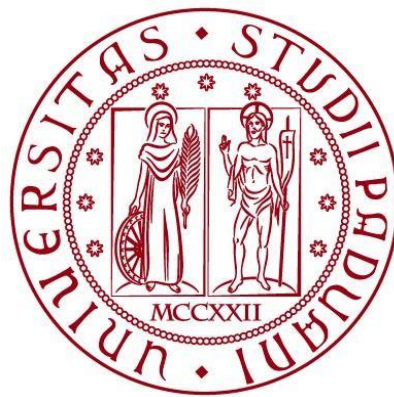


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



TESI DI LAUREA

Energie rinnovabili e agricoltura: opportunità e limiti dei sistemi agrivoltaici

Relatore: Prof. Salvatore Pappalardo

Laureando: Riccardo Bellon

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

ABSTRACT

Le ricerche scientifiche circa gli impianti agrivoltaici si sono ampiamente diffuse negli ultimi anni, trainate dalla necessità di mitigare i cambiamenti climatici producendo energia da fonti rinnovabili. Per conciliare produzione di energia elettrica e coltivazione per scopo alimentare i sistemi agrivoltaici (*AV agrivoltaic system*), ovvero impianti fotovoltaici realizzati su terreni agricoli con pannelli fissi o mobili, sono basati sul concetto di condivisione della radiazione solare con le colture sottostanti. Il presente lavoro di tesi intende esplorare la recente produzione scientifica circa l'uso di impianti agrivoltaici (IAV), effettuando una ricerca bibliografica e bibliometrica sulla banca dati *Scopus*. Gli *output* della ricerca bibliografica derivano da sperimentazioni in diverse aree geografiche, selezionando aree tematiche: ingegneria ed energia, agricoltura e scienze ambientali. Gli articoli selezionati comprendono numerosi casi studio, con diverse colture sperimentali e differenti IAV. La tesi è suddivisa in due parti principali: la prima tratta l'analisi tramite i risultati ottenuti dalla funzione *analyze results* di *Scopus*, ovvero una revisione della bibliografia presente con i seguenti criteri di ricerca: *agrovoltaic*, *agrophotovoltaic*, *agrivoltaic* e *agrivotovoltaic*; la seconda parte è costituita da un'analisi ed elaborazione dei dati estrapolati da articoli con sperimentazioni colturali comuni, quali mais, grano, lattuga, patate e vari ortaggi. Si è infine trattato il tema della variabilità delle rese agricole rispetto ad una coltura tradizionale, ovvero senza copertura fotovoltaica. L'analisi bibliografica indica che le ricerche sperimentali sull'agrivoltaico si sviluppano principalmente a partire dall'ultimo decennio; le analisi sui metadati suggeriscono che le rese produttive agricole, in alcuni casi, sembrano essere simili a quelle a conduzione convenzionale; in altri casi le specie di interesse agronomico selezionate non mostravano rese compatibili con la produzione agricola. Inoltre, si sono discusse le variazioni microclimatiche causate dall'ombra in funzione della densità dei pannelli sviluppatasi al di sotto dell'impianto; tali variazioni microclimatiche sembra possano creare dei benefici per le colture in climi caldi e aridi attraverso l'ombreggiamento e il miglioramento del contenuto d'acqua nel suolo. Dall'evoluzione del numero di articoli scientifici e dalle sperimentazioni svolte sia in ambito ingegneristico che in quello agronomico, l'interesse per lo sviluppo di IAV è indubbiamente in forte crescita. Tuttavia, alcuni elementi legati sia alla produttività agronomica ed energetica che a quella della sostenibilità ambientale rimangono da esplorare e validare.

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
1.1	SISTEMI AGROVOLTAICI (AV).....	1
1.2	STRUTTURE AGRIVOLTAICHE.....	2
1.3	TERRENI “AGRIVOLTAICI” VERSUS TERRENI AGRICOLI A GESTIONE CONVENZIONALE	4
1.4	VARIAZIONI MICROCLIMATICHE	5
2	MATERIALI E METODI	7
2.1	METODI	7
2.2	MATERIALI.....	9
2.2.1	PROGRAMMI UTILIZZATI.....	9
2.2.2	ARTICOLI ESAMINATI.....	11
3	RISULTATI.....	15
3.1	ANALISI BIBLIOMETRICA.....	15
3.2	ANALISI DELLE SPERIMENTAZIONI AGRIVOLTAICHE	19
4	CONCLUSIONI	27
5	BIBLIOGRAFIA	29

1 INTRODUZIONE

1.1 SISTEMI AGROVOLTAICI (AV)

La richiesta mondiale di energia è in continuo aumento a causa del notevole incremento della popolazione globale (Amaducci et al., 2018), la quale si stima che arriverà a 9-10 miliardi di persone nel 2050 (Valle et al., 2017) e della richiesta sempre più elevata di energia da parte delle industrie (Amaducci et al., 2018). Al fine sia di mitigare le emissioni di gas climalteranti, ma anche di soddisfare le esigenze energetiche il settore dell'energia solare ha la crescita più celere nel mondo (Chirinda et al. n.d.). L'uso di impianti solari fotovoltaici a terra implica l'utilizzo di enormi quantità di terreno in relazione alla stessa quantità di energia prodotta da fonti non rinnovabili, la quale produzione richiederebbe aree molto inferiori (Adeh et al., 2018); ciò si scontra con il fatto che per soddisfare l'enorme richiesta di terre arabili destinate alla produzione alimentare servirebbero immense aree; perciò, si genera un problema di occupazione del terreno. Per conciliare queste due necessità, produzione di energia solare e coltivazione per scopo alimentare, si ricorre oggi allo sviluppo e messa in posa di IAV. Tale concetto è stato sviluppato per la prima volta nel 1982 (Weselek et al., 2019) ed ha avuto istituzione ufficiale nel 2011 da parte di Dupraz et al. (2011), si parla di un modello che si basa sulla condivisione solare tra coltivazione di colture in un campo al di sotto di un impianto di pannelli fotovoltaici destinati alla produzione di energia elettrica (Marrou, Wery, et al., 2013; Martínez et al., 2022). In questa tesi verranno analizzati i riscontri ottenuti da un campo coperto da sistema fotovoltaico contro un terreno esposto totalmente alle condizioni atmosferiche (sistema colturale convenzionale) in termini di benefici energetici ed economici, produzione in termini di raccolto e conservazione dell'acqua nel suolo, tenendo conto che esso è un fenomeno di difficile interpretazione in quanto esso è ancora un ambito poco studiato (Barron-Gafford et al., 2019). L'elemento fondamentale su cui si basa un IAV è la gestione della luce solare catturata dalle piante coltivate; l'ottimizzazione può essere gestita tramite la densità dei pannelli fotovoltaici ed il tipo di sistema (se fisso o ad inseguimento solare) (Marrou, Wery, et al., 2013). In questa tesi viene effettuata un'analisi bibliografica e bibliometrica sulla banca dati Scopus riguardo gli IAV al fine di trarne una panoramica generale sotto gli aspetti di ombreggiamento da parte dei pannelli, sugli impatti microclimatici e sulla produttività agricola.

1.2 STRUTTURE AGRIVOLTAICHE

Nella fase di progettazione degli IAV è necessario identificare un compromesso tra energia prodotta e produzione agricola. Questa “simbiosi” è governata principalmente dalla densità dei pannelli e dall’inclinazione dei moduli fotovoltaici (Dupraz et al., 2011). Il primo concetto di IAV fu elaborato nel 1982 da Goetzberger e Zastrow, i quali sostenevano che, sollevando i pannelli a due metri dal suolo e distanziando tra loro le corsie fotovoltaiche, fosse possibile utilizzare un terzo della radiazione solare per la produzione agricola (figura 1). Come segnalato da Dinesh & Pearce (2016) e Weselek et al (2019), questo modello tuttavia presenta alcune importanti criticità nel medesimo design, contemplando di produrre energia con una notevole riduzione della la superficie coltivata.



Figura 1 - layout rappresentativo impianto solare a terra (Dinesh & Pearce, 2016)

I primi siti sperimentali di IAV sono stati osservati e presi in causa dall’anno 2010 in poi, primo tra tutti è l’IAV situato a Montpellier (Francia), studiato nelle ricerche di Dupraz et al. (2011), Marrou, Dufour, et al. (2013) e Marrou, Wery, et al. (2013). Nei moderni IAV i moduli fotovoltaici sono posti ad una altezza (z) compresa tra i quattro e i cinque metri, al fine di permettere il passaggio delle macchine agricole utilizzate per le lavorazioni; i pilastri di sostegno delle file fotovoltaiche sono invece posizionati ad una distanza (y) superiore a sei metri (Valle et al., 2017) in modo da permettere spazio di manovra per le macchine operatrici (Dinesh & Pearce, 2016; Valle et al., 2017), come illustrato in figura 2.

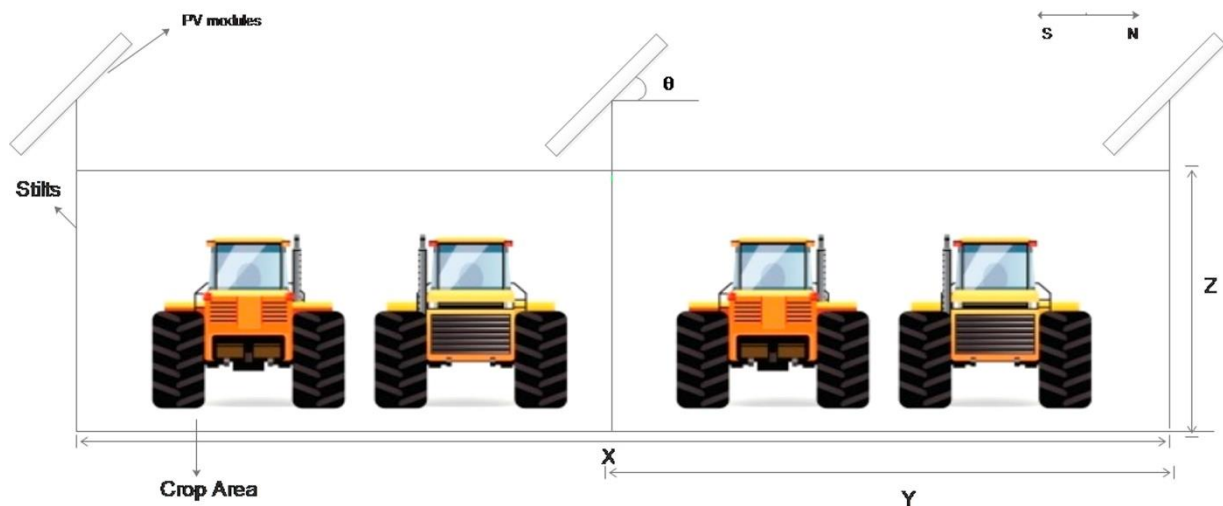


Figura 2 - layout rappresentativo impianto agrovoltaiaco con pannelli fissi (Dinesh & Pearce, 2016)

Il parametro fondamentale che regola la quantità di radiazione trasmessa alle colture su cui si basa un IAV è la densità dei pannelli solari; essa può essere indicata come Half Density (HD) oppure tramite il Full Density (FD). Come rappresentato in figura 3 questo parametro esprime la vicinanza tra due file di moduli solari: in HD la distanza è di 3.2 m mentre in FD è di 1.6 m (Dupraz et al., 2011; Dinesh & Pearce, 2016).

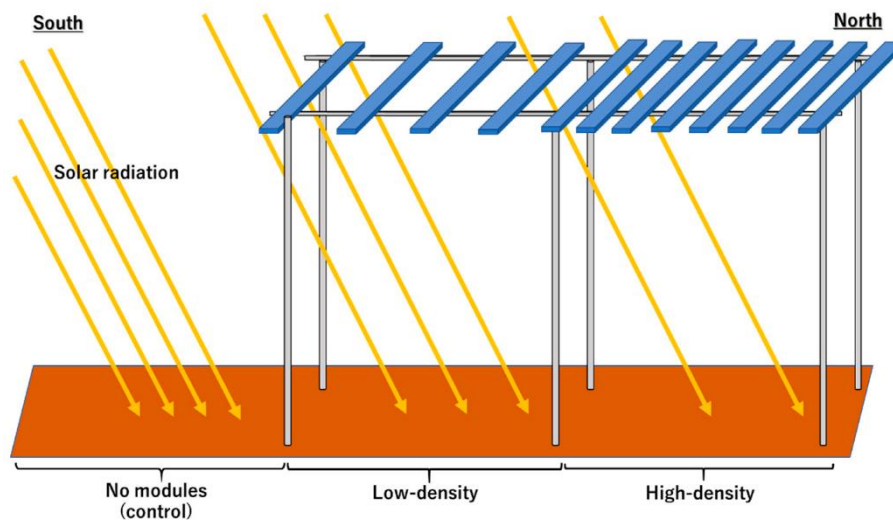


Figura 3 - configurazione grado di ombreggiamento, rispettivamente: campo aperto, HD e FD (Sekiyama & Nagashima, 2019)

Nei sistemi precedentemente descritti si fa riferimento ad impianti fissi, in cui i pannelli non variano il loro angolo di inclinazione verso il sole. In alcuni impianti, tuttavia, sono presenti strutture mobili in grado di far ruotare il pannello solare tramite dei motori elettrici in modo tale da seguire il percorso del sole e massimizzare l'intercettazione della radiazione da parte dei pannelli (Valle et al., 2017; Weselek et al., 2019; Ramos-Fuentes et al., 2023). Questa caratteristica viene riportata con la sigla *solar tracking* (ST) oppure *control tracking* (CT): nel primo caso il processo di inseguimento è

completamente automatizzato tramite sensori a discapito di ciò che avviene nel secondo caso in cui il procedimento è controllato da un operatore.

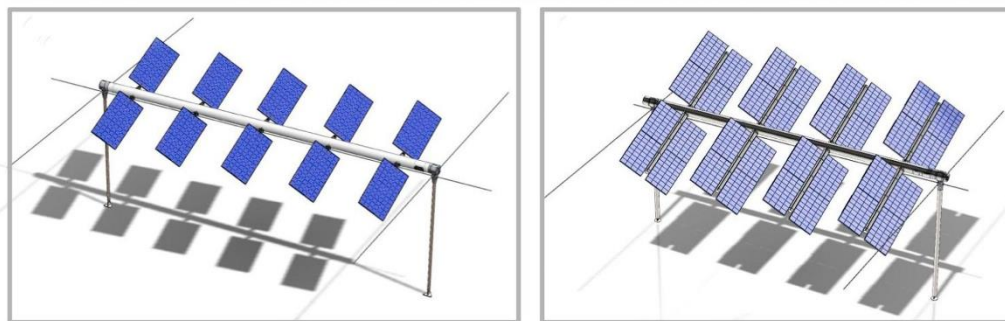


Figura 4 - rappresentazione sistema agrivoltaico mobile ad inseguimento solare in HD ed FD
(Amaducci et al., 2018)

In figura 4 è rappresentato un IAV, nello specifico situato a Castelvetro (PC) per la coltivazione di mais (Amaducci et al., 2018), sintetizza bene un impianto mobile con tracciamento solare, partendo dall'immagine di sinistra a quella di destra è rappresentato un sistema in HD ed uno in FD.

1.3 TERRENI “AGRIVOLTAICI” VERSUS TERRENI AGRICOLI A GESTIONE CONVENZIONALE

Osservando la figura 2 si può osservare che i pannelli non sono distribuiti in modo omogeneo ma sono disposti a settori; in tal modo è possibile differenziare due zone: una al di sotto della fila di pannelli solari dove l'ombra è più intensa ed una in corrispondenza delle zone scoperte tra le file fotovoltaiche, all'interno della quale l'ombra si verifica solo in determinati periodi della giornata (Amaducci et al., 2018). Tuttavia, sono ancora poche oggi giorno le informazioni circa la resa agricola all'ombra delle specie coltivate più comuni; un dato riscontrato è che per un livello di ombreggiatura di oltre il 75% diminuiscono le rese per la maggior parte delle piante (Dupraz et al., 2011). Inoltre, a differenza di in un campo in piena esposizione, in un IAV, in caso di precipitazioni, si possono delimitare tre aree diverse: (I) zone tra le file fotovoltaiche o tra i pannelli stessi, le quali ricevono lo stesso volume di pioggia di un campo normale (di controllo), (II) la fetta di terreno al di sotto dei moduli è soggetta a esigue quantità di pioggia rispetto a condizioni normali, (III) la striscia nella quale i pannelli (inclinati o messi in posizione piatta) scaricano il volume precipitato (Elamri et al., 2018; Weselek et al., 2019). Risulta quindi evidente uno squilibrio nella distribuzione della precipitazione in un IAV rispetto ad un campo a cielo aperto. Secondo lo studio eseguito da Elamri et al. (2018) a seguito di un evento di pioggia nei primi trenta centimetri del terreno il contenuto d'acqua nelle varie

zone (I,II,III) presenta un'importante variabilità (Adeh et al., 2018; Dupraz et al., 2011; Elamri et al., 2018; Weselek et al., 2019). Da uno studio sviluppato da Elamri et al., (2018) si ricava che successivamente ad un evento di pioggia di 60 mm nella zona di controllo e nel campo con IAV è stato rilevato una variazione del contenuto idrico nel suolo di 91 mm in zona I caratterizzata da condizioni iniziali più secche rispetto a zona II e III, le quali hanno registrato rispettivamente un accumulo di 76 mm e 43 mm con notevoli zone di ristagno. In relazione a ciò che è stato dimostrato che il fenomeno di redistribuzione dell'acqua piovuta interessa solo la superficie del suolo (primi 30 cm); perciò, i pannelli in posizione piatta rappresentano una problematica, in quanto la caduta di acqua da diversi metri d'altezza può danneggiare le foglie delle piante, compattare il terreno, creare crosta ed erodere il suolo generando zone di deflusso marcate (Elamri et al., 2018). Per far fronte a eventi piovosi consistenti Elamri et al. (2018) dimostra che è necessario agire attraverso l'angolo di inclinazione del pannello per redistribuire in modo omogeneo la precipitazione.

1.4 VARIAZIONI MICROCLIMATICHE

A seguito delle implicazioni sulla gestione del campo descritte precedentemente si pone l'analisi sulle variazioni delle condizioni microclimatiche al di sotto dell' IAV, le quali hanno delle ricadute sulla resa produttiva della coltura. La diminuzione della radiazione solare al di sotto dei pannelli fotovoltaici risulta essere il cambiamento delle condizioni ambientali più consistente secondo Weselek et al. (2019) sono presenti, tuttavia, anche altri fattori microclimatici influenzati dall'IAV che modificano la resa agricola: (1) temperatura dell'aria, (2) umidità, (3) velocità del vento, (4) direzione del vento, (5) temperatura del suolo, (6) umidità del suolo e (7) temperatura del raccolto (Mamun et al., 2022). Partendo dalla temperatura dell'aria al di sotto dei pannelli lo studio di Weselek et al. (2019) afferma che in giornate non ventose ed a elevata radiazione solare la temperatura tende ad essere più elevata rispetto ad un campo a pieno sole; tuttavia, altri studi hanno dimostrato che la temperatura massima registrata al di sotto del campo solare è risultata inferiore a condizione di cielo aperto. Per tali ragioni, secondo gli studi di Adeh et al. (2018) e Mamun et al. (2022) la temperatura dell'aria può essere considerata simile sia sotto l'IAV che in campo aperto. Un altro fenomeno ragguardevole secondo Adeh et al. (2018) e Mamun et al. (2022) è che la temperatura dell'isola di calore generata da un IAV è inferiore della temperatura dell'isola di calore di un impianto solare a terra è maggiore (Adeh et al., 2018; Mamun et al., 2022). Secondo Adeh et al. (2018) e Mamun et al. (2022) l'umidità riscontrata al di sotto di IAV è leggermente più alta rispetto a campo normale ma ciò che rende vantaggioso un IAV è la capacità di trattenere l'umidità e non disperderla durante l'arco del giorno. Velocità e direzione del vento hanno riportato differenze significative rispetto a campo aperto registrando valori di velocità e direzione fortemente eterogenee a diverse altezze al di sotto del sistema fotovoltaico, il fenomeno, studiato da Adeh et al. (2018) descrive inizialmente il flusso di vento che viene incanalato lungo le file fotovoltaiche ed a seconda dell'altezza della coltura viene riorientato perpendicolarmente alle file di pannelli solari (Mamun et al., 2022). Dagli studi condotti

da Amaducci et al. (2018), Graham et al. (2021) e Mamun et al. (2022) si ricava che la temperatura del suolo al di sotto della copertura solare registra una riduzione: essa varia in funzione del tipo di pianta e soprattutto in base alla copertura che la coltura sviluppa nel terreno. L'umidità presente nel suolo varia a seconda della copertura fogliare che sviluppa la pianta (Adeh et al., 2018) ed è condizionata dalle diverse zone di "precipitazione" (se sotto pannello, zona scarico oppure parte aperta) (Mamun et al., 2022). Solamente un articolo tratta la temperatura fogliare del raccolto, Marrou, Wery, et al. (2013) il quale dimostra che essa non registra differenze significative nonostante la diversa ombreggiatura tra campo con IAV e campo a cielo aperto (Mamun et al., 2022).

2 MATERIALI E METODI

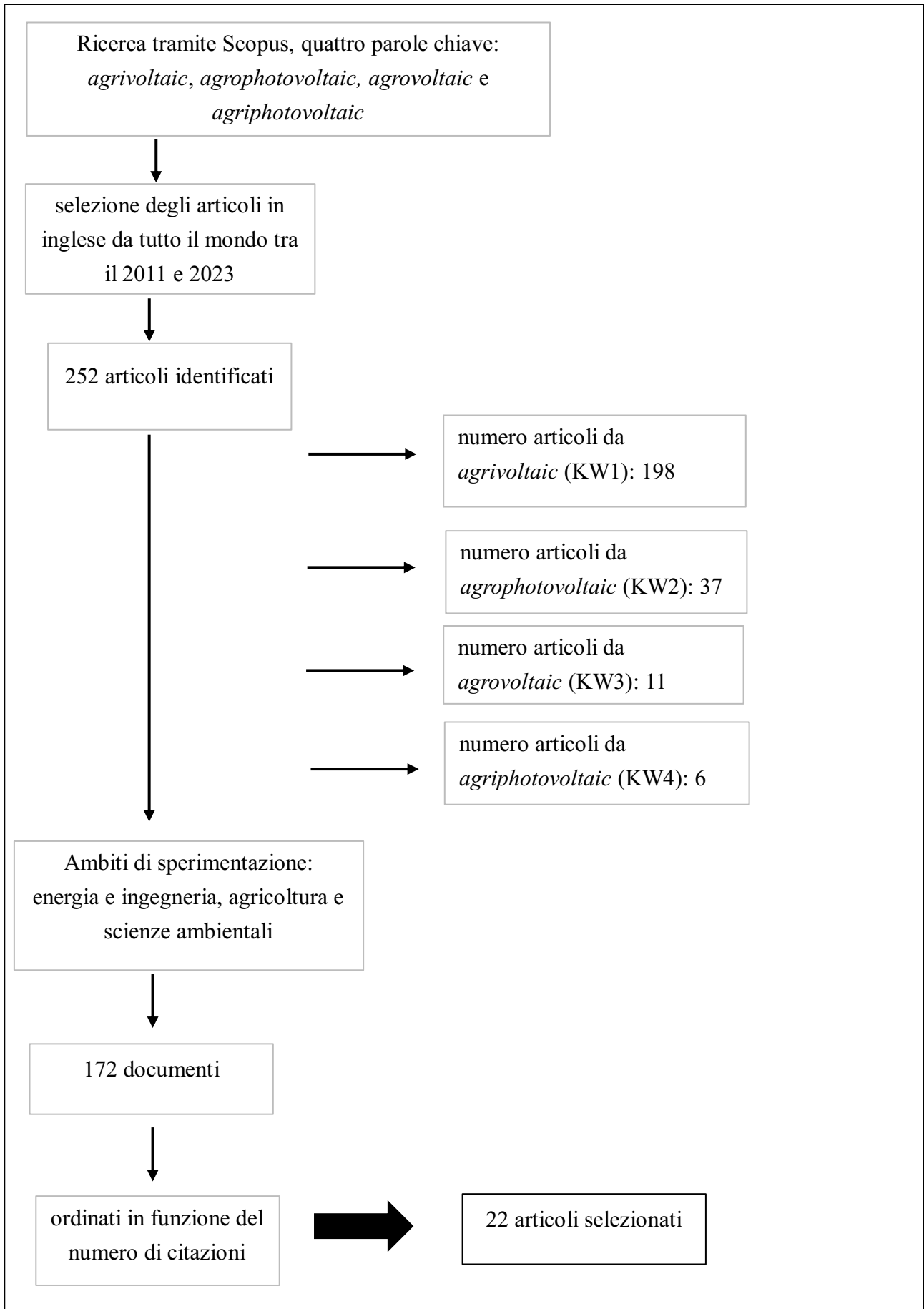
2.1 METODI

La tabella 1 presenta i filtri e i criteri secondo i quali è stata svolta la ricerca degli articoli scientifici nel database Scopus. La ricerca è stata condotta utilizzando quattro parole chiave presentate in tabella 1, quali: *agrivoltaic* (KW1), *agrophotovoltaic* (KW2), *agrovoltaic* (KW3) e *agriphotovoltaic* (KW4). Le parole chiave sono state utilizzate inizialmente per compiere una ricerca singola, al fine di trovare documenti che presentassero nei campi: titolo, abstract o sezione parole chiave; la corrispondenza della KW utilizzata. Al fine di avere una visione più ampia del materiale a disposizione è stata eseguita una ricerca combinata utilizzando tutte e quattro le KW, questo è stato possibile grazie alla funzione *add search* di *Scopus* unita dall'abilità *OR*, la quale permette che una ricerca risulti valida in corrispondenza di almeno una KW e non necessariamente la coesistenza di tutte e quattro in un articolo.

Tabella 1 - riassume i parametri e filtri inseriti su *Scopus*

Numero parole chiave	Parole chiave	ordine
KW1	TITLE-ABS-KEY (agrivoltaic)	Dal più citato al meno
KW2	TITLE-ABS-KEY (agrophotovoltaic)	Dal più citato al meno
KW3	TITLE-ABS-KEY (agrovoltaic)	Dal più citato al meno
KW4	TITLE-ABS-KEY (agriphotovoltaic)	Dal più citato al meno
Filtri	Lingua: inglese; Nazioni: tutto il mondo; Tipologia: articoli e revisioni	

In seguito ai risultati ottenuti dalla ricerca eseguita secondo i criteri esposti in tabella 1 è stato affrontato un processo di selezione del materiale da analizzare, ovvero la ricerca degli articoli che più corrispondevano utili allo scopo della tesi, il procedimento di vagliatura è rappresentato nel seguente diagramma di flusso.



Il diagramma di flusso soprastante descrive completamente come si è svolta la ricerca degli articoli all' interno del database Scopus ed il processo di selezione per ricavare il materiale poi successivamente analizzato ed elaborato per la tesi. La ricerca della documentazione descritta in tabella 1 ha portato come output una totalità di 252 articoli (articoli e revisioni) ricavati dalla ricerca combinata delle quattro parole chiave (KW1+KW2+KW3+KW4) pubblicati tra il 2011 e l'anno corrente 2023. Rispettivamente per agrivoltaic (KW1) sono risultati 198 documenti che rappresentano la maggioranza degli output (78.6%), proseguendo con agrophotovoltaic (KW2), agrovoltaic (KW3) e agrifotovoltaic (KW4) risultano rispettivamente 37 (14.8%), 11 (4.3%) e 6 (2.3%) articoli. Questo numero di 252 documenti corrisponde a quelli ricadenti in tutte le aree tematiche oggetto d'indagine; per restringere il campo di ricerca sono stati tenuti in considerazione unicamente gli articoli ricadenti nei temi ingegneria ed energia, agricoltura e scienze naturali ottenendo un totale di 172 articoli. Per facilitare la lettura in modo da analizzare i testi più rilevanti essi sono stati ordinati dal più citato al meno e al termine del processo di vagliatura sono stati selezionati 22 articoli, tra cui revisioni e casi studio di varie colture in IAV.

2.2 MATERIALI

2.2.1 PROGRAMMI UTILIZZATI

Per la ricerca del materiale bibliografico, analisi ed elaborazione sono stati utilizzati diversi programmi e piattaforme di seguito elencate.

Per la ricerca dei documenti è stato utilizzato il database ed i tool Scopus, ovvero un archivio digitale che permette di avere accesso a milioni di documenti certificati a seguito di peer review. Un'altra importante funzione della banca dati utilizzata ricade in "analyze search results", tramite la quale si possono generare tabelle e grafici sulla base dei risultati ottenuti; nel caso in esame sono stati utilizzati in modo diretto, inserimento nel documento di grafici "Documents by year" e "Documents by subject area" e, in forma indiretta, estrapolando i dati da tabelle e grafici per crearne di nuovi come nel caso di figura 7 "number of documents for country".

Nella fase di organizzazione ed elaborazione del materiale selezionato sono stati utilizzati Microsoft Word e Microsoft Excel. Il primo software, oltre che per la redazione del documento, è stato utilizzato per l'organizzazione e gestione della bibliografia tramite un client dedicato.

L'impiego del foglio di calcolo Excel di Windows ha giocato un ruolo chiave per l'elaborazione e preparazione del materiale: grazie ad esso è stato possibile organizzare la bibliografia completa degli articoli presi in esame, creare una diagramma di flusso presente nella sezione metodi, il quale illustra il percorso di ricerca degli articoli tramite Scopus. Sono state realizzate le seguenti tabelle, grafici e cartografie..

Datawrapper online è un creatore di grafici, mappe e tabelle interattive, in questo caso partendo da una tabella *Excel* a 2 colonne rappresentanti i paesi produttori di documenti e il numero di documenti prodotti dal 2011 ad oggi è stata creata una mappa coropletica, figura 7.

Il software *Google Earth Pro* (GEP) è stato utilizzato per la mappatura delle aree degli IAV analizzati nella tesi. Inserendo le coordinate geografiche degli IAV presenti negli articoli è stato possibile geolocalizzarli quasi nella totalità, a discapito di due siti studio i quali non presentano coordinate abbastanza precise, infine tramite la funzione “aggiungi poligono” è stato tracciato il perimetro del campo e visualizzata la sua area nella sezione “misurazioni”.

Google MyMaps è uno strumento contenuto in *Google Maps* che permette di creare dei cartogrammi, in figura 8, è stato creato un cartogramma dei vari siti studio di IAV analizzati nella tesi.

2.2.2 ARTICOLI ESAMINATI

Al fine di organizzare il materiale analizzato ed elaborato è stata creata la seguente tabella (tabella 2) che caratterizza i 22 gli articoli ricavati da Scopus. Ogni singolo documento è stato organizzato secondo le colonne, partendo da sinistra verso destra, primo autore dell'articolo, anno di pubblicazione, numero di citazioni totali da quando è stato pubblicato, il tipo di documento (se revisione o articolo), il nome del giornale e dell'ente pubblicante, se l'articolo dispone di accesso aperto e infine il paese in cui è stato scritto il documento.

Tabella 2 – contiene tutti gli articoli selezionati da *Scopus* necessari allo svolgimento della tesi

Primo autore	anno	citazioni	tipo	Nome giornale/conferenza	Ente pubblicante	open access	Paese di produzione
Dupraz Christian et al.	2010	319	Articolo	Renewable Energy	Elsevier	No	Francia
Harshavardhan Dinesh et al.	2016	256	Revisione	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Elsevier	Si	Usa
Greg A. Barron-Gafford et al.	2019	207	Articolo	Nature Sustainability	Nature	Si	Usa
Marrou Hélène et al.	2012	173	Articolo	European Journal of Agronomy	Elsevier	Si	Francia
Weselek Axel et al.	2019	158	Revisione	Agronomy for sustainable development	Springer-Verlag France	Si	Germania
Amaducci Stefano et al.	2018	155	Articolo	Applied Energy	Elsevier	No	Italia
Elnaz Hassanpour Adeg et al.	2017	113	Articolo	PLoS ONE	PLoS ONE	Si	Usa

Marrou Hélène et al.	2013	100	Articolo	European Journal of Agronomy	Elsevier	No	Francia
Valle Benot et al.	2017	99	Articolo	Applied Energy	Elsevier	No	Francia
Sekiyama Takashi et al.	2019	94	Articolo	Environments	-	Si	Giappone
Mamun Mohammad Abdullah Al et al.	2022	40	Revisione	Renewable and sustainable energy reviews	Elsevier	No	Australia
Jaiyoung Cho et al.	2020	25	Articolo	Energies	MDPI	Si	Korea
Weselek Axel et al.	2021	24	Articolo	Agronomy for sustainable development	MDPI	Si	Germania
Elamri Yassin et al.	2018	23	Articolo	Hydrology and Earth System Sciences	Copernicus GmbH	Si	Francia
Maggie Graham et al.	2021	20	Articolo	Scientific reports	Nature	Si	Usa
Sojung Kim et al.	2021	15	Articolo	Agronomy	MDPI	Si	Korea
Hudelson Timothy et al.	2021	9	Carta di conferenza	AIP Conference Proceedings	AIP publishing	No	Usa
Brecht Willockx et al.	2020	6	Articolo	Renewable Energy and Power Quality Journal	European Association Development of Renewable Energies, Environment	Si	Belgio

and Power
Quality

Leroy J. Walston et al.	2022	4	Revisione	Frontiers in Sustainable Food Systems	Frontiers	Si	Usa
Aidana Chalgynbayeva et al.	2022	3	Revisione	energies	MDPI	Si	Ungheria
M. Varo Martínez et al.	2022	2	Articolo	Renewable Energy and Power Quality Journal	European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality	Si	Spagna
Isaac A. Ramos- Fuentes et al.	2023	0	Articolo	Agricultural water management	Elsevier	Si	Francia

3 RISULTATI

3.1 ANALISI BIBLIOMETRICA

L'analisi bibliometrica è stata condotta sulla base degli articoli che, in seguito all' inserimento dei filtri elencati nel capitolo precedente, sono risultati utili allo svolgimento dell'analisi. I dati sono stati elaborati in modo diretto tramite l'utilizzo dello strumento *analyze search results* per essere rappresentati nelle figure cinque e sei; la mappa coropletica in figura 7 è stata invece elaborata tramite il *software Datawrapper*.

Nell'immagine sottostante (Figura 5) è rappresentato un grafico con in ascissa una scala temporale rappresentante gli anni e in ordinata il numero di documenti al fine di illustrare l'andamento in un arco di tempo poco più che decennale, dal 2011 al 2023, il numero di articoli riguardanti l'ambito agrivoltaic, agrovoltaic, agriphotovoltaic e agrophotovoltaic pubblicati ogni anno in tutto il mondo.

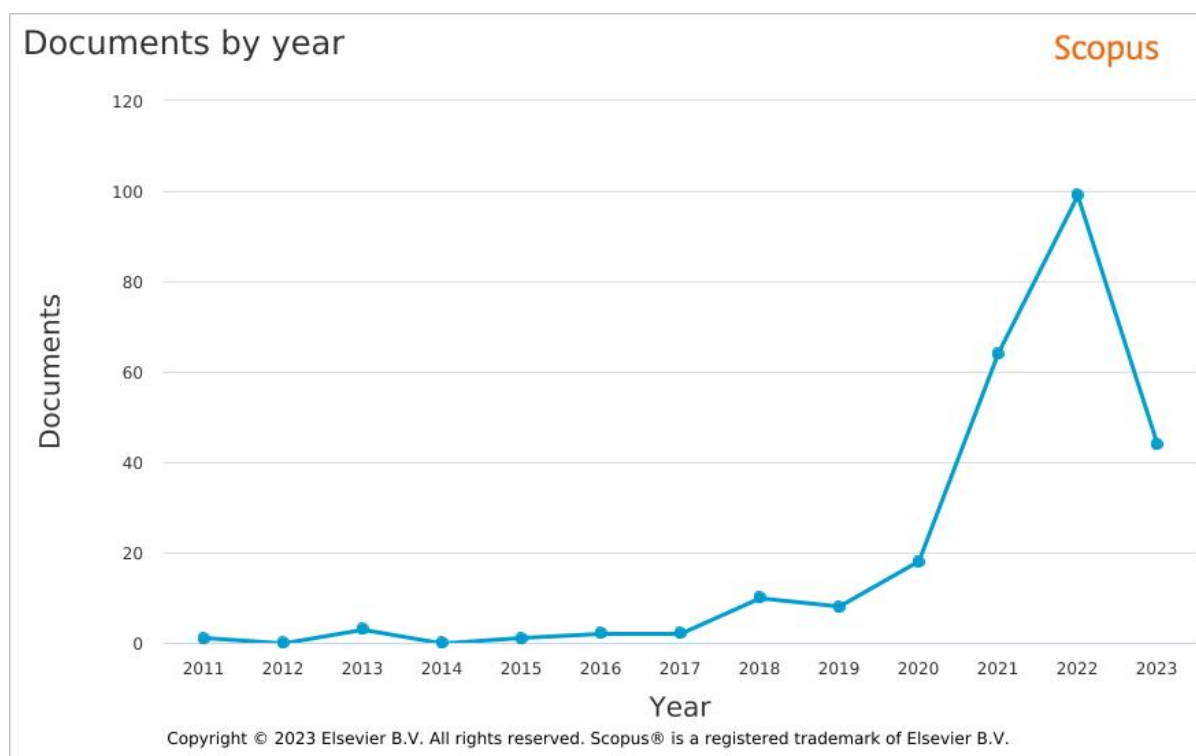


Figura 5 – grafico rappresentante il numero di documenti riguardo l'ambito agrivoltaico prodotti ogni anno dal 2011 al 2023; *Scopus*

Il grafico mostra un trend di pubblicazione statico dal 2011 al 2017; a partire da quest'ultimo anno si nota una leggera crescita sino al 2020 (15-20 pubblicazioni), per poi “impennarsi” sino al 2022 (100 articoli). Per quanto riguarda il 2023 ancora non è possibile trarre delle conclusioni ma vale la pena far notare che in soli cinque mesi il numero di pubblicazioni è pressoché la metà di quelle del 2022.

Il grafico a torta (figura 6) raffigura tramite ogni spicchio la percentuale di articoli ricavati tramite la ricerca Scopus, che ricadono in ogni campo tematico.

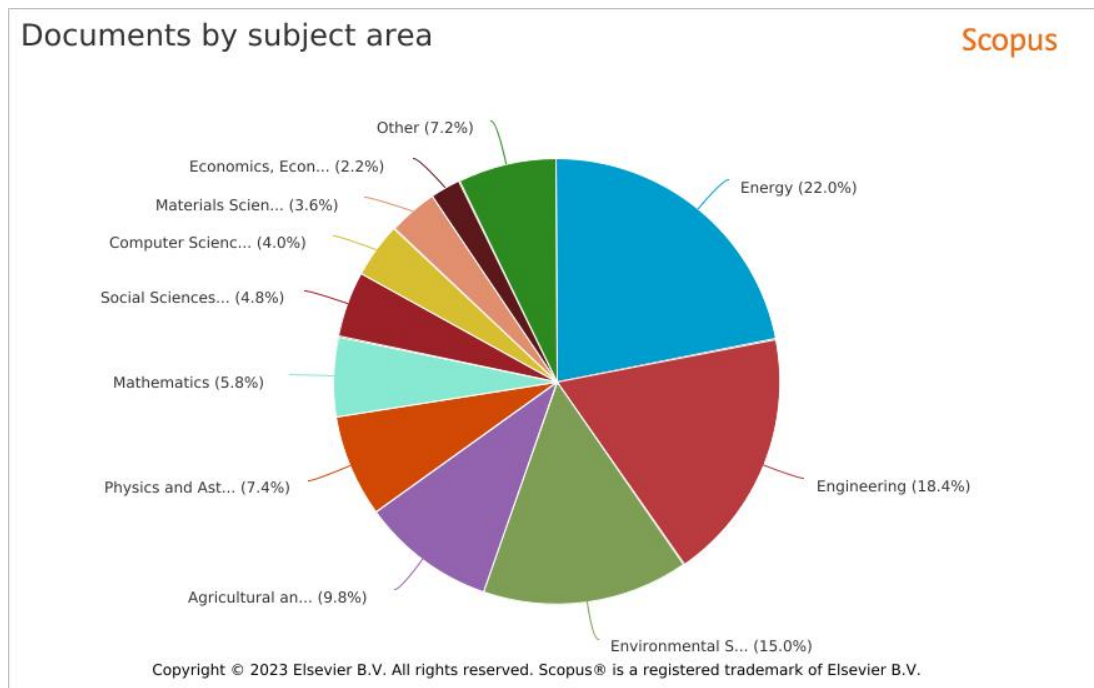


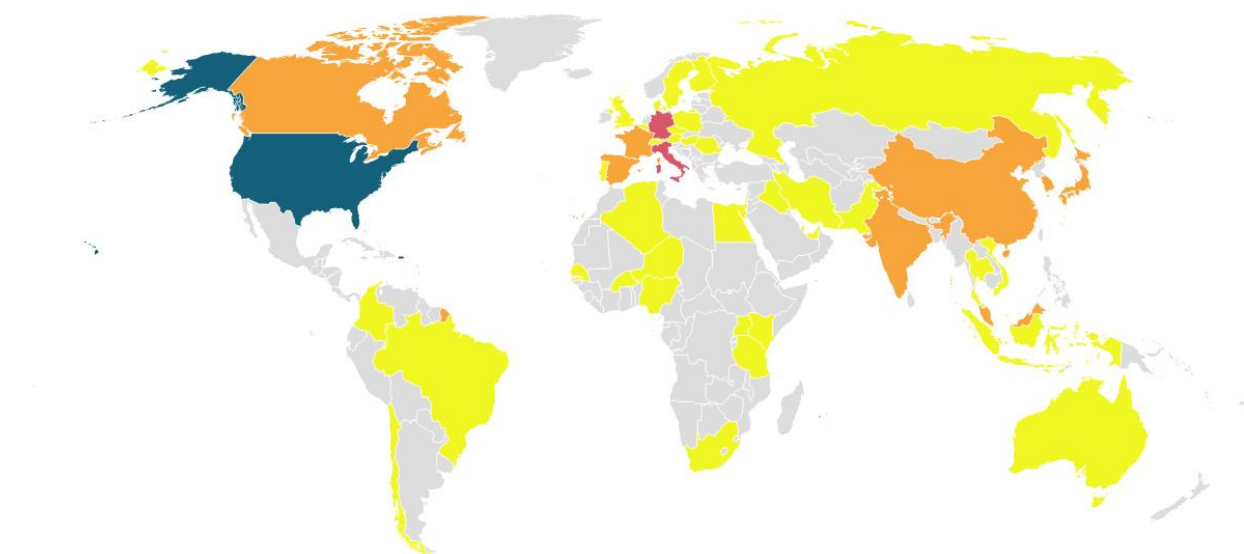
Figura 6 – grafico a torta che illustra la percentuale di documenti rientranti per ogni area tematica riguardo l’argomento agrivoltaico; *Scopus*

Si nota dalla figura 6 che gli articoli ricadenti nei settori fino alla tesi rappresentano il 65% del totale, per la precisione *energy and engineering* coprono il 40% e a seguire *environmental science* contribuisce con il 15% e *agricultural* con il 10%.

La mappa coropletrica seguente in figura 7 creata tramite *Datawrapper*, illustra mediante una scala di colori dal giallo al blu il numero di articoli riguardo l’argomento agrivoltaico che ogni paese ha prodotto dal 2011 ai giorni odierni. In giallo sono rappresentati i paesi produttori tra zero e 11 documenti, in arancione quelli tra 11 e 21, con il colore rosa gli stati produttori tra 21 e 31 documenti e infine con il colore blu solamente gli Stati Uniti con la produzione di oltre 51 articoli.

number of documents for country

■ <11
 ■ 11-21
 ■ 21-31
 ■ ≥51



Created with Datawrapper

Figura 7 – mappa coropletrica che rappresenta il numero di documenti prodotti da ogni paese dal 2011 ad oggi; *Datawrapper*

La mappa evidenzia una forte tendenza di colore giallo e arancione indicando che la maggior parte dei paesi ha elaborato tra uno e ventuno documenti; solamente tre paesi (Italia, Germania e Stati Uniti) hanno prodotto più di ventuno articoli riguardo l'ambito agrivoltaico.

Di seguito viene illustrata la tabella 3 che raccoglie e organizza tutti i siti con IAV ricavati tra gli articoli selezionati ed esaminati nella tesi. La caratterizzazione degli IAV è organizzata secondo le colonne "Paese", tipo di coltura osservata, coordinate del campo sperimentale e, infine, l'area calcolata tramite la funzione poligono di Google Earth Pro espressa in metri quadrati.

Tabella 3 – racchiude i siti con IAV tramite coordinate geografiche esaminati nella tesi

Primo autore	Paese	Coltura	Coordinate	area (m ²)
Brecht Willockx et al.	Belgio	Patate	51.127°, 3.301°	Coordinate non abbastanza precise
Harshavardhan Dinesh et al.	Usa	Lattuga	39.0997°, -94.5783°	Coordinate non abbastanza precise

Amaducci Stefano et al.	Italia	Mais	45.09°,10.00°	70000
Weselek Axel et al.	Germania	Sedano rapa, grano invernale, patate e trifoglio	47.85°, 9.14°	30000
Valle Benot et al.	Francia	Lattuga	43.6466°, 3.8715°	1800
Marrou Hélène et al.	Francia	Lattuga, cetriolo	43.6466°, 3.8715°	1800
Isaac A. Ramos-Fuentes et al.	Francia	Mais	43.6466°, 3.8715°	1720
Hudelson Timothy et al.	Usa	Cavolo, bietola, broccoli, spinaci, peperoni pomodoro	38.531751°, -121.694959°	900
Jaiyoung Cho et al.	Korea	Uva	37°15'54.9" N 126°29'15.8" E	600
Greg A. Barron-Gafford et al.	Usa	peperoncino, jalape�o, pomodoro ciliegino	32.578989°, -110.851103°	200
Marrou Hélène et al.	Francia	Lattuga	43.6466°, 3.8715°	200
Takashi Sekiyama et al.	Giappone	Mais	35.378929°, 140.138549°	100
M. Varo Martínez et al.	Spagna	Piselli	37°49'13.3"N 5°00'15.4"W	33

Direttamente collegato alla tabella sopramenzionata segue l'elaborazione di cartografia (Figura 8) raffigurante l'esatta posizione geografica degli IAV trattati nella tesi e presenti in tabella 3: ogni pallino di posizione corrisponde al luogo in cui è avvenuto un caso studio, nell'impianto di Montpellier (Francia) hanno avuto luogo quattro casi studio differenti.

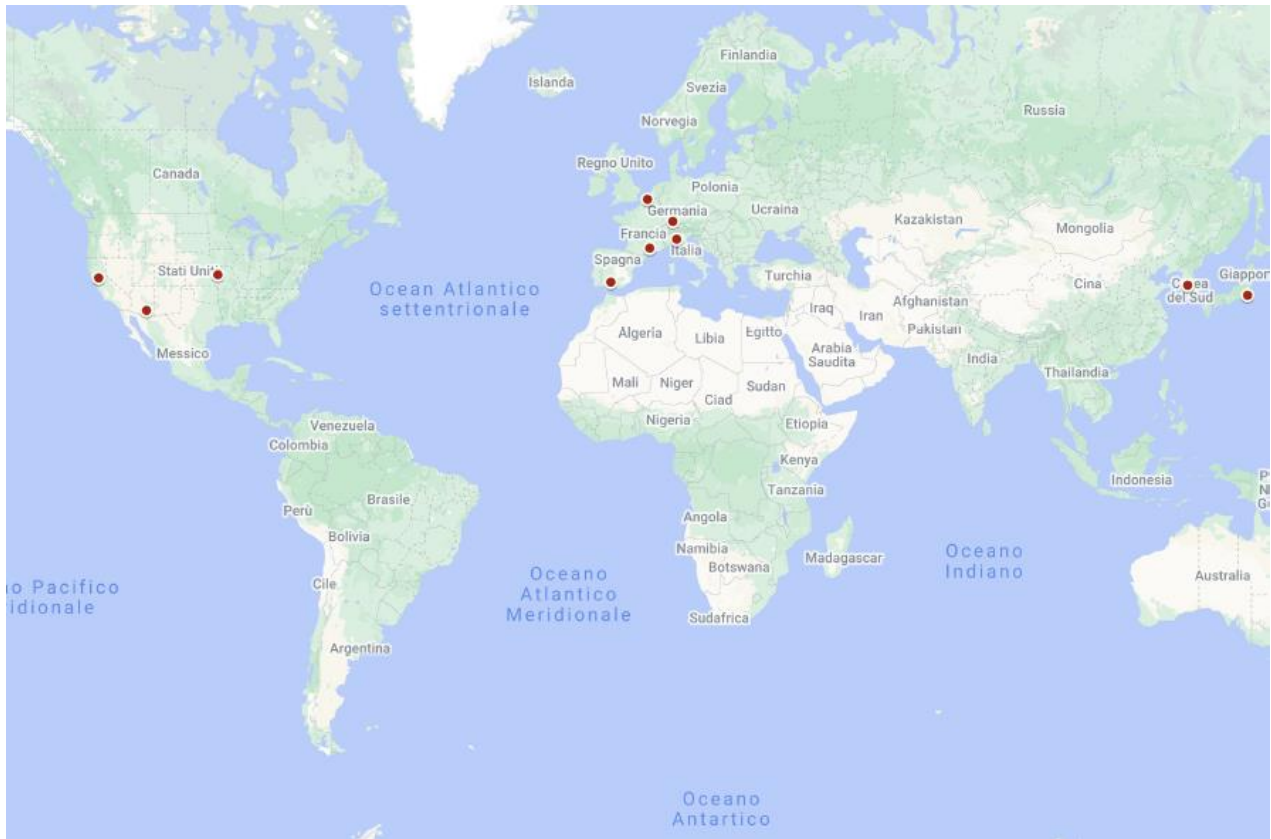


Figura 8 – cartogramma degli IAV studiati nella tesi; *Google Mymaps*

3.2 ANALISI DELLE SPERIMENTAZIONI AGRIVOLTAICHE

Il processo di elaborazione dei dati ha portato alla creazione di quattro tabelle suddivise in base al tipo di coltura, tabella 4 relativa al mais, tabella 5 e tabella 6 corrisponde agli studi sulla lattuga e infine tabella 7 racchiude patate, frumento invernale e ortaggi. In tutte le tabelle le prime tre colonne sono uguali, in ordine si trova primo autore, tipo di IAV (se fisso o a inseguimento solare) e il grado di ombreggiamento (se HD o FD).

Per valutare l'effetto che ha un IAV sulla crescita e sulla resa di un campo di mais rispetto ad un campo a pieno sole sono stati esaminati i seguenti studi: (Amaducci et al., 2018; Ramos-Fuentes et al., 2023; Sekiyama & Nagashima, 2019), i risultati ottenuti sono riportati in tabella 4; le sigle DAV (Ramos-Fuentes et al., 2023), ST1 ed ST2 (Amaducci et al., 2018) stanno ad indicare sistemi di tipo solar tracking e il loro grado di densità, HD o FD, riportati a fianco. In tabella 4 sono rappresentati la diminuzione di radiazione trasmessa alle piante per Amaducci et al., (2018) e gli intervalli che

esprimono l'aumento o la diminuzione del valore minimo (primo valore) e massimo (secondo valore) della quantità di granella e massa secca rispetto a quelli ottenuti in condizioni di *FULLsun* per Amaducci et al., (2018) e Ramos-Fuentes et al., (2023). Invece nello studio di Sekiyama & Nagashima (2019) è esposto l'andamento percentuale rispetto alla media.

Tabella 4 – risultati elaborazione articoli studio coltivazione mais in IAV

Primo autore	Tipo di pannello	Ombra %	Diminuzione radiazioni	Granella	Massa secca
Isaac A. Ramos-Fuentes et al.	Fissi				
	+	HD [30–35%]		[-10% -7%]	[-30% -28%]
	Inseguimento solare	FD [54–56%] DAV [29–38%]		[-24% -22%] [-22% -12%]	[-41% -40%] [-37% -26%]
Amaducci Stefano et al.	Fissi				
	+	F1 (HD)	[-14.6%]	[+42% -5%]	
	Inseguimento solare	ST1 (HD)	[-12.1%]	[+42% 0%]	
		F2 (FD)	[-31.8%]	[+51% -5%]	
		ST2 (FD)	[-27.9%]	[+42% 0%]	
Takashi Sekiyama et al.	Fissi	HD		[+5.7%]	[+4.9%]
		FD		[-3.6%]	[-3.1%]

Analizzando i risultati ottenuti da Ramos-Fuentes et al. (2023) lo studio ha dimostrato che l'aumento del grado di ombreggiamento corrisponde in modo inversamente proporzionale alla quantità di granella prodotta dalla coltivazione; in HD si è ottenuta la variazione minore dei valori estremi dell'intervallo, al contrario in FD si sono ottenute riduzioni maggiori tra i tre livelli di ombreggiamento. Analoga situazione ricorre in massa secca che registra un andamento dei valori in linea con quelli ottenuti dalle rese di granella.

Lo studio inoltre ha evidenziato altri fattori rilevanti per un ciclo di colture:

- A seguito di un evento di precipitazione l'essiccazione del suolo è stata più lenta poiché la densità dei pannelli era maggiore, permettendo al suolo di trattenere più acqua e diminuire le esigenze irrigue. Nel sistema DAV (con tracciamento solare) l'SWP (contenuto idrico del suolo) si è dimostrato più regolare nell'appezzamento rispetto ad HD e FD, permettendo una crescita più omogenea della pianta.
- Per quanto riguarda i trattamenti di emergenza contro i parassiti e le erbe infestanti, in DAV e HD c'è stato un ritardo di 5-7 giorni e di 10 giorni per FD, per la tassellatura (VT) in DAV e IAV half sono stati di 4-7 giorni con completa irrigazione e 4-5 giorni per deficit di irrigazione. Per *silking* (R1) con completa irrigazione in DAV e IAV half c'è stato un ritardo di 4-11 giorni e 3-5 giorni con deficit di irrigazione.

- Il LAI (indice area fogliare) è influenzato dalle radiazioni e dal grado di irrigazione, è risultato che il valore massimo è stato ricavato in condizioni di *FULLsun* e completa irrigazione. In DAV, HD e FD, in condizioni di completa irrigazione, si hanno LAI molto simili, cioè leggermente inferiori in condizioni di *FULLsun*.
- Lo studio ha dimostrato che rispetto a condizioni di *FULLsun* in DAV e HD l'irrigazione in termini di quantità di acqua utilizzata è diminuita del [-19% -35%] e in FD di un notevole [-47%].

Dai risultati ottenuti da Amaducci et al. (2018) si denota che la riduzione di radiazione trasmessa alle piante, a parità di densità tra pannelli fissi e moduli con tracciamento solare, non è significativa. Per quanto riguarda la sostanza secca ottenuta in tutti e quattro gli scenari il range di produzione è risultato costante e molto più ristretto rispetto a quello ricavato da condizioni di *FULLsun*. In media F1,ST1 e ST2 hanno registrato un valore minimo pari al 42%, superiore rispetto il 51% di F2, un valore massimo inferiore del 5% per ST1 e ST2 mentre F1 e F2 un valore non significativo.

Di notevole importanza è ciò che è stato dimostrato da Sekiyama & Nagashima (2019), i risultati dello studio da lui eseguito descrivono rese in granella di mais e massa secca che non presentano differenze significative da quelle ottenute in condizioni di *FULLsun*.

Gli studi eseguiti sulla lattuga: Dupraz et al. (2011), Marrou, Wery, et al. (2013), Dinesh & Pearce (2016) e Valle et al. (2017) hanno una frequenza più alta tra quelli analizzati nella tesi e sono organizzati in tabella 5 e tabella 6 secondo le colonne: temperatura fogliare, indice area fogliare, resa delle colture e biomassa (ad una settimana dal raccolto). I valori percentuali espressi in tabella 5 per (Marrou, Wery, et al., 2013) fanno riferimento all'andamento degli estremi dell'intervallo per il LAI e la biomassa rispetto agli esiti in condizione di *FULLsun*, ad eccezione della resa della coltivazione che è espressa come andamento sulla media. In Dinesh & Pearce (2016) i primi valori dell'intervallo fanno riferimento all'andamento medio in primavera e i successivi alla tendenza media in estate, entrambi in relazione a ciò che è stato ottenuto in condizioni di campo aperto.

Tabella 5 – risultati elaborazione articoli studio sulla lattuga coltivata in IAV

Primo autore	Tipo di pannello	Ombra %	Temperatura fogliare	LAI	Resa coltura	Biomassa
Valle Benot et al.	Fissi + Inseguimento solare	HD ST CT	[+0°C sun] [-0.6°C cloudy] [-0.1°C sun] [-0.5°C cloudy] [+0.5°C sun] [+0°C cloudy]			
Marrou Hélène et al.	Fissi	HD FD		[+25% +37%] [+26% +36%]	[-10%] [-31%]	[+3% -5%] [-17% -12%]
Harshava rdhan Dinesh et al.	Fissi	HD FD			[-1% -20%] [-21% -42%]	[-1% -19%] [-21% -42%]
Dupraz Christian et al.	Fissi	HD FD			[-17%] [-27%]	

Dallo studio condotto da Valle et al. (2017) si è certificato che la temperatura delle foglie di lattuga coltivata al di sotto di un IAV, sia nel caso di meteo soleggiato che nuvoloso, non ha registrato differenze rilevanti rispetto ad una condizione di *FULLsun*. La resa della coltivazione della lattuga, secondo Dupraz et al. (2011), Marrou, Wery, et al. (2013) e Valle et al. (2017), sotto ombreggiatura HD ha registrato un calo simile in tutti gli studi. Analoga situazione si è registrata per coltivazione sotto FD, con una diminuzione media di circa il 30% nei tre studi in esame (Dupraz et al., 2011; Marrou, Wery, et al., 2013; Valle et al., 2017). Per quanto riguarda la biomassa ad una settimana dal raccolto, secondo Marrou, Wery, et al. (2013), in HD, non si sono verificate differenze significative, in FD c'è stata una diminuzione significativa secondo Marrou, Wery, et al. (2013) e ancor più marcata secondo Dinesh & Pearce, (2016).

Lo studio di Valle et al. (2017), è stato condotto su due tipi di lattuga, raffigurati in tabella 6, i quali sono: Kiribati, il tipo uno e Maddalena, il tipo due. È stato confrontato l'andamento del valore minimo e massimo degli intervalli per il LAI e la massa secca sotto diversi gradi di ombreggiatura: HD, ST e CT, rispetto al range di risultati ottenuto in campo aperto, in diversi periodi dell'anno, rispettivamente primavera, estate e inverno.

Tabella 6 – approfondimento rese in IAV di due tipi diversi di lattuga

Tipo di lattuga	Ombratura %	LAI			Massa secca		
		primavera	estate	autunno	primavera	estate	autunno
1	HD	[+21% +24%]	[+12% +17%]	[+29% +13%]	[-25% -24%]	[-28% -34%]	[-15% +6%]
	ST	[+15% +17%]	[+23% +22%]	[-3% -8%]	[-24% -25%]	[-19% -28%]	[-15% +7%]
	CT	[+12% -3%]	[+12% +22%]		[-23% -11%]	[-14% -34%]	
2	HD	[+24% +31%]	[+42% +65%]	[+10% +15%]	[-38% -38%]	[-39% -43%]	[-29% -15%]
	ST	[+19% +21%]	[+0% +11%]	[+1% +8%]	[-29% -36%]	[-24% -37%]	[-22% -10%]
	CT	[-2% +13%]	[+10% +13%]		[-22% -14%]	[-41% -22%]	

Lo studio Valle et al. (2017) dimostra che il LAI per entrambi i tipi di lattuga non ha registrato andamenti negativi significanti per nessun grado di ombreggiatura e stagione, al contrario, si sono avuti aumenti significativi in tutti gli scenari e stagioni, ad eccezione per il tipo Maddalena in CT, durante la primavera, e ST, in autunno ed estate, durante le quali non si sono registrate differenze significative rispetto a condizione di *FULLsun*. Comportamento completamente inverso è risultato per la massa secca di entrambi i tipi di lattuga, la quale ha registrato diminuzioni significative in ogni stagione sotto tutti i livelli di ombreggiamento, indipendentemente se HD o FD, solamente in autunno la qualità Kiribati ha generato lievi riduzioni non significative.

In tabella 7 sono racchiusi gli studi di Marrou, Dufour, et al. (2013), Barron-Gafford et al. (2019), Willockx et al. (2020), Cho et al. (2020), Hudelson & Lieth, (2021), Martínez et al. (2022), Weselek et al., (n.d.), trattanti colture ortofrutticole, quali patate, cavoli, barbabietole, broccoli, spinaci, peperoni, pomodori, cetrioli, piselli e colture come grano invernale e vitigni. I risultati sono organizzati nelle ultime due colonne della tabella 7. La quinta rappresenta gli esiti delle coltivazioni e la sesta rappresenta le variazioni microclimatiche avvenute al di sotto della copertura fotovoltaica. Nell'ultima sezione dello studio trattato da Cho et al. (2020), si identificano tre diversi livelli di ombreggiamento, non riscontrati negli altri test: *normal* (pannello monofacciale), *double sided* (pannello con doppia faccia, in grado di catturare anche le radiazioni emesse dal terreno) e pannello trasparente.

Tabella 7 – risultati studio articoli trattanti coltivazione di patate, grano e ortaggi in IAV

Primo autore	Tipo di pannello	Coltura	Ombra %	Risultati coltura	Variabile microclimatiche
Weselek Axel et al.	Fissi	Grano invernale, patate	FD	Altezza piante [+12% +19.5%] [+9% +18%] LAI [+23% +35.9%] [+14.6% +53.4%] Resa colture [-18.7% +2.7%] [-18.2% +11%]	[-1.2°C -1.4°C] temperatura aria [+2%] umidità
Hudelson Timothy et al.	Inseguimento solare	Cavolo, bietola, broccoli, spinaci, peperoni pomodoro	HD	Resa colture [-15% -39%] [-17% -42%] [-96% +46%] [-95% -99%] [differenze non rilevanti] [differenze non rilevanti]	
Marrou Hélène et al.	Fissi	Cetriolo	HD FD	Massa secca [-21%] [-58%]	Evapotraspirazione [-18%] [-21%]
Brecht Willockx et al.	Fissi	Patate	HD		- [-1.65°C]giorno , temperatura dell'aria per tutto l' anno la temperatura sotto PV è rimasta inferiore a sito di controllo - umidità è minore sotto PV, solo nelle

					ore più calde 11-16 si mantiene in linea con quella del sito di controllo senza mai superarla
Greg A. Barron- Gafford et al.	Fissi	peperonci no, jalapeño, pomodoro ciliegino	FD	Resa colture [+166%] [-12%] [+79%]	Temperatura aria [-0.3°C -1.2°C] giorno [+0.4°C +0.5°C] notte [+5% +15%] umidità del suolo
M. Varo Martínez et al.	Fissi	Piselli	FD	[differenze non rilevanti]	[differenze non rilevanti]
Jaiyoun g Cho et al.	Fissi	Uva	Normale, doppia faccia, trasparen te	Numero di grani [-9% -19%] [+6% +7%] [+16% +41%] Peso grano [-4% -6%] [-4% 0%] [-13% -16%] Contenuto di zucchero [-13% +3%] [-5% -6%] [-25% -28%]	Temperature suolo [+2.26°C]

Procedendo per ordine, Weselek et al. (n.d.) dimostra che l'altezza delle piante e l'indice di area fogliare (LAI), per entrambe le coltivazioni, registrano un aumento significativo soprattutto per il LAI, a differenza della resa delle colture, la quale presenta un andamento a cavallo tra lo zero indirizzato in negativo. Willockx et al. (2020) e Weselek et al. (n.d.) provano che al di sotto di un IAV, anche a disparità di ombreggiamento, HD in (Willockx et al., 2020) e FD in (Weselek et al., n.d.), per coltivazione di grano e patate, la temperatura dell'aria è tra un grado ed un grado e mezzo centigrado

inferiore a quella in campo aperto. L'umidità dell'aria non presenta diminuzioni ma aumenti non significativi sotto l'IAV. Il test Hudelson & Lieth (2021), interamente su ortaggi sotto HD (cavoli, barbabietole, broccoli, spinaci, peperoni e pomodori), ha avuto riscontri molto importanti per cavoli, barbabietole, broccoli, spinaci. Si sono rilevate forti differenze significative in negativo, in alcuni casi fino a circa -100%, ad eccezione dei broccoli, che hanno avuto esito fortemente significativo sia in positivo che in negativo e questo rende di difficile interpretazione il risultato. Per la coltivazione di peperoni e pomodoro in HD (Hudelson & Lieth, 2021) e per piselli in FD (Martínez et al., 2022), secondo gli studi, è stato dimostrato che queste colture non hanno risentito o tratto vantaggio dall'IAV, in quanto non hanno registrato differenze significative né per variazioni microclimatiche, né per resa delle colture. Secondo Marrou, Dufour, et al. (2013), in ombreggiatura leggera HD, la massa secca e l'evapotraspirazione (evaporazione e traspirazione) subiscono un calo simile attorno al 20%, situazione che invece non avviene in FD. In quanto, l'evapotraspirazione rimane circa al 20%, ma la riduzione di massa secca diminuisce fino a quasi il 60%. La coltivazione sotto FD di peperoncino, jalapeño, pomodorino ciliegino, studiata da Barron-Gafford et al. (2019), ha dimostrato un aumento significativo dell'umidità del suolo, un aumento della temperatura dell'aria notturna di mezzo grado centigrado e una diminuzione media diurna di quasi un grado centigrado. La resa di peperoncino e pomodorino ciliegino, come dimostrato da Barron-Gafford et al. (2019), è protagonista degli aumenti più rilevanti tra gli studi presi in esame, nella tesi, al contrario, la resa di jalapeño non ha riportato differenze significative, come nel caso di Hudelson & Lieth, (2021). Il test Cho et al. (2020) descrive la coltivazione di vitigni, al sotto di tre diversi gradi di ombreggiatura, ha dimostrato che per i pannelli di tipo normale e doppia faccia sono stati registrati numero di grani, peso del grano e contenuto di zucchero, con differenze da campo aperto non significanti. Invece, per pannelli di tipo trasparente permette di avere un maggior numero di grani rispetto a *FULLsun*, ma con rilevanti differenze negative, in termini di peso e contenuto di zucchero.

4 CONCLUSIONI

La presente tesi ha cercato di esplorare e classificare la produzione scientifica circa le sperimentazioni di IAV. Nonostante una crescita notevole della produzione scientifica a partire dall'anno 2020 gli studi mostrano risultati contrastanti circa l'efficienza del sistema ibrido, soprattutto in termini di resa produttiva agricola. Weselek et al. (2019) afferma che gli IAV permettono di valorizzare il territorio consentendo la simultanea produzione di energia elettrica e attività agricole; gli IAV in luoghi caldi e aridi rappresentano una potenziale protezione per le colture riducendo l'evapotraspirazione, quindi aumentando il contenuto d'acqua nel suolo e garantendo un risparmio idrico (Weselek et al., 2019; Willockx et al., 2020). D'altro canto, Weselek et al. (2019) ribadisce che gli IAV a causa della diminuzione della radiazione disponibile e della variazione delle condizioni microclimatiche la coltivazione sotto IAV è destinata a subire un calo dei raccolti (Weselek et al., 2019); per tale motivo, al fine di far fronte alla diminuzione del reddito derivante dalle colture, subentra la rendita derivante dalla produzione dell'energia elettrica (Kim et al., 2021). A fronte dei cambiamenti climatici l'agricoltura è portata a compiere un adattamento circa l'uso dell'acqua; secondo uno studio di Mamun et al. (2022) la produzione agricola al di sotto di IAV non risentirebbe della diminuzione dell'acqua. Tale analisi viene ribadita anche da Elamri et al. (2018), il quale afferma che una diminuzione del 20% di acqua ne consegue una riduzione della resa del raccolto del 10%. Diversamente da come ci si potrebbe aspettare anche le colture poco resistenti all'ombra - in questa situazione il mais - seppur coltivate in deficit di radiazioni solari hanno riportato rese quasi pari a quelle ottenute in campo normale (Sekiyama & Nagashima, 2019). Tale fenomeno è avvalorato dal fatto che è necessaria solo una piccola quantità di radiazione per raggiungere il massimo punto di radiazione. Dall'analisi degli studi è stato dimostrato che una cosa accunante pressoché tutti gli studi riguardanti lattuga e patate è l'aumento significativo del LAI indipendentemente dal grado di ombreggiamento, sia HD o FD ad eccezione di coltivazione in ST e CT (Valle et al., 2017) che, nella stagione estiva ed autunnale, hanno registrato differenze positive ma non significative. Nel caso studio del mais (tabella 3) i risultati si dimostrano contrastanti per quanto riguarda la resa in granello e massa secca. Ciò è in parte conseguenza di coltivazioni in territori non omogenei tra loro. Gli studi Amaducci et al. (2018), Sekiyama & Nagashima (2019) e Ramos-Fuentes et al., 2023 provano che gli andamenti degli intervalli sono costanti tra loro, ciò implica minor produzione ma la sicurezza di avere una costanza negli anni in termini di rendimenti. Analogamente per lattuga tabella 5, tabella 6 è definito che la biomassa e la massa secca subiscono in tutti gli scenari una diminuzione significativa rispetto a campo aperto, ad eccezione della stagione autunnale nella quale non si registrano differenze sostanziali. Medesima situazione è descritta in tabella 7, nella quale le rese delle diverse colture quali grano invernale, patate, cavoli, barbabietole, broccoli, spinaci e cetrioli hanno registrato cali di rese significativi, al contrario ciò che è dimostrato da Barron-Gafford et al. (2019) in tabella 7 con aumenti di resa tra i più significativi tra gli studi esaminati. Partendo da figura 5 risulta che di agrivoltaico si è iniziato a parlare solamente negli ultimi anni in modo consistente; quindi, a causa di studi

contrastanti non è possibile trarre conclusioni decise. L'analisi degli studi selezionati porta a concludere che gli IAV rappresentano un compromesso tra produzione di energia elettrica e coltivazione per scopo alimentare in quanto nessuno dei due scopi uguaglia o supera il rendimento se fossero trattati singolarmente. Per quanto riguarda l'agricoltura, a seconda del tipo di coltura, se tollerante all'ombra o no, le rese hanno un andamento quasi pari a quelle ottenute in un campo aperto inasprito dalla diminuzione della superficie coltivata. Nel caso dell'impianto fotovoltaico la quantità di energia elettrica è minore di un impianto posto in un eguale area in quanto la disposizione dei pannelli è meno densa. La "simbiosi" tra questi due elementi, coltivazione e produzione di energia, in un unico campo rappresenta un'importante innovazione che potrebbe permettere di sfruttare al meglio il territorio e generare un reddito.

5 BIBLIOGRAFIA

- Adeh, E. H., Selker, J. S., & Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLoS ONE*, *13*(11).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied Energy*, *220*, 545–561. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.081>
- Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A. K., Nabhan, G. P., & Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, *2*(9), 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- Chirinda, N., De Ruijter, F., & Walston, L. J. (n.d.). *Opportunities for agrivoltaic systems to achieve synergistic food-energy-environmental needs and address sustainability goals*.
- Cho, J., Park, S. M., Reum Park, A., Lee, O. C., Nam, G., & Ra, I. H. (2020). Application of photovoltaic systems for agriculture: A study on the relationship between power generation and farming for the improvement of photovoltaic applications in agriculture. *Energies*, *13*(18).
<https://doi.org/10.3390/en13184815>
- Dinesh, H., & Pearce, J. M. (2016). The potential of agrivoltaic systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 54, pp. 299–308). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, *36*(10), 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Elamri, Y., Cheviron, B., Mange, A., Dejean, C., Liron, F., & Belaud, G. (2018). Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(2), 1285–1298. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1285-2018>
- Graham, M., Ates, S., Melathopoulos, A. P., Moldenke, A. R., DeBano, S. J., Best, L. R., & Higgins, C. W. (2021). Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem. *Scientific Reports*, *11*(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4>
- Hudelson, T., & Lieth, J. H. (2021). Crop production in partial shade of solar photovoltaic panels on trackers. *AIP Conference Proceedings*, *2361*. <https://doi.org/10.1063/5.0055174>
- Kim, S., Kim, S., & Yoon, C. Y. (2021). An efficient structure of an agrophotovoltaic system in a temperate climate region. *Agronomy*, *11*(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy11081584>

- Mamun, M. A. Al, Dargusch, P., Wadley, D., Zulkarnain, N. A., & Aziz, A. A. (2022). A review of research on agrivoltaic systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 161). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112351>
- Marrou, H., Dufour, L., & Wery, J. (2013). How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system? *European Journal of Agronomy*, *50*, 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.004>
- Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., & Dupraz, C. (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*, *44*, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>
- Martínez, M. V., de Ahumada, L. M. F., García, M. F., García, P. F., de la Torre, F. C., & López-Luque, R. (2022). Characterization of an experimental agrivoltaic installation located in a educational centre for farmers in Cordoba (Spain). *Renewable Energy and Power Quality Journal*, *20*, 111–115. <https://doi.org/10.24084/repqj20.236>
- Ramos-Fuentes, I. A., Elamri, Y., Cheviron, B., Dejean, C., Belaud, G., & Fumey, D. (2023). Effects of shade and deficit irrigation on maize growth and development in fixed and dynamic AgriVoltaic systems. *Agricultural Water Management*, *280*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108187>
- Sekiyama, T., & Nagashima, A. (2019). Solar sharing for both food and clean energy production: Performance of agrivoltaic systems for corn, a typical shade-intolerant crop. *Environments - MDPI*, *6*(6). <https://doi.org/10.3390/environments6060065>
- Valle, B., Simonneau, T., Sourd, F., Pechier, P., Hamard, P., Frisson, T., Ryckewaert, M., & Christophe, A. (2017). Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Applied Energy*, *206*, 1495–1507. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113>
- Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Högy, P. (n.d.). *Agrioltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate*. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00714-y/Published>
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 39, Issue 4). Springer-Verlag France. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
- Willockx, B., Herteleer, B., & Cappelle, J. (2020). Combining photovoltaic modules and food crops: First agrovoltaic prototype in belgium. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, *18*, 266–271. <https://doi.org/10.24084/repqj18.291>