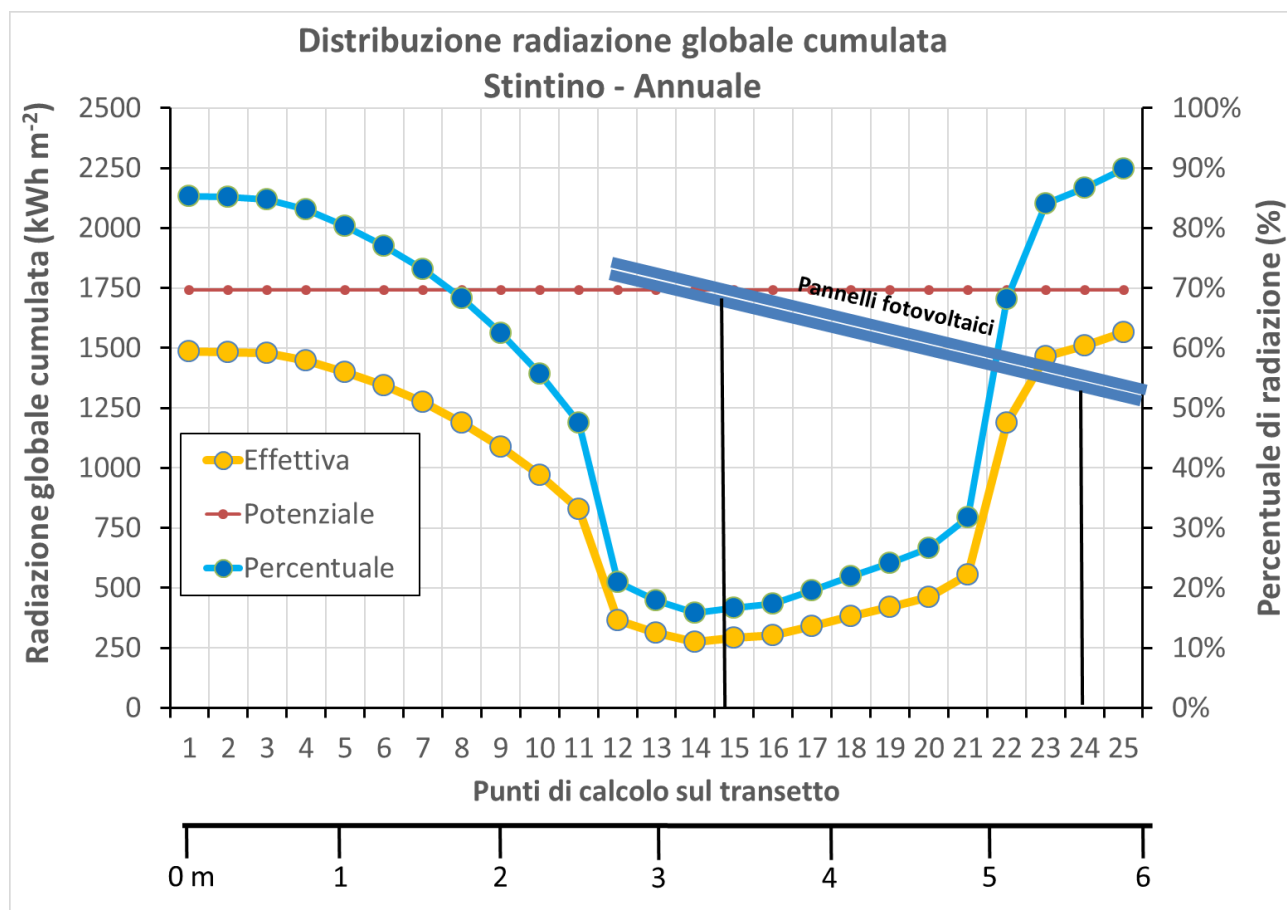


Figura 2. Radiazione cumulata annua disponibile su ogni punto di rilevazione del transetto. E' riportata sia la radiazione calcolata sul piano di coltivazione sia la relativa riduzione percentuale, rispetto a quella potenzialmente disponibile sul sito.

Il movimento dell'ombra durante l'anno dovuto al percorso solare genera ogni mese una diversa distribuzione della radiazione solare rispetto alla figura 3. In Figura 3 è riportata la situazione nel mese di Gennaio e di Giugno, cioè nei mesi di minore e maggiore irraggiamento, rispettivamente. Nel periodo invernale gli angoli zenitali minori dei raggi solari determinano una proiezione dell'ombra dei pannelli sulla zona fra le vele (Gennaio), mentre in estate, gli angoli zenitali massimi causano una proiezione dell'ombra più di frequente sotto la vela (Giugno), penalizzandola maggiormente rispetto alla radiazione potenzialmente disponibile. In termini assoluti, la radiazione solare sotto i pannelli risulta penalizzata durante tutto l'anno (in inverno per il basso irraggiamento, in estate per il persistente ombreggiamento).

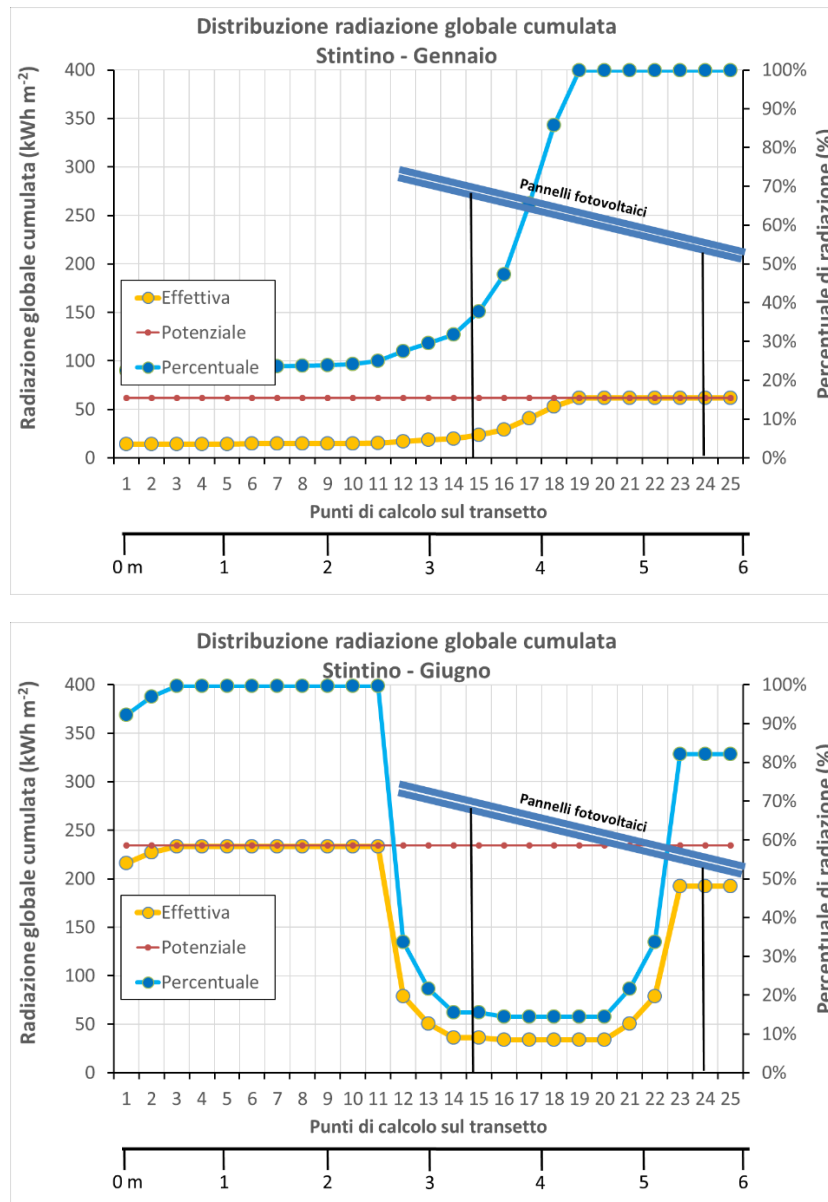


Figura 2. Radiazione cumulata disponibile su ogni punto di rilevazione del transetto nei mesi di Giugno e Dicembre. E' riportata sia la radiazione calcolata sul piano di coltivazione sia la relativa riduzione percentuale, rispetto a quella potenzialmente disponibile sul sito.

Sostenibilità agronomica Impianto Agrivoltaico Stintino

Le potenzialità produttive dei terreni nella zona di Stintino sono minori rispetto a quelli della zona di Sassari 3. I valori di resa potenziale sono quindi corretti sulla base delle informazioni ricevute durante il sopralluogo e alle esperienze tecniche e sperimentali di UNIVPM. Le perdite elevate di radiazione in questa tipologia di impianto comportano elevate perdite di resa su tutte le colture considerate. Data l'assenza di sistema di movimentazione dei pannelli, potrebbe essere compromessa la possibilità di effettuare alcune operazioni colturali (es. semina, raccolta ecc.) per via dell'ingombro dato dai pannelli stessi. Per questo motivo, le stime di resa sono state fatte anche nell'ipotesi in cui le zone sotto i pannelli non possano essere coltivate.

Le perdite di resa oscillano tra il 44 ed il 51% a seconda della specie considerata (Tabella 2). Queste stime indicano una elevata difficoltà a produrre in questa tipologia di impianto agrivoltaico. L'attività agricola sarebbe molto penalizzata anche dal punto di vista economico rispetto al campo convenzionale. Se le zone sotto le vele non venissero coltivate, le perdite salirebbero tra il 62 e il 77%.

Si consiglia di ridurre il LAOR sotto il 40% (implementando vele singole o aumentando il pitch) e/o di inserire un sistema ad inseguimento per distribuire l'ombreggiamento su tutta la superficie invece di concentrarlo sotto i pannelli, aumentando la disponibilità di radiazione solare sotto le vele.

Tabella 2. Stima delle rese dei 5 sistemi colturali rispetto a quelle potenziali di un campo convenzionale nello stesso sito. Le stime di resa sono state fatte anche nell'ipotesi in cui le zone sotto le vele non siano coltivate.

STIMA RESE COLTURALI SOTTO IMPIANTO AGRIVOLTAICO						
	Periodo ciclo colturale	Resa potenziale (q ha ⁻¹)	Fra Tracker	Sotto Tracker	Media impianto	Media (no area sotto pannelli)
FRUMENTO (cerealicolo)	Ottobre - Giugno					
	Riduzione (%)	0%	33%	58%	47%	69%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	27.5	18.4	11.4	14.5	8.4
ERBA MEDICA (foraggero)	Marzo - Novembre					
	Riduzione (%)	0%	18%	64%	44%	62%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	82.4	67.6	30.0	46.5	31.1
CARCIOFO (orticolo intensivo)	Luglio - Aprile					
	Riduzione (%)	0%	33%	58%	47%	69%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	77.1	51.3	32.6	40.8	23.6
PISELLO (orticolo in avvicendamento)	Novembre - Aprile					
	Riduzione (%)	0%	50%	51%	51%	77%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	29.3	14.8	14.3	14.5	6.8
DACTYLIS (pascolo)	Annuale					
	Riduzione (%)	0%	31%	58%	46%	68%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	80.6	55.3	34.1	43.4	25.4

Le rese stimate (Figura 3) sono distribuite sul transetto secondo la distribuzione della radiazione solare mostrata in Figura 2. Le perdite sono presenti su tutti i punti di osservazione e risultano accentuate sotto i pannelli fotovoltaici, per poi diminuire gradualmente man mano che ci si allontana da essi. Le rese sotto i pannelli risultano meno penalizzate al bordo sud della vela, in quanto piuttosto esposta alla luce.

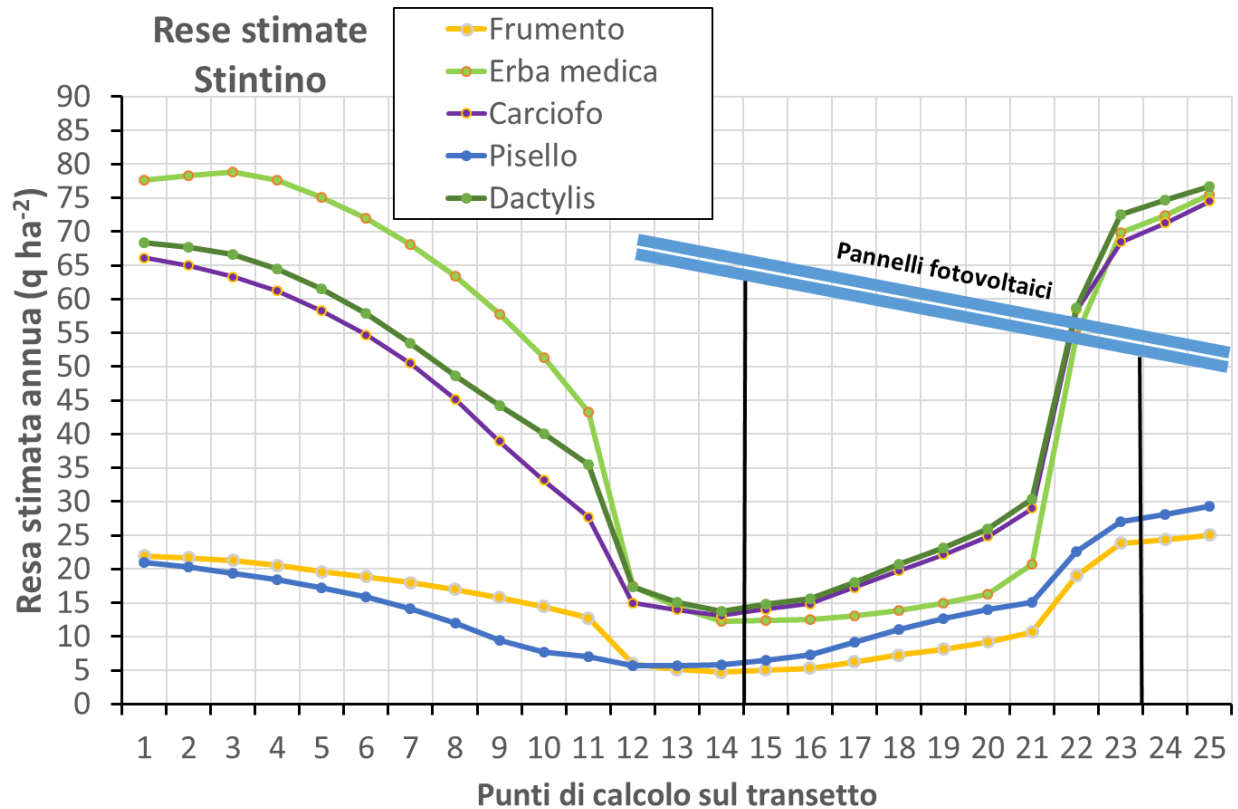


Figura 3. Rese stimate annue su tutti i punti di osservazione del transetto agrivoltaico.

IMPIANTO AGRIVOLTAICO – MACOMER 4

Nome progetto	Coltivazione agricole esistenti	Coordinate	Potenza picco [MWp]	Tipo vela	Tracker	Pitch [m]	Ampiezza vela [m]	Altezza asse dal suolo [m]	LAOR (%)
Macomer 4	Pascolo	40°13'16" N, 8°43'37" E	42	1	56-28	5.70	2.28	3.1	40.00%

Radiazione globale disponibile

La distribuzione della radiazione globale disponibile su base annua sulla superficie coltivata è mostrata in Figura 1. Le sottozone sotto i pannelli fotovoltaici risultano maggiormente penalizzate rispetto a quelle più lontano dai pannelli. L'area del transetto nel bordo est del tracker risulta poco penalizzato, in quanto di frequente esposto alla luce solare.

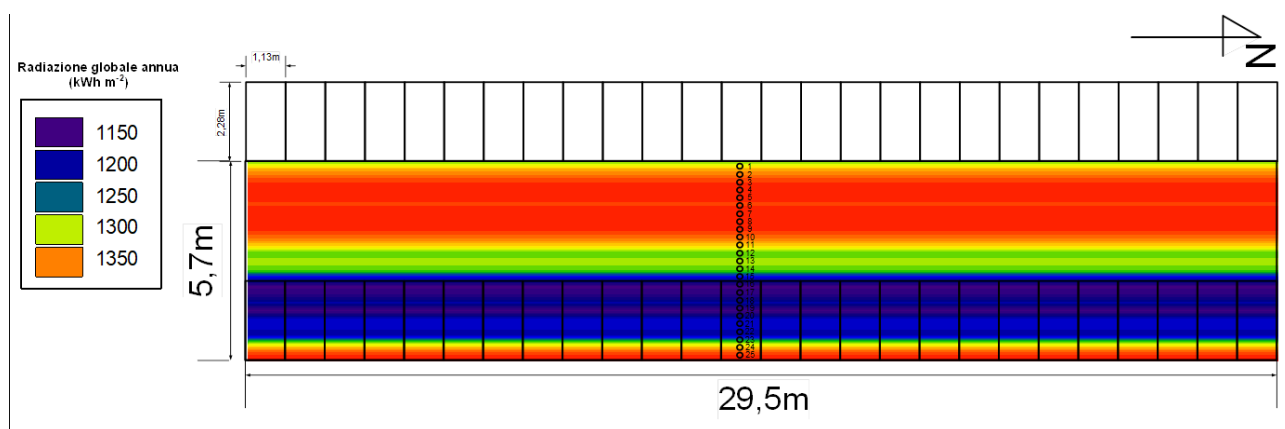


Figura 1. Mappa di distribuzione della radiazione globale cumulata annua sulla superficie del sistema agrivoltaico. La mappa è stata eseguita su una superficie rappresentativa avente come lato la lunghezza della pannelli fotovoltaici e la larghezza del transetto (pitch), calcolata a partire dall'inizio di una vela fino alla successiva.

In tabella 1 sono mostrate le distribuzioni di radiazione globale su base mensile, rispetto alla radiazione disponibile sul sito oggetto di studio su piano orizzontale. La radiazione globale annua potenzialmente disponibile in pieno campo è stata di 1722 kWh m⁻², mentre nell'impianto agrivoltaico è risultata mediamente di 1549 kWh m⁻² sul piano di coltivazione (10% in meno), con i valori minimi sotto i tracker e massimi nelle zone fra i tracker. Si nota una sostanziale omogeneità di distribuzione come menzionato sopra (mediamente del 4% durante l'anno fra i punti di osservazione più illuminati e quelli più ombreggiati), con differenze minime tra le due sottozone.

Tabella 1. Distribuzioni di radiazione globale su base mensile rispetto alla radiazione disponibile. Si riporta anche il coefficiente di variazione (CV), calcolato sulle medie di impianto, che fornisce una indicazione dell'eterogeneità di distribuzione della radiazione solare sulla superficie.

Mesi	Radiazione globale su piano orizzontale in piano campo (kWh m ⁻²)	Fra Vele	Sotto Vele	Sistema Agrivoltaico	Fra Vele	Sotto Vele	Media impianto	CV (%)
		Media mensile (kWh m ⁻²)			Media mensile (%)			
<i>Gennaio</i>	71	65	69	67	91%	97%	94%	5%
<i>Febbraio</i>	104	96	96	96	93%	93%	93%	4%
<i>Marzo</i>	124	117	114	115	94%	92%	93%	4%
<i>Aprile</i>	158	147	140	143	93%	89%	91%	4%
<i>Maggio</i>	214	196	181	188	92%	85%	88%	6%
<i>Giugno</i>	218	200	182	190	92%	83%	87%	7%
<i>Luglio</i>	242	220	198	209	91%	82%	86%	8%
<i>Agosto</i>	213	195	178	186	92%	84%	88%	7%
<i>Settembre</i>	148	138	133	135	93%	90%	91%	4%
<i>Ottobre</i>	104	98	98	98	94%	94%	94%	3%
<i>Novembre</i>	81	74	77	76	92%	96%	94%	5%
<i>Dicembre</i>	46	43	45	44	94%	98%	96%	3%
TOTALE	1722	1589	1511	1549	92%	88%	90%	4%

In Figura 2 è mostrata la radiazione cumulata annua disponibile su ogni punto di rilevazione. La disponibilità di radiazione solare è maggiore nelle zone fra i trackers, tuttavia le perdite percentuali sotto i tracker sono modeste. Infatti le perdite medie oscillano tra il 2-18% sotto i trackers, mentre risultano del 4-27% nelle zone del transetto fra i trackers. Le differenze fra le due sottozone (sotto trackers e fra trackers) oscillano pertanto dal 6 al 9%. Tali differenze minime indicano una sostanziale omogeneità di distribuzione della radiazione solare tra le due sottozone dovuta alla presenza dei trackers ad inseguimento. Il movimento del tracker è in grado di distribuire l'ombreggiamento su tutta la superficie del transetto, penalizzando quindi meno i singoli punti di osservazione (specie quelli sotto il tracker). Di converso, risultano leggermente penalizzati anche i punti di osservazione più distanti dai trackers. La distribuzione mostrata in figura risulta approssimativamente simile anche negli altri mesi dell'anno.

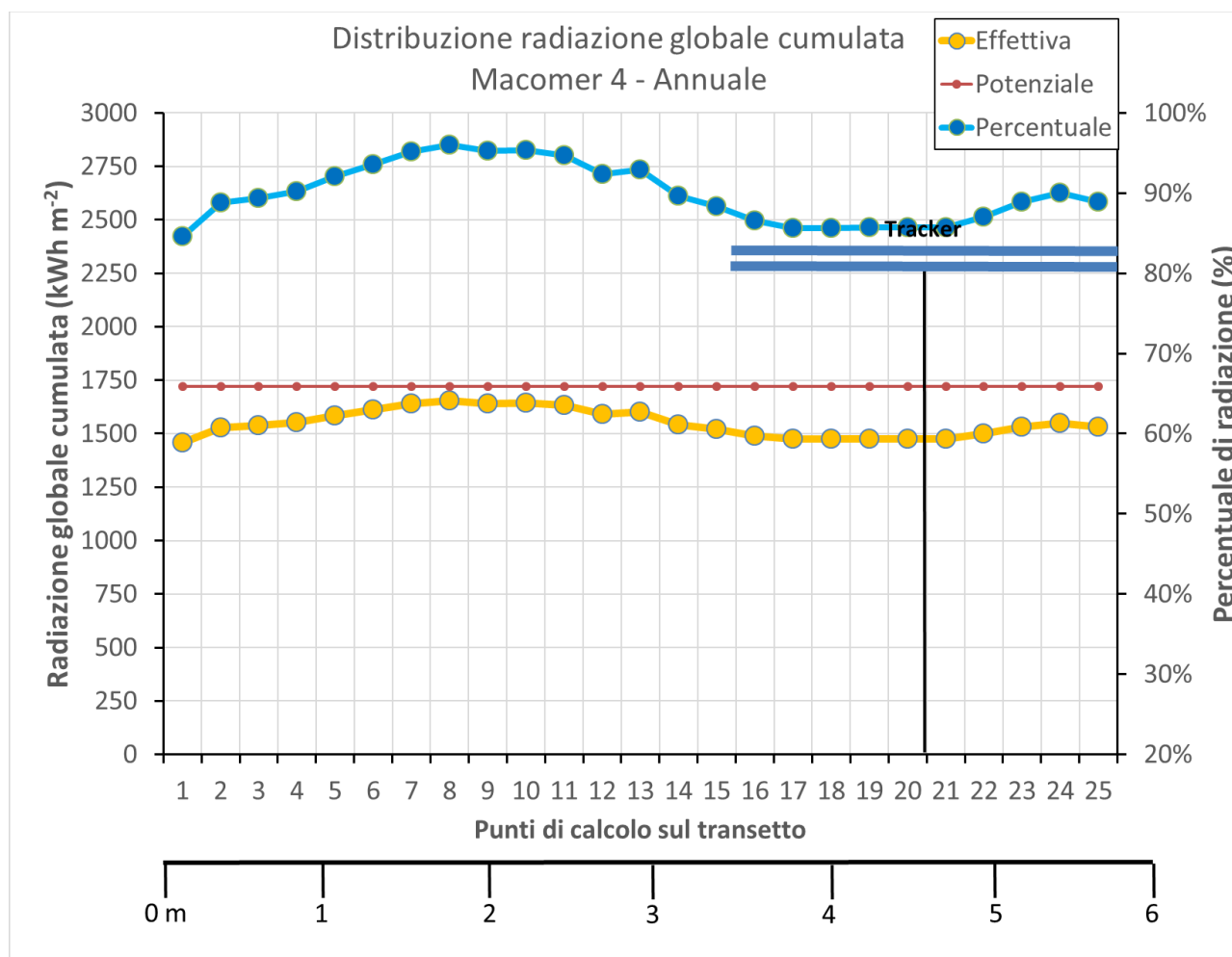


Figura 2. Radiazione cumulata annua disponibile su ogni punto di rilevazione del transetto. E' riportata sia la radiazione calcolata sul piano di coltivazione sia la relativa riduzione percentuale, rispetto a quella potenzialmente disponibile sul sito.

Sostenibilità agronomica Impianto Agrivoltaico Macomer 4

Le rese potenziali del sito Macomer 4 sono le più basse fra i siti analizzati a causa delle diverse condizioni climatiche e pedologiche della zona. Le perdite di resa oscillano tra il 10 ed il 15% a seconda della specie considerata (Tabella 2). Solo le perdite di resa sotto il 25% possono essere considerate accettabili dal punto di vista economico ed agricolo, al netto dell'errore della presente stima. Pertanto in generale si può affermare che tutte le specie considerate sono compatibili con la coltivazione sotto la configurazione agrivoltaica analizzata, con perdite contenute sotto il 15% annue. Anche le differenze di resa media fra le due sottozone (sotto trackers e fra trackers) sono praticamente nulle, dovute alla elevata omogeneità di distribuzione della radiazione solare. E' possibile che le specie il cui ciclo produttivo si svolge anche durante l'estate (es. erba medica) possano trarre un beneficio dall'ombreggiamento dei pannelli, portando ad una ulteriore mitigazione delle perdite rispetto ai valori in tabella, ed un aumento di resa nello sfalcio estivo rispetto alle condizioni di pieno campo.

Tabella 2. Stima delle rese dei 5 sistemi colturali rispetto a quelle potenziali di un campo convenzionale nello stesso sito.

STIMA RESE COLTURALI SOTTO IMPIANTO AGRIVOLTAICO					
	Periodo ciclo colturale	Resa potenziale (q ha⁻¹)	Fra Tracker	Sotto Tracker	Media impianto
FRUMENTO (cerealicolo)	Ottobre - Giugno				
	Riduzione (%)	0%	15%	15%	15%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	17.8	15.2	15.1	15.2
ERBA MEDICA (foraggero)	Marzo - Novembre				
	Riduzione (%)	0%	12%	11%	12%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	53.5	47.1	47.5	47.3
CARCIOFO (orticolo intensivo)	Luglio - Aprile				
	Riduzione (%)	0%	11%	11%	11%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	38.8	34.6	34.5	34.5
PISELLO (orticolo in avvicendamento)	Novembre - Aprile				
	Riduzione (%)	0%	11%	12%	12%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	14.5	12.9	12.7	12.8
DACTYLIS (pascolo)	Annuale				
	Riduzione (%)	0%	10%	10%	10%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	52.2	47.0	46.8	46.9

Le rese stimate (Figura 3) sono distribuite sul transetto secondo la distribuzione della radiazione solare mostrata in Figura 2. Le perdite sono presenti su tutti i punti di osservazione e risultano accentuate sotto i trackers, per poi diminuire gradualmente man mano che ci si allontana da essi.

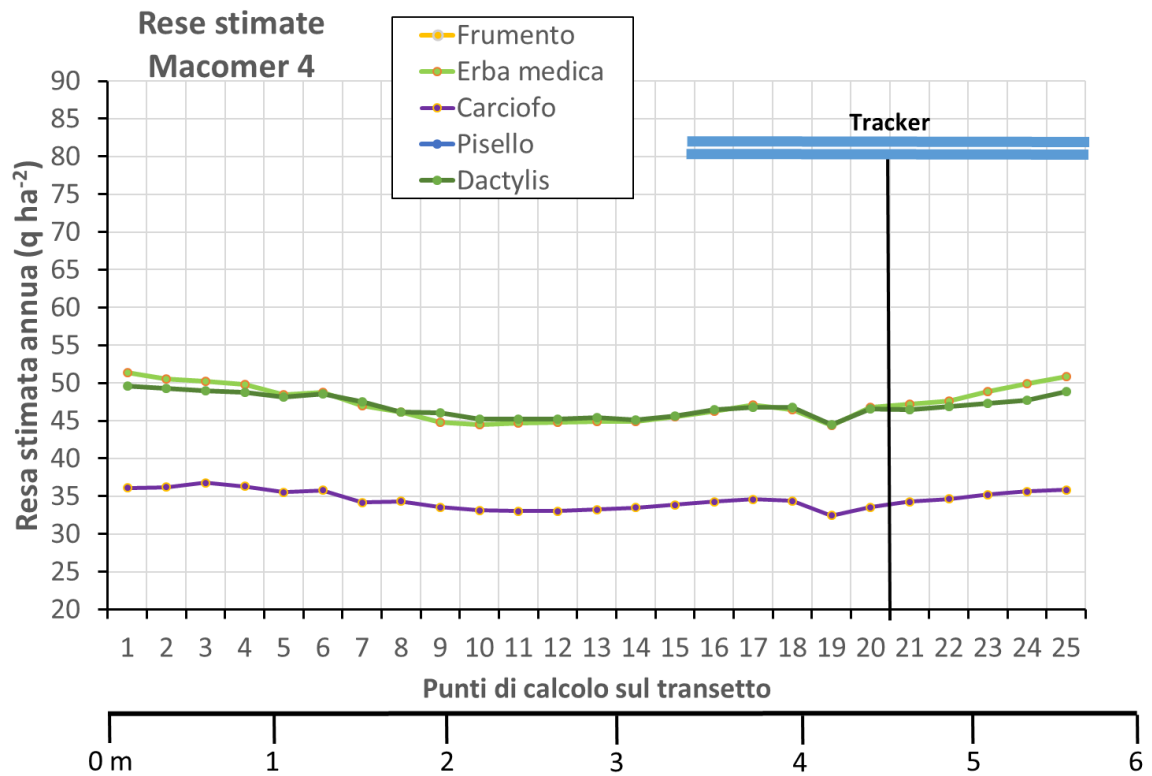


Figura 3. Rese stimate annue su tutti i punti di osservazione del transetto agrivoltaico.

QUADRO RIASSUNTIVO DI SOSTENIBILITA' AGRONOMICA DEGLI IMPIANTI AGRIVOLTAICI ENERLAND

Tabella riassuntiva della radiazione globale cumulata media disponibile sui siti agrivoltaici. Come radiazione e globale in pieno campo sono stati utilizzati i valori del sito di Sassari 3.

Mesi	Radiazione globale su piano orizzontale in pieno campo (kWh m ⁻²)	Sassari 3	Stintino	Macomer 4	Sassari 3	Stintino	Macomer 4
		Media mensile (kWh m ⁻²)			Media mensile (%)		
<i>Gennaio</i>	62	55	32	55	88%	50%	88%
<i>Febbraio</i>	86	70	37	70	81%	41%	81%
<i>Marzo</i>	140	101	66	101	72%	45%	72%
<i>Aprile</i>	184	129	101	129	70%	53%	70%
<i>Maggio</i>	226	160	142	160	71%	60%	71%
<i>Giugno</i>	234	167	149	167	71%	61%	71%
<i>Luglio</i>	233	166	150	166	71%	61%	71%
<i>Agosto</i>	202	143	117	143	71%	56%	71%
<i>Settembre</i>	150	106	75	106	71%	48%	71%
<i>Ottobre</i>	105	82	44	82	78%	41%	78%
<i>Novembre</i>	66	57	32	57	87%	47%	87%
<i>Dicembre</i>	52	47	30	47	90%	55%	90%
TOTALE	1740	1284	976	1284	74%	54%	74%

Tabella riassuntiva di stima delle perdite di resa.

Sistemi colturali	Periodo ciclo colturale	Sassari 3	Stintino	Macomer 4
FRUMENTO (cerealicolo)	Ottobre - Giugno			
	Riduzione (%)	27%	69%	15%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	25.0	8.4	15.2
ERBA MEDICA (foraggero)	Marzo - Novembre			
	Riduzione (%)	28%	62%	12%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	59.0	31.1	47.3
CARCIOFO (orticolo intensivo)	Luglio - Aprile			
	Riduzione (%)	26%	69%	11%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	57.0	23.6	34.5
PISELLO (orticolo in avvicendamento)	Novembre - Aprile			
	Riduzione (%)	24%	77%	12%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	22.3	6.8	12.8
DACTYLIS (pascolo)	Annuale			
	Riduzione (%)	26%	68%	10%
	Stima resa (q ha ⁻¹)	59.7	25.4	46.9