



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA ANIMALI ALIMENTI RISORSE
NATURALI E AMBIENTE

Corso di laurea in Scienze e Tecnologie Alimentari

IL SISTEMA AGRIVOLTAICO (APV):
EFFETTI QUANTI-QUALITATIVI SULLE
PRODUZIONI VEGETALI

Relatore

Prof. Carmelo Maucieri

Laureando

Lorenzo Marzari

Matricola n. 1221970

ANNO ACCADEMICO 2023/2024

RIASSUNTO

La sfida di soddisfare la crescente domanda di cibo ed energia, mitigando al contempo i cambiamenti climatici dovuti all'incremento delle emissioni di CO₂, spinge verso lo sviluppo e l'adozione di tecnologie e approcci rinnovabili. Considerando la crescente domanda di fotovoltaico come cardine nella strategia di transizione energetica, sebbene le preoccupazioni relative alla trasformazione del paesaggio, è emerso il concetto di agrofotovoltaico (APV). Quest'ultimo dovrebbe essere in grado di contribuire in modo sinergico alla produzione di energia e al mantenimento della produttività agricola a scopi alimentari, mirando alla sostenibilità ambientale e al risparmio idrico.

La selezione delle colture per i sistemi APV è fondamentale in quanto i pannelli solari "competono" con le piante per l'irraggiamento, il che può influenzare la crescita e la produzione delle colture, costituendo una continua sfida per preservare la qualità nella filiera agroalimentare. Questa tesi analizza e valuta gli aspetti positivi e negativi dell'installazione di sistemi APV, analizzando le rese, la morfologia e i parametri qualitativi di quattro colture (broccolo, sedano rapa, vite e cavolo cappuccio) prodotte in tale sistema.

ABSTRACT

In response to the pressing challenges of escalating food and energy demands alongside the imperative to combat climate change, there is a growing emphasis on renewable technologies. This study explores the novel concept of agrophotovoltaics (APV) as a key element in the energy transition strategy. Despite apprehensions about landscape alterations, APV aims to concurrently enhance energy production and agricultural productivity, with a focus on environmental sustainability and water conservation. This thesis examines the critical role of crop selection in APV systems, assessing the yields, morphology, and quality parameters of broccoli, celeriac, grapevine, and cabbage. The analysis delves into the intricate balance required to ensure both efficient energy generation and the maintenance of high-quality crops in the food supply chain.

INDICE

<u>RIASSUNTO.....</u>	<u>1</u>
<u>ABSTRACT.....</u>	<u>2</u>
<u>1.0 INTRODUZIONE.....</u>	<u>4</u>
<u>2. L'AGRIVOLTAICO</u>	<u>7</u>
<u>2.1 COS'È IL SISTEMA AGRIVOLTAICO</u>	<u>7</u>
<u>2.2 ASPETTI POSITIVI.....</u>	<u>10</u>
<u>2.3 CRITICITÀ E LIMITI</u>	<u>13</u>
<u>3. EFFETTO SULLE COLTURE</u>	<u>16</u>
<u>3.1 BROCCOLI.....</u>	<u>16</u>
<u>3.2 SEDANO RAPA</u>	<u>21</u>
<u>3.3 VITE.....</u>	<u>24</u>
<u>3.4 CAVOLO CAPPUCCIO</u>	<u>28</u>
<u>4.0 CONCLUSIONI.....</u>	<u>34</u>

1.0 INTRODUZIONE

La crescita demografica e il conseguente incremento della richiesta energetica contribuiscono all'aumento delle emissioni di gas a effetto serra, in particolare di anidride carbonica (CO₂), aggravando il problema del cambiamento climatico. In questo contesto, sono necessarie azioni immediate e concrete per ridurre le emissioni tramite l'adozione di fonti di energia rinnovabile. L'Agrivoltaico (APV), tecnica che prevede la produzione di energia solare attraverso l'installazione in terreni agricoli di pannelli fotovoltaici sopraelevati con la contemporanea coltivazione di colture agricole nello stesso terreno, emerge come una soluzione integrata e strategica che si inserisce in un contesto più ampio di azioni e strategie mirate, come la promozione della transizione verso fonti di energia rinnovabile a basse emissioni di carbonio che, non solo rispondono alla crescente domanda energetica, ma contribuiscono anche in modo tangibile a mitigare l'impatto ambientale del settore energetico.

Parallelamente, l'investimento in tecnologie e pratiche finalizzate a migliorare l'efficienza energetica risulta essere cruciale, non solo per ottimizzare l'uso dell'energia in generale, ma anche per garantire che l'APV e altre fonti rinnovabili siano impiegate in modo ottimale. Ecco che, la promozione di pratiche agricole sostenibili, come l'agroforestazione (che si integra con l'APV per questioni di produttività e mitigazione paesaggistica) e la gestione responsabile delle risorse idriche, sposa perfettamente l'approccio multifunzionale dell'APV. Questo non solo riduce l'uso di fertilizzanti chimici e migliora la salute del suolo, ma contribuisce anche in modo significativo a ridurre le emissioni di CO₂ complessive.

Sostenere la ricerca e lo sviluppo di tecnologie a bassa emissione di carbonio, sia nel settore agricolo che energetico, diventa fondamentale per potenziare ulteriormente l'efficacia dell'APV. Gioca inoltre un ruolo fondamentale la sensibilizzazione del pubblico sull'importanza della sostenibilità e l'incoraggiamento a cambiamenti di comportamento, come la riduzione dello spreco alimentare e l'adozione di abitudini di consumo più responsabili. In questo contesto, l'APV rappresenta non solo una soluzione tecnologica ma anche un elemento chiave di una transizione culturale verso la sostenibilità. Queste misure richiedono un impegno a livello globale da parte di governi, aziende e individui. Solo attraverso uno sforzo congiunto possono essere affrontate le sfide ambientali poste dall'aumento del consumo energetico e dalla crescita della domanda di cibo.

Inoltre, si prevede che gli effetti del cambiamento climatico avranno un impatto drastico sulla produzione alimentare, riducendo la disponibilità di acqua e aumentando il fabbisogno idrico delle

colture, influenzandone parametri fondamentali come lo sviluppo e la resa. Per di più, l'aumento delle temperature, la siccità e il potenziale aumento dei vincoli di prelievo idrico avranno effetti negativi e significativi nella produzione di colture essenziali sia per l'uomo che per gli allevamenti, come il mais (*Fuentes et al., 2023*).

Ecco che il passaggio ad un'economia "decarbonizzata" è una delle principali questioni che i Paesi stanno trattando. Lo sviluppo delle energie rinnovabili ha l'obiettivo di implementare la domanda energetica a discapito del consumo di combustibili fossili e ciò richiede lo sfruttamento di vaste aree di terreno. In questo processo di transizione energetica, in Italia, attraverso il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) nonché il PNRR (Piano Nazionale Ripresa e Resilienza), è stato stabilito l'obiettivo di riduzione entro il 2030 del 55% delle emissioni di CO₂. Il PNIEC è un piano strategico che definisce gli obiettivi energetici e climatici dell'Italia per il decennio 2021-2030. Questo piano è in linea con gli accordi internazionali (Accordo di Parigi) e mira a ridurre le emissioni di gas serra, inclusa la CO₂, per affrontare i cambiamenti climatici. Dall'altra parte, il PNRR è un piano di investimenti e riforme che punta a sostenere la ripresa economica del paese dopo la crisi causata dalla pandemia di COVID-19. Esso include progetti e azioni volti a favorire la transizione verso un'economia più sostenibile, riducendo l'impatto ambientale, incluso il contenimento delle emissioni di CO₂.

In questa tesi si è voluto approfondire il sistema APV, una soluzione alla co-produzione di energia rinnovabile e alimenti, utilizzando il terreno in maniera coordinata grazie all'installazione di moduli fotovoltaici che non ostacolano lo svolgimento delle pratiche agricole. L'APV rappresenta un valore aggiunto per l'azienda, che incrementa la redditività del terreno del 60-70 %, generando energia pulita e, allo stesso tempo, fornendo prodotti agricoli (*Dupraz et al., 2011*).

Inoltre, da quando sono stati effettuati i primi esperimenti di APV in Francia (*Marrou et al., 2013*), i sistemi APV hanno dimostrato la loro capacità di proteggere le colture di fronte ai rischi climatici, oggi sempre più attuali, come l'aumento della radiazione solare incidente che per alcune colture risulta eccessiva. I sistemi APV aumenterebbero quindi la resilienza dei sistemi colturali alla variabilità climatica mitigando gli effetti negativi dell'irradiazione diretta sulle colture, soprattutto durante le ondate di calore. I sistemi APV rappresentano anche un valido modo per risparmiare acqua, riducendo le esigenze di irrigazione grazie alla diminuzione dell'evapotraspirazione (*Gafford et al., 2019*). Pertanto, APV rappresenta un approccio innovativo che sfrutta sinergicamente il terreno agricolo sia per la produzione di cibo che di energia rinnovabile. Può contribuire a rendere

l'agricoltura più sostenibile, ottimizzando l'uso delle risorse e riducendo l'impatto ambientale delle attività agricole e dell'energia elettrica prodotta.

Questa tesi approfondirà gli effetti del sistema APV sugli aspetti quanti-qualitativi di 4 colture verificando aspetti positivi e criticità a riguardo, al fine di comprendere le possibilità future in campo agro-alimentare di questa nuova impresa agro-energetica.

2. L'AGRIVOLTAICO

L'APV è un modello di utilizzo "coordinato" del suolo agricolo per coniugare positivamente le esigenze agricole ed energetiche. Si differenzia dal fotovoltaico in quanto quest'ultimo giace direttamente a terra, non permettendo una contemporanea attività agricola.

La sfida è quella di progettare sistemi agro-fotovoltaici che possano congiuntamente dare maggiori benefici rispetto all'utilizzo del terreno per le due cose separate; i requisiti minimi da soddisfare sono quelli di (*Guastella, 2022*):

- Incrementare il sostegno delle attività agricole diversificando le fonti di reddito.
- Migliorare le coltivazioni opportunamente scelte riducendo le complicità legate alle avversità climatiche.
- Ridurre il consumo idrico nazionale grazie alla minore evaporazione nell'area sottostante ai moduli.
- Aumentare la produzione energetica da fotovoltaico per raggiungere gli obiettivi PNIEC / PNRR, permettendo l'accesso a nuove zone per le installazioni.

2.1 COS'È IL SISTEMA AGRIVOLTAICO

L'idea di un approccio a doppio uso, sia per la produzione di energia solare fotovoltaica che per l'operato agricolo, è stato concepito teoricamente da Goetzberger e Zastrow del Fraunhofer ISE, nei primi anni '80 del secolo scorso (*Scognamiglio, 2021*). Il loro concetto prevedeva di elevare la struttura fotovoltaica (di circa 2 m) creando distanza periodica tra le file, pari a tre volte la loro altezza, permettendo la ricezione omogenea di circa due terzi dell'irraggiamento solare non compromettendo l'attività agricola grazie alla modularità dell'impianto in termini di larghezza e altezza.

A seconda della posizione, delle condizioni meteorologiche e della disponibilità del terreno, le colture nei sistemi APV crescono in un ambiente caratterizzato da condizioni microclimatiche differenti dal pieno campo per quanto riguarda i parametri relativi alla radiazione solare, alla temperatura e all'umidità del suolo; dato che tramite i moduli fotovoltaici si viene a creare dell'ombreggiamento, influenzando così in modo significativo il microclima al di sotto della struttura portando ad una variazione della temperatura dell'aria, dell'umidità relativa, del livello di luce e CO₂;

mitigando gli eventuali effetti causati dai cambiamenti climatici sempre più presenti in questi anni (Scognamiglio, 2021).

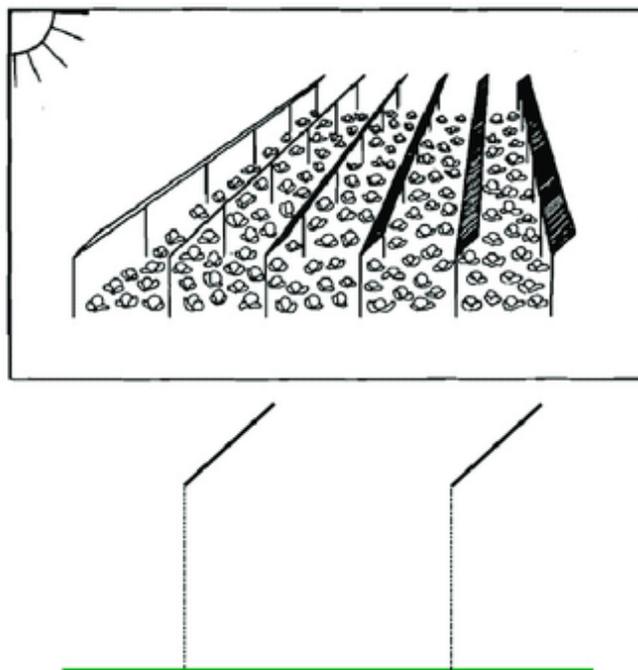


Figura 1 - Primo modello APV di Goetzberger e Zastrow [Fonte: Goetzberger and Zastrow, 1981].

Ritornando all'impostazione della struttura APV, si può osservare che primi moduli fotovoltaici erano inclinati di 30° per catturare adeguatamente la luce solare a sud (Figura 1). Già allora lo studio dell'esposizione era in linea con gli impianti presenti tuttora in quanto per ottenere la massima esposizione all'irraggiamento solare si richiede l'esposizione a sud (Mamun et al., 2022).

Per via dello spazio interfilare dei pannelli solari, alcune piante possono catturare la radiazione solare diretta, mentre altre possono essere posizionate all'ombra dei pannelli solari. L'area ombreggiata si sposta man mano che il sole si muove nel corso della giornata. Pertanto, nell'ambiente di coltivazione al di sotto del sistema APV le colture riceveranno durante il giorno meno radiazione solare rispetto a quelle coltivate senza sistemi APV.

I risultati di prove condotte in Germania (Azienda agricola Heggelbach) (Figura 2) presentano delle variazioni di temperatura stagionali che influenzano la produzione totale di grano, patate, sedano e trifoglio. Si è visto infatti, che sistemi APV, in un anno piovoso con estate mite (2017), hanno determinato una riduzione di resa del 19% per il grano, del 18% per la patata, del 19% per il sedano e del 5% per il trifoglio. All'opposto, in un anno con estate torrida (2018), hanno portato a rese maggiori con un +3% per il grano, un +11% per la patata e un +12% per il sedano. Solo il trifoglio ha subito una riduzione di resa dell'8% sotto la stessa configurazione di sistema (Scognamiglio, 2021).

Quindi, sulla base dei risultati ottenuti in questo studio, i sistemi APV possono determinare rese variabili nel corso degli anni (*Weselek et al., 2021*). Sono quindi necessari studi di medio-lungo termine per valutare gli effetti sulle produzioni medie.

In generale, le piante con punti di saturazione luminosa più alti possono crescere bene in condizioni di luce intensa, mentre quelle con punti di saturazione luminosa più bassi possono crescere relativamente bene all'ombra, mantenendo una resa adeguata. Ciascun vegetale ha punti di fotosaturazione differenti, il che indica che alcune famiglie o specie di piante possono avere una migliore tolleranza all'ombra in presenza di pannelli solari. Piante come pomodoro, melanzana e cetriolo hanno punti di saturazione della luce di 45-70 Klux, mentre le crucifere come broccoli, sedano rapa e cavolo cappuccio hanno 11 Klux, dimostrandosi più adeguate per la coltivazione in sistemi APV (*Chae et al., 2022*).



Figura 2 - Coltivazione in APV a Heggelbach, Germania

Per questo motivo la sfida principale di questa innovazione in campo agricolo-energetico è mantenere rese adeguate in condizioni climatiche calde e secche (tipiche delle ultime estati), nell'ottica di un abbassamento delle temperature del suolo e dell'aria dovuto all'ombreggiamento dei pannelli e con potenziali vantaggi nell'efficienza dell'uso dell'acqua.

Perciò si punta ad una riduzione dell'impatto ambientale, dal momento in cui questi impianti sono veri e propri investimenti economici che puntano sia ad una migliore gestione del territorio creando energia sostenibile che ad incrementare la qualità delle colture, sfruttando i benefici che un impianto APV può dare ai vegetali sottostanti i pannelli.

L'investimento si pone il fine di rendere più competitivo il settore agricolo, riducendo i costi di approvvigionamento energetico (ad oggi stimati pari a oltre il 20 % dei costi variabili delle aziende), migliorando al contempo le prestazioni climatico-ambientali per via del risparmio idrico, il recupero della fertilità del suolo, la resilienza ai cambiamenti climatici e la produttività agricola per i diversi tipi di colture (Colantoni, 2022).

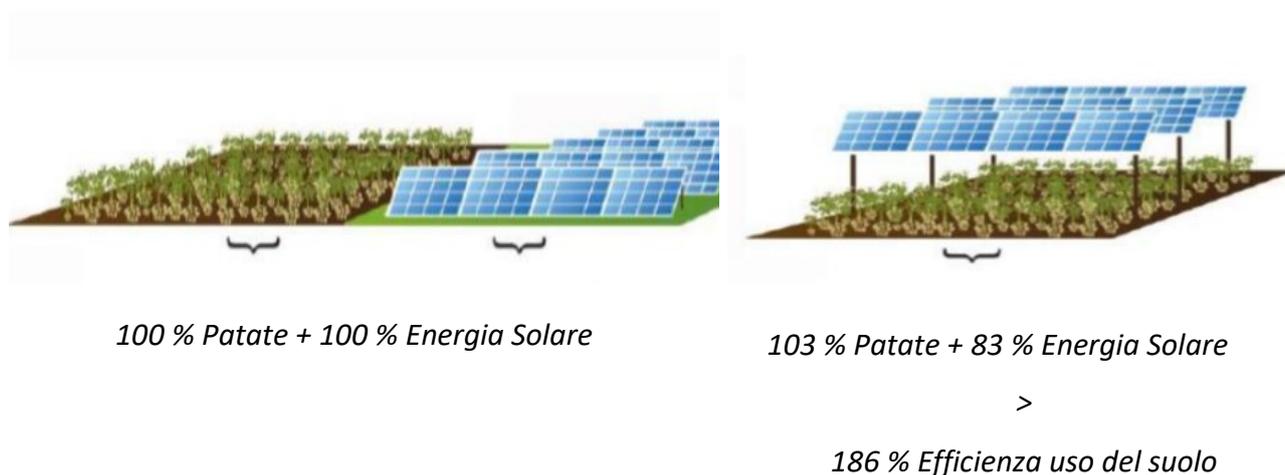


Figura 3 - APV: opportunità per l'agricoltura e la transizione energetica, Fraunhofer ISE]

2.2 ASPETTI POSITIVI

Il fotovoltaico, assieme all'eolico, è una fonte di energia rinnovabile economicamente sostenibile e necessaria per adempire agli obiettivi di riduzione dell'energia prodotta da fonti fossili prefissati per il 2030. Proprio per questo, molti paesi stanno scommettendo nell'APV. Dal 2014 ad oggi sono stati sviluppati nel mondo circa 2.800 progetti di APV per una potenza complessiva installata di 2,9 GW.

Al di fuori dell'Europa, il Giappone ha attualmente più di 1.800 impianti APV installati. Non di meno è la Cina, con un'installazione di 1,9 GW in tutto il paese, tra cui l'impianto più grande del mondo con una potenza di 700 MW, vicino al Deserto di Gobi in cui vengono coltivate bacche per contrastare la desertificazione dell'area. In Europa, si suppone che l'installazione di impianti APV sull'1% della superficie agricola produrrebbe oltre 900 GW d'energia. Ad oggi la Germania è il paese più attento a questa transizione energetica in quanto supporta progetti di R&S dell'APV (Solar Power Europe, Fraunhofer ISE). In Italia, invece, si ipotizza che investendo circa lo 0,32% della superficie

coltivabile si raggiungerebbe il 50% dell'obiettivo del PNIEC nella produzione energetica nazionale proveniente da fonti rinnovabili (Balloccchi et al., 2022).

L'APV genera importanti vantaggi per l'agricoltura in quanto in primis contrasta l'abbandono dei terreni agricoli aumentandone la produttività dato che dal 2000 al 2017 in EU sono andati perduti circa 80 mila ettari di terreno agricolo a causa dell'abbandono (SolarPower Europe, 2021). Inoltre, l'APV crea nelle comunità rurali nuove opportunità di lavoro per il settore agricolo e per quello dei servizi, confermandosi come fonte energetica che crea più posti di lavoro per MW installato. In aggiunta, l'APV stimola investimenti che accrescono la competitività dell'azienda agricola grazie alla digitalizzazione e al possibile aumento del reddito aziendale del 20 % (Dinesh et al., 2016).

Dal punto di vista agrario, l'APV contribuisce a diminuire l'impronta idrica dell'agricoltura, riducendo l'evotraspirazione e utilizzando il 70% in meno di acqua rispetto alle coltivazioni tradizionali. In un progetto realizzato in Sicilia, è stato registrato un risparmio complessivo di 5 milioni di litri per ettaro all'anno, ottenendo contemporaneamente una stabilizzazione delle rese delle colture non irrigue in condizioni di aridità (Colantoni, 2022).

I pannelli fotovoltaici proteggono inoltre le colture dagli eventi atmosferici estremi dovuti al cambiamento climatico, dalle alte temperature e dalla scarsità d'acqua (anche grazie al possibile inserimento negli impianti di sistemi di raccolta dell'acqua piovana) permettendo all'azienda agricola di ridurre i costi assicurativi sui raccolti (SolarPower Europe, 2021).

L'80-90% dei terreni sotto gli impianti APV possono essere coltivati con pratiche standard e con le comuni macchine agricole in quanto i moduli fotovoltaici sono sopraelevati di 2-5 m (Figura 4). Il restante 10-20% dei terreni dotati di impianti APV con moduli ad altezza minore di 2 m, sono tuttavia produttivi anche se difficilmente meccanizzabili, in quanto possono ospitare colture orticole, allevamenti o qualsiasi altra attività agricola che non richieda grandi macchinari.



Figura 4 - Coltivazione in APV (Fonte: Euractiv Italia)



Figura 5 - Sinergia tra sistema APV con pascolo di ovini (Fonte: Enel Green Power)

Per quanto riguarda le prestazioni economiche degli impianti APV, sono sostanzialmente le stesse degli impianti fotovoltaici a terra, grazie alla maggiore produttività raggiunta dai sistemi di inseguimento solare e al materiale risparmiato con l'adozione della tensostruttura, non aumentando l'appropriazione antropica del territorio, aspetto fondamentale in un futuro sistema energetico dominato dalle rinnovabili (Agostini et al., 2020). Questo perché i risultati dell'analisi tecnico-economica mostrano che gli impianti APV hanno un LCOE (costo dell'elettricità livellato, nonché costo unitario dell'energia elettrica generata) simile a quello degli impianti statici a terra, leggermente inferiore ai 90 € MWh prodotti dagli impianti fotovoltaici a terra o su tetto (Agostini et al., 2020).

Anche le attività di allevamento possono giocare una sinergia con l'APV aumentando le prestazioni ecologiche complessive. I benefici dell'integrazione del bestiame al pascolo sono stati studiati in Oregon (USA), rivelando che il pascolo in regime di APV può aumentare la produttività economica del terreno fino al 200%, oltre a garantire un ambiente più rispettoso del benessere degli animali. È stata dimostrata la preferenza del bestiame per l'ombra (Figura 5), osservando che gli animali impiegano più del 70% del loro tempo all'ombra dei pannelli (Scognamiglio et al., 2021).

In uno studio di Alessandro Agostini sono stati valutati gli obiettivi di sviluppo sostenibile (Sustainable Development Goals, SDG), ovvero una serie di 17 obiettivi interconnessi, definiti dall'Organizzazione delle Nazioni Unite come strategia "per ottenere un futuro migliore e più sostenibile per tutti". Si è concluso che gli impianti APV non hanno impatti negativi, con 14 impatti positivi sui 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (Tabella 1) (Agostini et al., 2020):

Tabella 1: impatto Agri-voltaico in ottica di sviluppo sostenibile (Fonte: Agostini et al., 2020).

Obiettivo di sviluppo sostenibile valutato positivamente	Commento
Nessuna povertà	APV può avere un impatto positivo sulle comunità rurali povere in termini di povertà energetica ed economica riducendo le perdite di raccolto in caso di stress idrico
Fame zero	APV stabilizza e aumenta la resa delle colture non occupando terreno coltivabile
Salute e benessere	APV riduce l'inquinamento rispetto ad altri sistemi energetici

Acqua pulita e servizi igienici	APV consente una riduzione del fabbisogno idrico per l'irrigazione e riduce le emissioni di sostanze eutrofizzanti rispetto ad altre fonti di energia.
Energia accessibile e pulita	APV produce energia pulita e conveniente
Lavoro dignitoso e crescita economica	APV genera potenziali ricavi e opportunità di lavoro nelle aree rurali
Industria, innovazione e infrastrutture	APV è innovativo e può contribuire allo sviluppo infrastrutturale delle aree rurali
Ridurre le disuguaglianze	APV può contribuire a ridurre le disuguaglianze tra aree industrializzate e comunità rurali
Città e comunità sostenibili	APV può essere costruito nella periferia delle città per fornire energia vicino ai consumatori e allo stesso tempo consentire un'orticoltura con un minore fabbisogno idrico
Consumo e produzione responsabili	APV è un buon esempio di consumo responsabile delle risorse, in particolare del suolo e dell'energia
Azione per il clima	APV contribuisce sia a ridurre i cambiamenti climatici, riducendo le emissioni di gas serra rispetto alla maggior parte delle fonti energetiche, sia ad aumentare la resilienza ai cambiamenti climatici, stabilizzando e incrementando le rese delle colture
La vita sott'acqua	APV contribuisce alla tutela della vita sott'acqua riducendo l'emissione di sostanze eutrofizzanti rispetto ad altre fonti di energia
Vita sulla terraferma	APV favorisce la tutela della vita sul territorio riducendo l'emissione di inquinamento locale (sostanze eutrofizzanti e inquinanti atmosferici)
Pace, giustizia e istituzioni forti	APV contribuisce alla stabilità geopolitica evitando i conflitti per le fonti energetiche. Inoltre, diminuendo il fabbisogno di acqua per l'irrigazione, riducono anche i conflitti idrici.

2.3 CRITICITÀ E LIMITI

A fronte degli aspetti positivi precedentemente riportati, l'APV può avere aspetti negativi che possono comprometterne la diffusione.

Qui di seguito le criticità ed i limiti che tale tecnologia può presentare:

- impatto negativo sulla naturalezza del paesaggio
- costi di costruzione elevati
- limiti a livello normativo
- limiti applicativi

- limiti tecnico-colturali

Tra le problematiche, diverse sono risolvibili con l'impiego delle nuove tecnologie, altre sono frutto dalla disinformazione riguardante questa tecnica. Il primo riguarda l'aspetto paesaggistico, in quanto l'installazione all'occhio può sembrare impattante poiché snatura il normale paesaggio a cui i cittadini sono abituati, nonché può essere elemento di deturpazione in aree turistiche. Tuttavia, con il Decreto legge 199/2021 (Decreto aiuti) si sono stabilite le aree idonee per questo tipo di impiantistica vincolando le zone tutelate da restrizioni paesaggistiche e culturali.

Un ulteriore aspetto negativo è il cospicuo costo di realizzazione dell'impianto in quanto è superiore a un impianto fotovoltaico convenzionale, costituendo un ostacolo per l'agricoltore (Agostini et al., 2021).

Anche la burocrazia per la costruzione di questi impianti costituisce un limite alla loro realizzazione in quanto l'iter burocratico è lungo, come riporta la figura 6 sottostante.



Figura 6 - Iter per la messa in opera di un impianto APV (Fonte: Legambiente)

Un'altra limitazione dell'APV riguarda l'adattabilità delle colture sotto impianto, in quanto l'ombra recata dai pannelli solari può incidere nelle produzioni (come è stato detto precedentemente) dal momento che, non tutte le colture si adattano bene a una bassa radiazione luminosa o limitata nell'arco della giornata.

Un ulteriore effetto negativo può essere l'eccessiva concentrazione dell'acqua piovana in prossimità dell'area sottostante al bordo del modulo (creando un possibile ristagno idrico), se non si considera l'inserimento di grondaie nell'impianto (come rappresentato in Figura 7).



Figura 7 - Sistema Agro-Fotovoltaico con grondaia per il recupero dell'acqua

Nel contesto tedesco, si ipotizza che il costo aggiuntivo legato all'elevazione dei moduli fotovoltaici (costi di montaggio, installazione e preparazione del sito) sia più che doppio (passando da 0,3 euro/kWp a 0,7 euro/kWp) rispetto al fotovoltaico montato a terra (*Scognamiglio et al., 2021*).

3. EFFETTO SULLE COLTURE

3.1 BROCCOLI

Ad oggi, le informazioni sulle prestazioni delle colture di brassicacee nel sistema APV sono limitate. Uno studio effettuato da Chae et al. (2022), ha determinato la qualità e la fattibilità economica della coltivazione di broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) in un sistema APV realizzato a Naju, nella provincia di Jeollanam, Corea del Sud, su una superficie di 330 m² circa (Figura 8). Grazie al basso punto di fotosaturazione, i broccoli possono essere una coltura adatta a massimizzare le produzioni nei sistemi APV.

Il periodo di studio è andato dall'autunno del 2019 all'autunno del 2020. Sono stati usati pannelli fotovoltaici bifacciali (Bif), un tipo di modulo solare progettato per catturare la luce solare non solo dalla parte anteriore, ma anche dalla parte posteriore del pannello. Questi pannelli sono realizzati con celle fotovoltaiche che possono generare elettricità quando sono colpiti dalla luce solare sia sulla parte anteriore che su quella posteriore. La parte posteriore del pannello può catturare la luce solare riflessa da superfici circostanti, come il terreno (in questo caso) o le pareti, aumentando così l'efficienza complessiva della conversione solare. Uno studio recente ha infatti dimostrato che i pannelli solari fotovoltaici bifacciali hanno una capacità di generare elettricità, superiore del 20% rispetto ai pannelli monofacciali (Frieri et al., 2015).

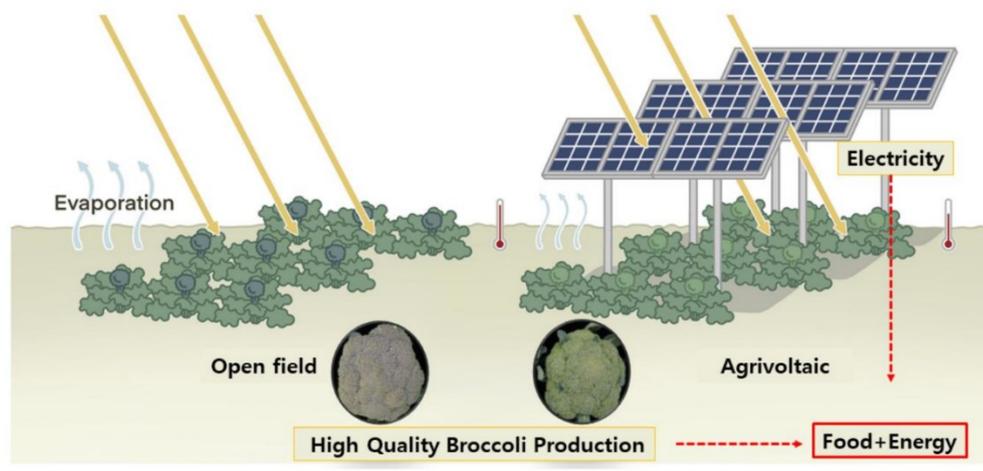


Figura 8 – Sistema APV di produzione per Broccoli (Fonte: Chae et al. 2022)

Nello studio di Chae et al. (2022), la coltura di broccolo sotto il sistema APV è stata divisa in due zone - Bif A e Bif B (Figura 9), che differivano per la presenza di un ulteriore telo ombreggiante nella

zona Bif B. Per confronto, sono state coltivate piante in pieno campo. Il gruppo di controllo è stato collocato a sud del sistema APV, per evitare l'effetto ombra del pannello solare e per avere proprietà del terreno simili. Le pratiche agricole convenzionali sono state applicate secondo le necessità. Raggiunta la maturità commerciale, i broccoli sono state raccolte con un gambo di 8 cm.

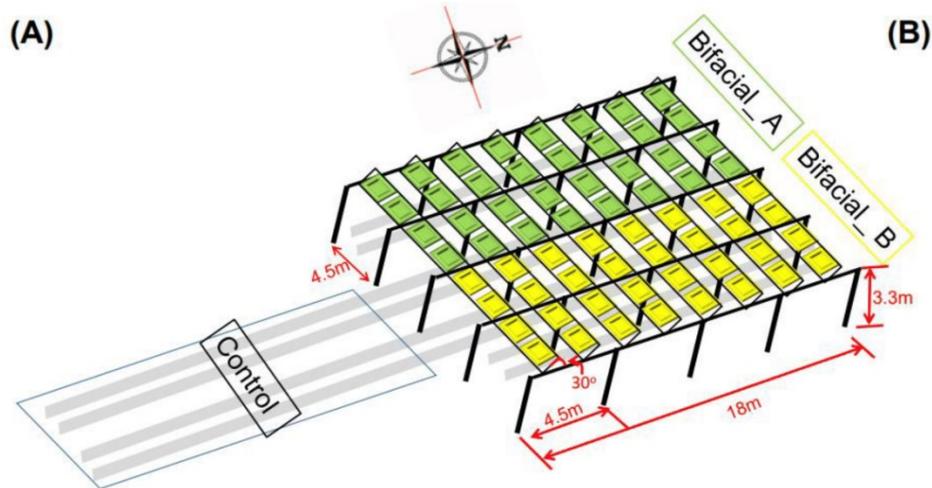


Figura 9 - Sistema APV bifacciale di produzione in Corea (Fonte: Chae et al., 2022)



Figura 10 - Sistema APV con ombreggiatura aggiuntiva (Fonte: Chae et al., 2022)

Durante la sperimentazione, la temperatura del suolo ha mostrato una differenza tra APV e controllo. La temperatura media del suolo del campo aperto (20,2 °C) era significativamente più alta di quella dell'APV (19,1 °C). Al 27 settembre, la temperatura del suolo del campo aperto era di 27,4 °C, mentre quella dell'APV era di 22,3 °C. Quindi in linea generale la temperatura del suolo del campo

aperto era da 2 a 5 °C più alta della temperatura del suolo dell'APV (Chae et al., 2022). Per quanto riguarda la valutazione economica del pannello solare, durante il periodo dell'esperimento, la media delle ore di funzionamento al giorno è stata di 4,2 ore, la produzione media di energia al giorno è stata di 0,127 kWh e la produzione annua di energia è stata stimata in 46.355 kWh (Chae et al., 2022).

Una volta raccolti i broccoli a maturità commerciale si è determinata in essi l'attività antiossidante, al fine di quantificare le concentrazioni di fenoli e flavonoidi totali in base al peso del tessuto essiccato. È stato osservato che la media dei contenuti fenolici totali dei broccoli della primavera 2020 e degli autunni 2019 e 2020 è stata rispettivamente di 4,6 mg GAE/g DW e 5,2 mg GAE/g DW (Figura 11A), ovvero l'11,5% in più rispetto ai broccoli della primavera 2020. I fenoli totali del Bif A (Figura 9) durante il periodo autunnale 2019 erano significativamente inferiori (-10%) rispetto al controllo (Chae et al., 2022).

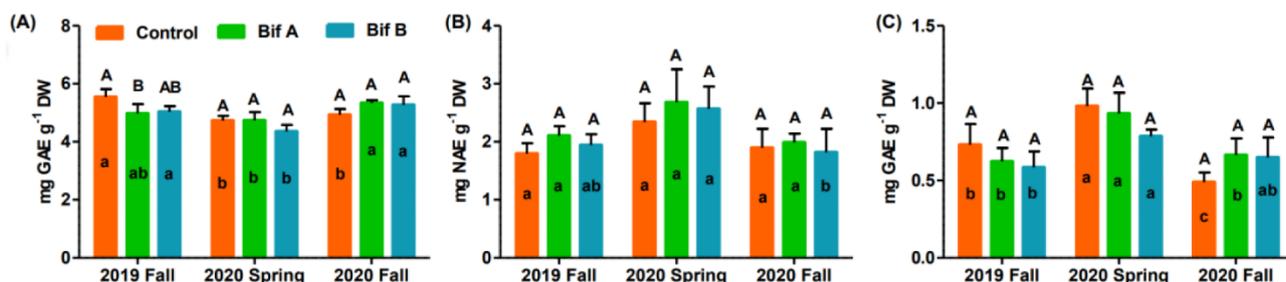


Figura 11 - Fenoli totali (A), flavonoidi (B) e attività antiossidante DPPH (C) (Fonte: Chae et al., 2022)

La resa, la capacità antiossidante, i glucosinolati e i prodotti di idrolisi dei broccoli coltivati sotto il sistema APV non sono risultati significativamente diversi da quelli dei broccoli coltivati in campo aperto. Comparando le stagioni, non è stata riscontrata alcuna significatività tra i trattamenti per i broccoli della primavera 2020 e dell'autunno 2020. I flavonoidi totali dei broccoli della primavera 2020 e dell'autunno 2020 erano rispettivamente 2,5 e 1,9 mg NAE/g DW (Figura 11B). I flavonoidi totali dei broccoli non erano significativamente diversi tra il campo aperto e i due diversi pannelli durante il periodo dell'esperimento. L'attività antiossidante DPPH dei broccoli coltivati in campo aperto nella primavera 2020 e nell'autunno del 2019, erano rispettivamente di 0,9 e 0,6 mg GAE/g DW (Figura 11c). Quelle di Bif B nel periodo primaverile del 2020 erano pari a 0,79 mg GAE/g DW, il 24% in meno rispetto a quelle del controllo (0,98 mg GAE/g DW), dimostrandosi quindi leggermente inferiori sia nella primavera 2020 che nell'autunno 2019 (Figura 11c). Quelle di Bif A e Bif B nell'autunno 2020 non presentavano differenze statisticamente significative rispetto al controllo. Pertanto, la capacità antiossidante e la resa sono risultate significativamente diverse tra le stagioni,

mentre non c'è stata alcuna differenza significativa tra campo aperto e pannelli solari (Chae et al., 2022).

Inoltre, sono stati misurati i parametri di crescita durante ogni stagione di coltivazione (Figura 12). A seconda del tipo di pannello, il peso medio del broccolo nelle tre stagioni è stato di 305,8 g nel controllo, mentre è stato rispettivamente di 290,4 g (-5% rispetto al controllo) e 265 g (-13% rispetto al controllo) quello di Bifacciale A e B (Figura 12A). Non c'è stata alcuna differenza significativa tra le diverse condizioni di coltivazione (controllo vs. sotto il pannello solare). I broccoli, nel periodo autunnale del 2020, pesavano in media 409,6 g, un peso significativamente più elevato rispetto all'autunno 2019 (279,8 g in media) e alla primavera 2020 (178,1 g in media). Lo stress da siccità nel periodo autunnale del 2020 è stato molto forte. Quindi, entrambi i gruppi (controllo e sotto il sistema APV) sono stati irrigati. Di conseguenza, il peso medio delle teste di broccolo nell'autunno 2020 è stato del 32% e del 57% superiore rispetto a quello dell'autunno 2019 e della primavera 2020, rispettivamente. Il peso medio dei broccoli non era significativamente diverso tra il campo aperto e il sistema APV per le particolari condizioni che si vengono a creare. Infatti, sotto il sistema APV, in conseguenza del muoversi dell'ombra, i broccoli non ricevono continuamente una luce inferiore rispetto alla soglia di saturazione.

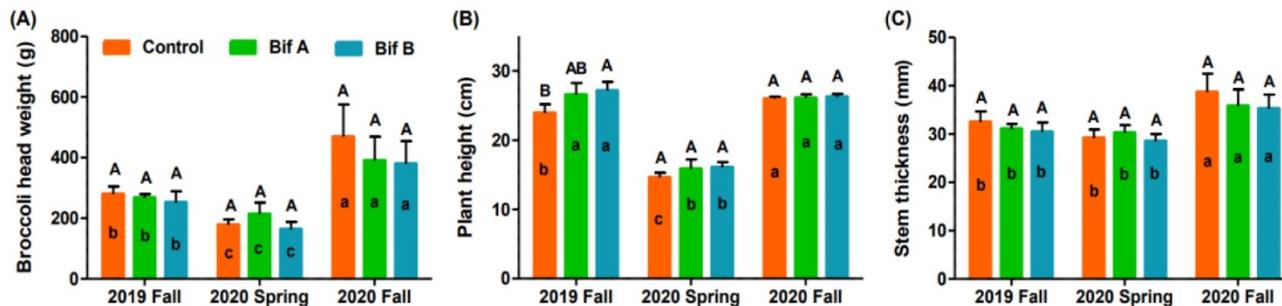


Figura 12 - Peso medio della testa dei broccoli (A), altezza della pianta (B) e spessore del fusto (C).

(Fonte: Chae et al., 2022)

Si è visto che il broccolo coltivato sotto APV presenta un verde più intenso rispetto ai broccoli coltivati nella zona di controllo, sebbene circa il 25% dei broccoli coltivati in APV era ancora simile a quello coltivato in campo aperto. Inoltre, è stato osservato che l'APV con un trattamento di ombreggiamento aggiuntivo (Bif B) ha prodotto broccoli più verdi e con un livello di preferenza maggiore da parte dei consumatori rispetto a quelli coltivati in campo aperto. I consumatori preferiscono i broccoli di colore verde. In termini di varietà, quelle verdi sono state preferite a quelle viola nei mercati locali e nei supermercati. Di conseguenza, il colore dei broccoli è una proprietà

importante che va oltre la qualità dell'aspetto ed è coinvolta nel desiderio di acquisto dei consumatori (Topcu et al., 2015).

I risultati hanno evidenziato differenze nella qualità visiva e nel colore delle infiorescenze dei broccoli. La differenza di colore è dovuta a vari fattori, come la luce solare filtrata dall'ombreggiatura, che può avere effetti sulla produzione di pigmenti responsabili dei colori nelle piante. Le indicazioni sul colore sono cambiate in base al trattamento di coltivazione (Figura 13):

- L^* (luminosità) era significativamente più alta per i broccoli APV ($36,5 \pm 3,5$) e ombreggiati Bif B ($38,9 \pm 3,9$) rispetto al controllo ($33,6 \pm 3,3$)
- a^* (rosso-verde) era significativamente più alto per il controllo ($-1,1 \pm 1,4$) rispetto al Bif B ($-5,1 \pm 1,1$) e l'APV era significativamente più alto rispetto all'ombreggiatura ($-6,2 \pm 1,7$)
- b^* (giallo-blu) era significativamente più alto per l'ombreggiatura Bif B ($18,3 \pm 2,8$) rispetto all'APV ($15,1 \pm 2,1$) e l'APV era significativamente più alto del controllo ($9,1 \pm 2,1$)

Secondo il diagramma dello spazio di colore:

- L^* più alto significa più luminoso
- a^* più basso significa più verde
- b^* più alto significa più giallastro

Questo confronto mostra quantitativamente che i broccoli prodotti con il solare agricolo sono più verdi e quindi, preferiti dal consumatore. Inoltre, il tempo fino alla maturità commerciale dei broccoli è aumentato dal 35% al 70%, passando da 5 a 11 giorni rispettivamente con l'ombreggiamento della struttura APV, portando ad avere una scalarità del raccolto dovuta ad una riduzione della luce.

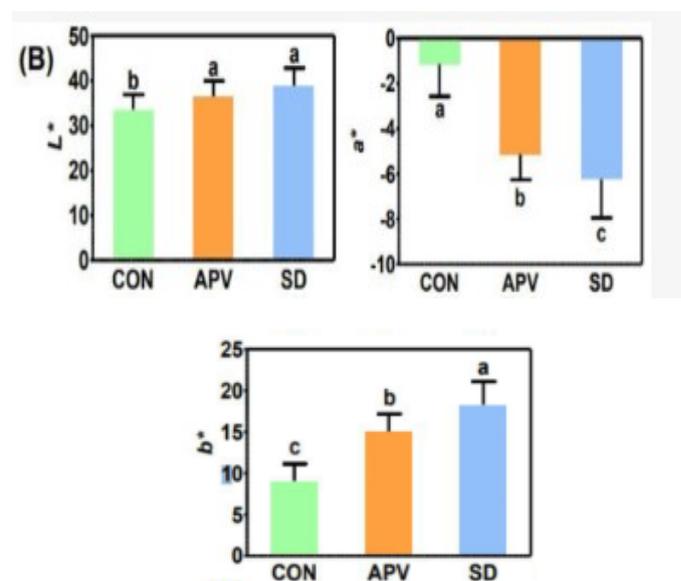
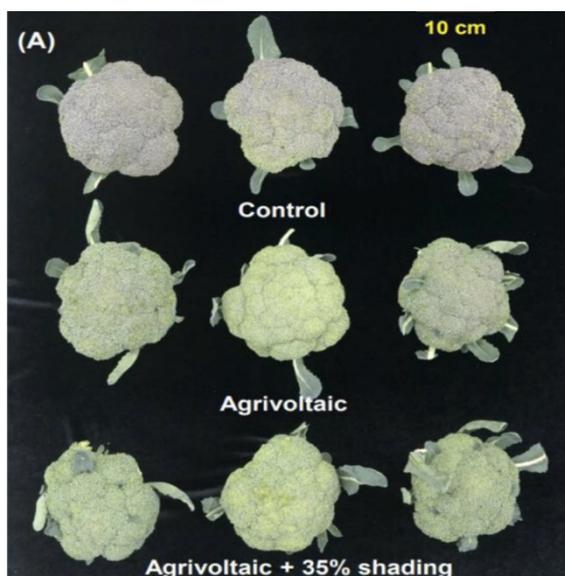


Figura 13 - Caratteristiche cromatiche con ombreggiatura aggiuntiva (Fonte: Chae et al., 2022)

3.2 SEDANO RAPA

L'obiettivo dello studio di Weselek et al. (2021) è stato quello di verificare come il sedano rapa (un comune ortaggio da campo) è stato influenzato nella coltivazione APV. Oltre a esaminare parametri come lo sviluppo e la resa delle colture, lo studio ha esaminato, per la prima volta, come le condizioni microclimatiche alterate dall'ombra parziale dell'impianto AV, influissero sulla composizione chimica e, di conseguenza, sulla qualità del sedano rapa.

Il sedano rapa (*Apium graveolens* L. var. *rapaceum*), è una varietà di sedano coltivata principalmente nell'Europa centrale e orientale. A differenza del sedano comune (*Apium graveolens* var. *graveolens*) e del sedano da foglia (*Apium graveolens* var. *secalinum*), questa coltura biennale forma bulbi di grandi dimensioni nel primo anno di coltivazione, composti da ipocotile, radice a fittone e fusto di polpa bianca in proporzioni uguali (Figura 14).



Figura 14 - Sedano rapa raccolto nel 2017 (Fonte: Weselek et al., 2021)

Lo studio è stato fatto ad Hohenheim (Germania) sia nel 2017 che nel 2018 in una superficie di 0,3 ettari, utilizzando un sistema APV costituito da una striscia di 24 m di lunghezza per 19 m di larghezza, in cui sono stati posizionati i pannelli solari. Contestualmente, un'altra coltivazione di sedano rapa è stata eseguita in un'area di riferimento adiacente (REF), senza l'utilizzo di pannelli solari. Per evitare l'ombreggiamento della zona REF, quest'ultima è stata posizionata a una distanza di 20 m dall'impianto APV. La semina in entrambi gli anni è stata effettuata il 5 maggio, e l'area di coltivazione è stata fertilizzata con una dose di letame vaccino compostato pari a 15 tonnellate per ettaro tra metà febbraio e metà marzo. Una volta rilevati i parametri relativi al microclima, ad

ortaggio maturo, ogni pianta di sedano rapa è stata separata in biomassa fuori terra e sottoterra. La biomassa fuori terra di ogni parcella è stata pesata e successivamente essiccata per 48 ore a 60°C per determinare la resa in sostanza secca. Inoltre, è stato misurato il diametro e il peso di ciascun sedano rapa. Per l'analisi della composizione chimica, la radice di ogni pianta è stata sbucciata, lavata con acqua distillata, seccata e macinata.

Durante i due anni presi in considerazione, si sono verificate notevoli fluttuazioni nelle condizioni climatiche. Nel 2017, è stato registrato un accumulo di precipitazioni pari a 1351 mm, una radiazione solare annuale di 1180 kWh/m² e una temperatura media annuale di 8,6 °C. Mentre, nel 2018, le precipitazioni cumulate sono scese a 916 mm, con un aumento nella radiazione solare annuale a 1204 kWh/m² e una temperatura media annuale di 9,7 °C (*Weselek et al., 2021*). Nello stesso arco di tempo (2017-2018), l'impianto APV ha generato una media di 246.000 kWh/anno.

Un aspetto rilevante è emerso anche dalla temperatura del suolo, che è scesa di 1,2 °C nel 2017 e di 1,4 °C nel 2018 nell'impianto APV. Ciò è in accordo con i risultati di *Marrou et al. (2013)*, che hanno riscontrato una riduzione della temperatura del suolo dovuta alla presenza del sistema APV. Nel 2017, l'utilizzo del sistema di APV ha portato a un aumento dell'1,9% nell'umidità media annua del suolo. Tuttavia, nel 2018, è stata rilevata una diminuzione dell'umidità di circa il 3,1% rispetto all'anno precedente nel sistema APV, pur sempre maggiore rispetto la zona REF. In entrambi gli anni, l'umidità media annua dell'aria è stata costantemente superiore del 2,8% nell'ambiente con AV rispetto all'area di riferimento (REF) (*Weselek et al., 2021*). Queste variazioni climatiche rivestono un ruolo chiave nelle dinamiche della coltivazione e possono influenzare significativamente la resa delle colture.

Riguardo alla biomassa fuori terra, è emerso un aumento nella coltivazione con sistema APV in entrambi gli anni, con un incremento significativo riscontrato soprattutto nel 2018. Nel dettaglio, la resa in sostanza secca della biomassa fuori terra è stata di 0,37 tonnellate per ettaro nella zona REF e 0,55 tonnellate per ettaro in APV nel 2017. Nel 2018, tale resa è stata di 1,1 tonnellate per ettaro nella zona REF e 1,4 tonnellate per ettaro in APV (*Weselek et al., 2021*).

Relativamente al bulbo di sedano rapa, si è notata una resa di 11,9 tonnellate per ettaro in REF e 9,7 tonnellate per ettaro in APV nel 2017. Nel 2018, la resa è stata di 9,6 tonnellate per ettaro in REF e 10,8 tonnellate per ettaro in APV. È importante sottolineare che, in entrambi gli anni e trattamenti, le rese sono risultate inferiori rispetto alla media nazionale per il sedano rapa coltivato con metodo biologico, la quale si attestava a 29,6 tonnellate per ettaro nel 2017 e 31,1 tonnellate per ettaro nel 2018. Le condizioni climatiche, caratterizzate da periodi secchi soprattutto nella primavera 2017 e

durante l'estate 2018, potrebbero aver influito negativamente sullo sviluppo dei bulbi. Va menzionato che le piante di sedano rapa della sperimentazione non sono state irrigate. Questo è rilevante in considerazione del fatto che il sedano rapa è notoriamente sensibile alla siccità, e lo stress idrico può portare a una formazione ridotta e a bulbi poco sviluppati.

Per quanto riguarda il peso medio dei singoli bulbi, è stato di 196 g (REF) e 158 g (APV) nel 2017, e di 186 g (REF) e 197 g (APV) nel 2018. Il diametro medio dei bulbi era di 7,3 cm (REF) e 6,6 cm (APV) nel 2017 e di 7,5 cm (REF e APV) nel 2018. Entrambi i pesi e i diametri medi possono essere considerati sottodimensionati in quanto per soddisfare i criteri del grossista a cui l'azienda si rivolge, il sedano rapa deve soddisfare lo standard UNECE (Commissione economica per l'Europa delle Nazioni Unite) di classe 1 per gli ortaggi a radice e tubercolo. Inoltre, i bulbi devono avere un peso minimo di 350 g se si vendono solo i bulbi, o una dimensione minima di 60 mm se si vendono piante intere (bulbo e foglie). Tenendo conto di questi criteri e supponendo che vengano venduti solo i bulbi (senza foglie): dei 48 bulbi raccolti da ciascun trattamento nel 2017, solo uno (APV) e quattro (REF) erano effettivamente commercializzabili (*Weselek et al., 2021*).

L'analisi della composizione chimica dei bulbi di sedano rapa ha rivelato che la maggior parte dei parametri analizzati è stata influenzata più dall'anno che dal trattamento. Non sono state riscontrate differenze significative per Si, Co e I, poiché le concentrazioni erano al di sotto delle soglie rilevabili. Non sono state riscontrate differenze significative tra i trattamenti per la proteina grezza e i grassi grezzi. Nel 2017 la proteina grezza era leggermente più alta in APV rispetto a REF. Tuttavia, la proteina grezza in APV era inferiore a quella di REF nel 2018, il che può essere spiegato da un effetto di diluizione, poiché le rese in APV erano inferiori nel 2017 e superiori nel 2018. I grassi grezzi sono stati influenzati dall'anno, ma praticamente non dal trattamento, mentre il contenuto di fibra è risultato inferiore in APV. Il contenuto di C è stato significativamente più basso in APV in entrambi gli anni, indicando che meno C è stato allocato dai germogli ai bulbi, nonostante la maggiore biomassa dei germogli. Ciò potrebbe essere dovuto a una minore assimilazione fotosintetica della CO₂ in conseguenza di un minore irraggiamento. Il contenuto di Mn è diminuito in APV in entrambi gli anni, ma in modo significativo solo nel 2017. Il Ni è diminuito in APV in entrambi gli anni. Il contenuto di Cd e Pb è risultato significativamente più basso in APV in entrambi gli anni. In generale, il sedano è noto per accumulare metalli pesanti come Cd e Pb. Tuttavia, le concentrazioni rilevate erano di gran lunga inferiori alle concentrazioni massime accettabili. È noto che l'assorbimento dei nutrienti (e, di conseguenza, le concentrazioni di vari minerali e oligoelementi) si riduce in caso di siccità, pertanto, il contenuto minerale significativamente più

basso nel 2018 è stato probabilmente causato da un basso contenuto idrico del suolo in seguito alle condizioni climatiche secche dell'estate, che ha portato a un assorbimento radicale e a una traslocazione ridotta ai germogli (*Weselek et al., 2021*). I risultati mostrano che la coltivazione in un sistema APV ha avuto solo un leggero effetto sulla composizione chimica del sedano rapa. Le concentrazioni di C, Ni e Mn sono diminuite con l'APV; tutti gli altri parametri sono stati influenzati principalmente dall'anno. Per quanto riguarda i nitrati (di effetto negativo sulla salute umana), il sedano ne è un accumulatore. È stato dimostrato che in diverse colture, tra cui il sedano da foglia, le concentrazioni di nitrati sono correlate all'intensità dell'ombreggiatura, pertanto, le prove future dovranno verificare se le concentrazioni di nitrati in ortaggi come il sedano rapa sono influenzate dalla coltivazione sotto APV.

Lo studio di *Weselek et al. (2021)* ha dimostrato che all'ombra parziale dei moduli APV si possono ottenere rese sufficienti, ma in presenza di condizioni climatiche ottimali per la coltura, si possono verificare riduzioni della resa fino al 20%. Al contrario, in condizioni climatiche calde e secche, la riduzione dell'irraggiamento solare e le alterazioni microclimatiche dei sistemi APV (ad esempio, l'abbassamento delle temperature del suolo, dell'aria e i potenziali vantaggi nell'efficienza dell'uso dell'acqua) possono essere vantaggiose per la produzione vegetale e portare a un aumento delle rese.

In futuro si dovrebbe analizzare anche la concentrazione di carboidrati, un elemento importante per la qualità nutrizionale dei bulbi di sedano rapa. Tuttavia, poiché le condizioni climatiche sono state piuttosto estreme in entrambi gli anni, portando a livelli di resa comparabilmente bassi in generale, sono necessarie ulteriori prove in campo per studiare come si svilupperebbero le rese in condizioni più ottimali e a lungo termine. L'analisi chimica del contenuto di C e di fibre ha evidenziato un'alterazione del metabolismo del carbonio e un potenziale ritardo nella maturazione in APV. Pertanto, sono necessari ulteriori studi per verificare se un prolungamento del periodo di vegetazione del sedano rapa possa essere vantaggioso per la resa finale del bulbo attraverso lo sfruttamento di tutto il potenziale immagazzinato nell'aumento della biomassa dei germogli sotto APV (*Weselek et al., 2021*).

3.3 VITE

Uno studio triennale, condotto tra il 2017 e il 2019, ha valutato l'impatto dell'ombreggiamento causato dai pannelli fotovoltaici sulle attività fisiologiche e sulle prestazioni della vite (*Vitis vinifera* L.) della varietà Corvina (*Ferrara et al., 2022*).

Si è studiato l'adattamento della vite, in particolare della varietà Corvina, alle variazioni del regime di luce causate dall'ombreggiamento di un sistema APV. La capacità delle piante di adattarsi alle condizioni di luce è un fenomeno ben documentato, con notevoli modifiche nelle proprietà delle foglie, nella capacità fotosintetica per area e nella struttura della chioma (*Niinemets et al., 2015*). Questa adattabilità ha portato a considerare l'uso di pannelli fotovoltaici sopra le coltivazioni agricole, come una prospettiva interessante per ottimizzare l'uso dell'energia solare.

Attraverso un'analisi approfondita delle attività fisiologiche e delle prestazioni della vite, lo studio di Ferrara et al. (2022) vuole fornire dettagli chiave utili agli agricoltori, agli enologi e a coloro che promuovono la sostenibilità ambientale. L'obiettivo è fornire informazioni pratiche che possano guidare le decisioni agricole future, cercando un equilibrio tra l'uso dell'energia solare per la produzione di energia e l'ottimizzazione della produzione vitivinicola. Questo approccio mira a promuovere una coesistenza armoniosa tra agricoltura e sostenibilità energetica, enfatizzando l'importanza di considerare attentamente l'impatto ambientale delle scelte agricole. Infatti, la presenza dei pannelli fotovoltaici può migliorare il microclima dei vigneti in presenza di un innalzamento delle temperature e di scarsità d'acqua, anche in zone dove questi problemi non sono quasi mai stati affrontati, come le aree viticole del nord Italia.

Le viti prese in esame nello studio sono state impiantate in Veneto (zona Valpolicella) nel 2004, in un terreno aperto dotato di un sistema di irrigazione a pioggia. Il sesto d'impianto è di 1,0 m all'interno dei filari e 3,0 m tra i filari, seguendo una configurazione a pergola. Nel vigneto, 15 filari sono stati coperti da pannelli fotovoltaici (parcella APV) per una lunghezza di 10 m (10 viti per filare) (Figura 15) e tutte le misurazioni sono state effettuate dai filari centrali. I pannelli sono stati posizionati a 2,6 m dal suolo all'altezza massima e a 1,9 m all'altezza minima, utilizzando e innalzando la struttura di sostegno del vigneto, senza costi aggiuntivi. I pannelli sono stati installati in direzione sud. I pannelli sono stati fissati e hanno schermato le viti dall'eccessiva luminosità del sole di mezzogiorno, determinando un'ombreggiatura del 75% (*Ferrara et al., 2022*).

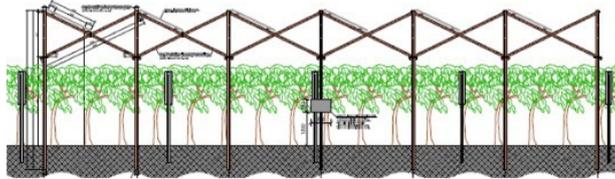


Figura 15 - Viti coperte da pannelli fotovoltaici (Fonte: Ferrara et al., 2022)

Una sezione simile del vigneto, distante 5 filari dalla parcella APV, è stata utilizzata come controllo in pieno sole (FS). Tutte le pratiche viticole, compresa la concimazione e il controllo dei parassiti, sono state simili tra le due parcelle e paragonabili alle pratiche agronomiche standard adottate nella zona viticola circostante (Ferrara et al., 2022).

In primis, è stata valutata la fertilità delle gemme durante il periodo di fioritura mediante il conteggio dei grappoli per ogni pianta di vite. Si è misurata poi la resa (espressa in kg/vite) e il numero di grappoli, determinati al momento della vendemmia, considerando la media di dieci piante (dei filari centrali) per ciascuna replica e utilizzando una bilancia portatile. La raccolta dell'uva è stata eseguita il 20 settembre (2017), il 30 settembre (2018) e il 22 settembre (2019). Il peso dei grappoli è stato utilizzato come parametro di resa per vite, considerando il numero di grappoli.

Sulle stesse piante sono stati prelevati tre campioni, composti ciascuno da 100 acini, per ogni replica APV e FS. Successivamente, per ciascuna replica, i 100 acini singoli sono stati pesati, quindi pressati, e il succo risultante è stato analizzato per determinare:

- solidi solubili totali (TSS) espressi in %, importanti nella determinazione del grado zuccherino.
- pH, importante per ragioni di stabilità chimica e fermentazione.
- acidità titolabile (TA) espressa in g/L come acido tartarico.
- polifenoli totali.
- antociani totali.

Si è visto che la resa per vite non è risultata significativamente diversa tra i due trattamenti APV e FS nel 2017 (<4 kg per APV e FS), mentre sono emerse maggiori differenze nelle due stagioni

successive, quando la resa delle viti FS è risultata significativamente superiore a quella delle viti APV. Tuttavia, le viti APV hanno dato una resa soddisfacente se si considera anche la produzione di energia rinnovabile. La resa della vite APV è stata compresa tra 3,42 e 4,85 kg/vite, mentre quella della vite FS è stata di 3,78-5,66 kg/vite e i valori più alti sono stati ottenuti nel 2019 sia per la vite APV che per quella FS (*Ferrara et al., 2022*). Non sono state riscontrate differenze per il pH e per il contenuto di acido tartarico e malico (che danno effetti sulle caratteristiche gustative, aromatiche e igieniche del vino) tra i due trattamenti, tranne che per il 2019, quando i grappoli APV avevano contenuti più elevati di acido malico e tartarico. Per quanto riguarda i TSS sono risultati significativamente più alti per la vite FS in tutte le stagioni, mentre TA è risultata significativamente più alta nelle viti APV. La vite APV non ha mostrato differenze tra gli anni per quanto riguarda i TSS (19,63% di media), mentre la vite FS ha avuto il valore più alto nel 2018 (22,6%) e il più basso nel 2019 (20,8%).

In aggiunta, è stato osservato che l'ombreggiamento dei pannelli fotovoltaici ha determinato una diminuzione sia dei polifenoli che degli antociani nel corso delle tre stagioni, con una riduzione meno marcata nel 2018 e nel 2019, possibilmente attribuibile a differenti condizioni climatiche o ad una forma di adattamento delle viti alle condizioni di ombreggiamento. Riguardo gli antociani, nel 2019, sono emerse differenze tra i vitigni APV e FS, con la presenza di antociani non acilati in maggior quantità nei vitigni APV e antociani acilati totali significativamente più abbondanti nei vitigni FS. Le antocianine acilate hanno una maggiore stabilità e attività antiossidante rispetto a quelle non acilate e sono più stabili in soluzioni acquose; quindi, d'interesse per l'industria alimentare e delle bevande (*Galaffu et al., 2015*), ma la biodisponibilità delle antocianine in quanto tali è stata estremamente bassa e l'acilazione la riduce ulteriormente.

La diminuzione della resa nelle viti coltivate sotto il sistema APV può essere spiegata dalle condizioni microclimatiche sfavorevoli nella chioma ombreggiata a causa della riduzione dell'intercettazione della luce e della conseguente assimilazione del carbonio, che può variare di giorno in giorno e stagionalmente. Si è visto che le colture arboree come la vite, possono essere coltivate sotto i pannelli con rese costanti, anche se generalmente inferiori a quelle ottenute in campo aperto non coperto.

I dati sulla produttività di questo vigneto nel Nord Italia sono promettenti per l'applicazione di pannelli fotovoltaici sopra un vigneto di uva da vino a causa degli effetti limitati sulla resa, ma in condizioni di limitata disponibilità idrica, intensa radiazione solare e alte temperature, gli effetti negativi dell'ombra sulla resa possono essere molto ridotti. Data l'influenza limitata per i parametri

di produttività della vite (resa, numero di grappoli e peso), antociani, TSS e polifenoli; questi risultati dimostrano che i pannelli influenzano il microclima e la fisiologia della vite, ma in condizioni climatiche calde e secche i risultati potrebbero essere molto interessanti sia per l'energia che per la produzione di frutta. Pertanto, è necessario condurre ulteriori esperimenti in queste condizioni ambientali, anche in vista dei cambiamenti climatici (Ferrara et al., 2022).

3.4 CAVOLO CAPPuccio

Finora sono stati riportati gli impatti delle condizioni APV sulla resa produttiva e sulla composizione chimica delle colture, tuttavia, l'effetto della produzione APV sulla qualità sensoriale e sull'accettabilità dei prodotti da parte dei consumatori rimane inesplorato. Pertanto, per colmare questa lacuna di conoscenza, nel 2020 è stata condotta una sperimentazione (Moon et al., 2022) coltivando cavolo cappuccio (*Brassica oleracea var. capitata*) in un sistema APV nell'azienda della Chonnam National University, in Corea.

Brassica oleracea var. capitata, contiene sostanze fitochimiche anticancerogene, in particolare glucosinolati e i suoi prodotti di idrolisi. In contrasto con i suoi effetti salutari, ha anche sostanze fitochimiche che influiscono negativamente sul gusto o sul profumo. In Corea viene consumato crudo, cotto o sottoforma di succo. Infatti, secondo un rapporto del Ministero dell'Agricoltura, dell'Alimentazione e degli Affari Rurali sulle statistiche alimentari e di ristorazione nel 2020, la quota di mercato dei succhi di verdura in Corea del Sud era di 0,15 miliardi di dollari (Moon et al., 2022). Le persone hanno iniziato a bere succo di cavolo perché era facile da consumare ed efficace per guarire dalle ulcere gastriche (Moon et al., 2022).

Lo studio effettuato da Moon et al. (2022), indaga l'effetto della coltivazione in un sistema APV sulla qualità sensoriale del succo di cavolo e verifica se influisce sull'accettabilità da parte dei consumatori. Per far ciò, un sistema APV è stato installato nell'azienda della Chonnam National University. L'area totale della struttura APV era di 480 m², con colonne alte 3,3 m (con una distanza di 4 m × 5 m). Le specifiche e la disposizione dei pannelli fotovoltaici erano le seguenti: ogni pannello aveva lunghezza, larghezza e spessore rispettivamente di 1,68 m, 0,95 m e 30 mm. L'angolo dei pannelli era di 35 gradi. I pannelli bi-facciali erano disposti su quattro colonne. La capacità totale di generazione di energia dei pannelli fotovoltaici era di 20,16 KW (Figura 16). Le variazioni dei fattori ambientali, tra cui la temperatura dell'aria, la temperatura del suolo e il contenuto idrico del suolo durante la stagione di crescita, influenzano il contenuto di glucosinolati, in particolare di indolil

glucosinolati. Pertanto, il microclima in condizioni di APV può alterare il contenuto di glucosinolati, che potrebbe influenzare le preferenze dei consumatori.

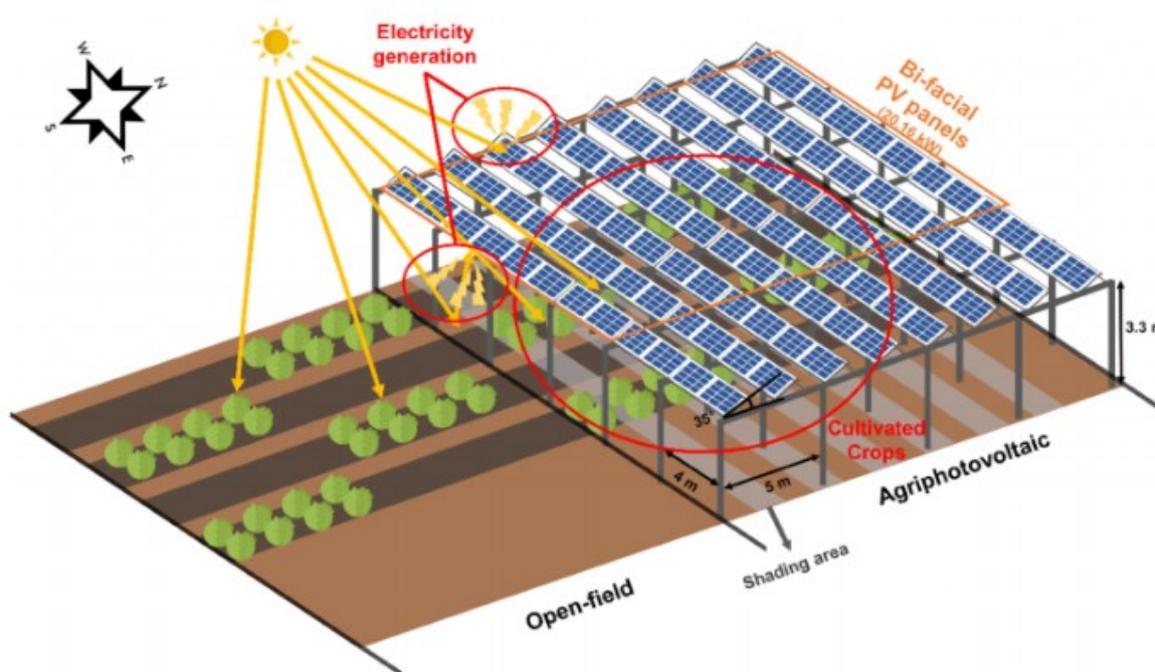


Figura 16 - Schema concettuale dell'impianto APV (Fonte: Moon et al., 2022)

Compreso che i glucosinolati e i loro prodotti di idrolisi degli ortaggi di Brassica sono fortemente associati alla preferenza dei consumatori e agli effetti sulla salute (varie attività antitumorali), si è voluto determinare se l'APV influisce sulla qualità del prodotto e sui composti che promuovono la salute umana.

Le piantine sono state trapiantate in letti rialzati di 30 cm, coperti con pacciamatura di plastica nera a intervalli di 35×35 cm, il 6 settembre 2020. I cavoli sono stati raccolti il 15 gennaio 2021 per evitare il freddo estremo. Sono stati campionati e raggruppati 5 cavoli per ogni sito. È stato pesato e misurato il diametro dei cavoli con una bilancia e un righello subito dopo la raccolta. Il diametro è stato misurato sull'asse più lungo della larghezza. 5 cavoli freschi per ogni replica sono stati tagliati in quarti, liofilizzati, macinati e conservati in un congelatore a -20°C fino alle analisi fitochimiche.

Per quanto riguarda le condizioni microclimatiche del sistema, nell'OF, la temperatura media dell'aria, la temperatura massima dell'aria e la temperatura media del suolo sono stati rispettivamente di 0,2°C, 0,2°C e di 0,5°C superiori a quelli dell'APV.

Si è potuto notare che il cavolo coltivato con il sistema OF era leggermente più compatto di quello coltivato con il sistema APV (Figura 17A), mentre non c'erano differenze significative nelle

dimensioni della superficie (Figura 17B). Il peso dei cavoli coltivati in OF (1606 ± 504 g) non era significativamente diverso da quelli coltivati in APV (1450 ± 315 g), mentre la riduzione della resa in peso medio è stata di 156 g. Il tasso di perdita di peso dei cavoli coltivati in APV rispetto a OF è stato del 9,7%. Il diametro dei cavoli coltivati in OF ($21,3 \pm 3,1$ cm) non era significativamente diverso da quelli coltivati in APV ($21,1 \pm 1,9$ cm).

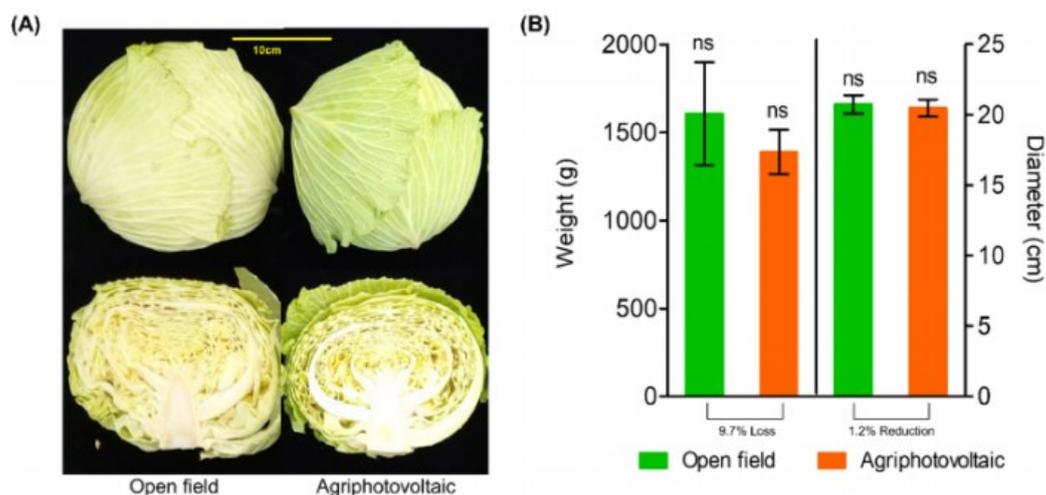


Figura 17 – Immagini del cavolo, peso e diametro (Fonte: Moon et al., 2022)

Per determinare se l'APV influisce sulla qualità del prodotto e sui composti che promuovono la salute umana, sono stati misurati i glucosinolati nella polvere di cavolo liofilizzata, ottenuta dalle coltivazioni in OF e in APV. I risultati ottenuti tramite gascromatografia non hanno mostrato differenze significative tra i cavoli freschi nelle rispettive parcelle (Tabella 2). Inoltre, i glucosinolati non sono stati rilevati nel succo di cavolo (Tabella 2) a causa della termodegradazione, e questi risultati sono supportati da un'indagine precedente (Moon et al., 2022), che ha mostrato una perdita del 74,5% dei glucosinolati totali dopo 25 minuti di cottura.

Tabella 2: Glucosinolati in cavoli coltivati in OF e APV (Fonte: Moon et al., 2022).

Glucosinolati	Campioni liofilizzati ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$)		Succo ($\mu\text{mol}\cdot\text{mL}^{-1}$)	
	OF	APV	OF	APV
Totale Glucosinolati	16.86 ± 1.79	16.21 ± 2.47	-	-

Il succo di cavolo è stato prodotto dalla Jangsoo Food Corp. (Naju, Corea) utilizzando il metodo comunemente impiegato per la produzione di succo di cavolo. Tutti i cavoli raccolti, coltivati in OF e APV, sono stati riuniti e spremuti in uno spremiagrumi commerciale (a una temperatura superiore a 110 °C, a una pressione di 2 kPa per 3 ore) per simulare una produzione commerciale di massa. I

cavoli riscaldati sono stati raffreddati lentamente per oltre 30 minuti e poi spremuti. Il succo filtrato è stato confezionato in buste e sterilizzato a 100°C per 20 minuti. Le buste sono state conservate a 4°C in frigorifero fino al momento dell'uso.

Per valutare l'accettabilità del succo di cavolo da parte dei consumatori, è stato sviluppato un test coinvolgendo un totale di 70 soggetti, 35 uomini e 35 donne, con distribuzione per fasce d'età di 48 persone di 20 anni, 8 di 30 anni, 8 di 40 anni e 8 di 50 anni e oltre. Le buste sterilizzate e refrigerate sono state aperte e il succo è stato versato in bottiglia per essere omogeneizzato, preparando complessivamente 5 campioni da 20 ml: 3 per il test del triangolo (presentazione di tre campioni, di cui due sono identici e uno è diverso) e 2 per il test degli attributi.

La valutazione sensoriale è stata condotta il 21 luglio 2021, presso la Chonnam National University, seguendo una procedura specifica. Inizialmente, soggetti non addestrati hanno valutato le caratteristiche sensoriali (colore, profumo e odore) di tre campioni e hanno poi scelto un campione dispari con un numero casuale di tre cifre (test del triangolo). Per nascondere l'identità del campione e condurre la valutazione senza pregiudizi, i campioni sono stati divisi in due gruppi assegnandoli in maniera casuale ai 70 partecipanti:

- set A composto da 2 campioni OF e 1 APV
- set B composto da 2 campioni APV e 1 OF

Successivamente, i campioni nelle tazze etichettate con due lettere diverse sono stati valutati dai soggetti per valutarne la preferenza, dopo aver consumato uno spuntino e ricevuto acqua per sciacquarsi la bocca. Tutti i soggetti hanno valutato i campioni in un ambiente con la stessa temperatura e la stessa luce.

Il questionario ha incluso domande sull'esperienza dei soggetti nel bere succo di cavolo (esperti o inesperti) e sulla loro preferenza. Il test del triangolo è stato adottato per verificare se le persone sono in grado di distinguere la differenza tra i due campioni (Figura 18).

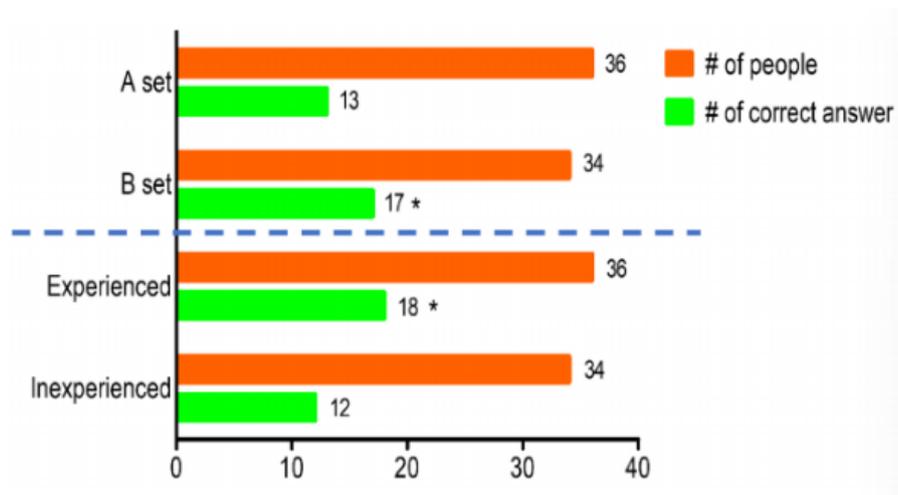


Figura 18 – Il numero (#) di persone che hanno scelto un campione come diverso dagli altri campioni e il numero totale in ciascun gruppo (Fonte: Moon et al., 2022)

In questo esperimento, 30 dei 70 soggetti erano in grado di distinguere il campione diverso del Set dagli altri, ma non si trattava di una differenza significativa. Tuttavia, considerando che la metà dei soggetti ha ricevuto diverse configurazioni di campioni, non c'era alcuna differenza nel set A (2 OF e 1 APV, $p=0,724$) mentre c'era una differenza significativa nel set B (2 APV e 1 OF, $p=0,039$). Tra i soggetti, 36 avevano esperienza nel bere succo di cavolo e quelli con esperienza hanno distinto la differenza in modo significativo ($p=0,034$). Questi soggetti, alla domanda su come fossero in grado di distinguere il campione strano tra i 2 campioni di OF e 1 di APV, hanno risposto "gusto forte", "colore marrone più scuro" e "sensazione generale di forza". È stato notato che i soggetti che hanno ricevuto il set B o che hanno sperimentato il succo di cavolo in precedenza sono stati in grado di distinguere, anche se la differenza non era significativa rispetto al numero totale di persone. Inoltre, i partecipanti che hanno distinto il set B hanno dato punteggi più alti nel profumo e nel flusso rispetto al set A (Moon et al., 2022).

Il risultato del test degli attributi ha mostrato che i punteggi medi per il colore, il profumo e il sapore sono stati rispettivamente di 5,2, 4,5 e 4,9, sulla base di una scala edonica a 7 punti (Tabella 3).

Tabella 3: Test di attribuzione di come il campione OF differisce dal campione APV per colore, profumo e sapore (Fonte: Moon et al., 2022).

Totale			Esperti			Inesperti		
Colore	Profumo	Gusto	Colore	Profumo	Gusto	Colore	Profumo	Gusto
5.2±1.2	4.5 ±1.2	4.9 ±1.4	5.2 ±1.2	4.7 ±1.1	5.1 ±1.4	5.2 ±1.2	4.3 ±1.4	4.5 ±1.3

I punteggi degli attributi sono stati ricavati da una scala edonica a 7 punti per valutare la forza del campione OF rispetto al campione APV (1 = estremamente debole, 2 = molto debole, 3 = moderatamente debole, 4 = nessuna differenza, 5 = moderatamente forte, 6 = molto forte e 7 = estremamente forte)

La media totale del colore, del profumo e del sapore è stata rispettivamente di 4,92-5,48, 4,19-4,78 e 4,52-5,20, suggerendo che il colore e il sapore erano diversi. I soggetti che avevano sperimentato il consumo di succo di cavolo (n= 36) hanno ottenuto un punteggio di 5,2, 4,7 e 5,1, con medie di 4,78-5,56, 4,29-5,05 e 4,60-5,56, rispettivamente, suggerendo che il colore e il gusto erano diversi. I soggetti che non avevano mai bevuto succo di cavolo (n= 34) hanno ottenuto un punteggio di 5,2, 4,3 e 4,5, con una media rispettivamente di 4,79-5,64, 3,82-4,78 e 4,07-5,02, suggerendo che anche il colore e il gusto erano diversi. Le persone che avevano già sperimentato il succo di cavolo tendevano a giudicare il succo di cavolo di OF più forte di quello di APV, rispetto alle persone inesperte. Tuttavia, a prescindere da questi risultati, la preferenza tra i campioni OF e APV è stata uguale (34:34; 2 risposte "no"; n= 70). Ciò indica che la differenza osservata dai soggetti non era il livello critico di differenza per la loro preferenza.

In conclusione quindi, è stata analizzata la possibile differenza di qualità del cavolo coltivato in OF e APV e del suo succo estratto ad alta temperatura, in modo empirico. Non sono state riscontrate differenze di resa e di metaboliti tra il cavolo coltivato in OF e in APV. Tuttavia, il succo di cavolo ottenuto da ciascun trattamento, ha mostrato differenze nella risposta dei consumatori a una serie di test triangolari. Considerando l'insieme, la produzione di succo di cavolo in massa a livello commerciale può mostrare differenze nei metaboliti; tuttavia, questa differenza non è stata abbastanza elevata da alterare le preferenze dei consumatori sul succo di cavolo. Lo studio è stato il primo che testa le preferenze dei consumatori e la differenziazione sensoriale di cavolo cappuccio coltivato in OF e APV. Le diverse pratiche di coltivazione, la selezione della cultivar, il processo di estrazione e altri fattori possono influenzare la qualità del cavolo e la sua qualità sensoriale, per cui sono necessari ulteriori esperimenti. Tuttavia, questo studio fornirà ai consumatori e alla comunità scientifica informazioni di base sulla qualità dei prodotti coltivati in un sistema APV (*Moon et al., 2022*).

4.0 CONCLUSIONI

Gli studi che ho analizzato nascono dalla necessità di sperimentare la produzione di colture agricole nello stesso terreno che prevede la produzione d'energia solare, favorendo la transizione verso fonti di energia rinnovabile e mitigando il consumo d'acqua, grazie alla maggiore umidità del suolo che si viene a creare nel sistema APV.

L'APV emerge come una tecnologia all'avanguardia in grado di agevolare il conseguimento degli obiettivi previsti dalla transizione ecologica. Questo si traduce in un aumento della redditività nel settore agricolo, grazie alla produzione delle colture e alla produzione di energia elettrica.

Per quanto riguarda le quattro colture esaminate, nei broccoli si è visto che l'ombreggiatura in APV ha aumentato la preferenza dei consumatori per il prodotto, migliorandone la qualità estetica e portando ad avere una scalarità del raccolto migliore. La coltivazione del sedano rapa invece, è stata influenzata in vari modi, in quanto la radiazione fotosinteticamente attiva è stata ridotta di circa il 30% in entrambi gli anni dello studio. Sia l'altezza della coltura che l'indice di area fogliare sono aumentati in risposta alle condizioni di ombra, portando a una biomassa fuori terra significativamente più elevata. Né le rese dei bulbi né la loro composizione chimica sono state significativamente influenzate dall'APV, confermando che il sedano rapa può essere considerato una coltura adatta a questa coltivazione, sebbene l'analisi chimica del contenuto di C e di fibre abbia evidenziato un'alterazione del metabolismo del C e un potenziale ritardo nella maturazione in APV. Pertanto, sono necessari ulteriori studi per verificare se un prolungamento del periodo di vegetazione del sedano rapa possa essere vantaggioso per la resa finale dei bulbi, sfruttando tutto il potenziale immagazzinato nell'aumento della biomassa dei germogli sotto APV. Riguardo la vite, la resa si è ridotta più come peso del grappolo che come peso dell'acino. I solidi solubili totali, insieme ai polifenoli e agli antociani, sono risultati meno concentrati nelle uve APV, ma il contenuto di acidi organici è risultato più elevato, un dato importante per le uve bianche coltivate in climi caldi, dove le uve vengono spesso raccolte a stadi avanzati di maturazione con alti livelli di zuccheri, ma livelli molto bassi di acido. In merito al cavolo cappuccio, non sono state riscontrate differenze di resa e di metaboliti tra il cavolo coltivato in APV e il controllo. Tuttavia, il succo di cavolo ottenuto da campioni raggruppati di ciascun trattamento ha mostrato differenze nei metaboliti e nella risposta dei consumatori, differenza che però non è stata abbastanza significativa da alterare le preferenze dei consumatori sul succo di cavolo.

Come sistema co-produttivo, i vantaggi dell'APV sono evidenti: aumento del reddito grazie alla produzione aggiuntiva di energia rinnovabile e potenziali benefici per la produzione di colture in

aree aride, abbandonate e marginali. Rimangono però da approfondire molti aspetti che potrebbero avere un effetto negativo. In linea di principio, l'APV potrebbe essere una possibile chiave di svolta per il settore energetico italiano e per l'intera filiera agroalimentare. Sono però da valutare gli incentivi nazionali e regionali nell'ottica di perseguire gli obiettivi di decarbonizzazione e i punti definiti dall'agenda 2030. La strada della ricerca risulta ancora aperta in questo settore ed in salita, solo con il tempo e la ricerca si riusciranno a comprendere al meglio tutte le possibili opportunità e/o criticità, in quanto le informazioni sugli effetti dei sistemi APV sui parametri qualitativi delle colture sono ancora scarse.

BIBLIOGRAFIA

- Agostini, A., M. Colauzzi, e S. Amaducci. 2021. «Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment». *Applied Energy* 281:116102. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116102.
- Andrea, Andrea. s.d. «Presentazione delle linee guida per l'applicazione dell'agro-fotovoltaico in Italia».
- Anon. s.d. «Sustainability | Free Full-Text | Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns)». Recuperato 12 gennaio 2024 (<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6871>).
- Barron-Gafford, Greg, Mitchell Pavao-Zuckerman, Rebecca Minor, Leland Sutter, Isaiah Barnett-Moreno, Daniel Blackett, Moses Thompson, Kirk Dimond, Andrea Gerlak, Gary Nabhan, e Jordan Macknick. 2019. «Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands». *Nature Sustainability* 2. doi: 10.1038/s41893-019-0364-5.
- Chae, Seung-Hun, Hye Joung Kim, Hyeon-Woo Moon, Yoon Hyung Kim, e Kang-Mo Ku. 2022. «Agrivoltaic Systems Enhance Farmers' Profits through Broccoli Visual Quality and Electricity Production without Dramatic Changes in Yield, Antioxidant Capacity, and Glucosinolates». *Agronomy* 12(6):1415. doi: 10.3390/agronomy12061415.
- Dinesh, Harshavardhan, e Joshua Pearce. 2016. «The Potential of Agrivoltaic Systems». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54:299–308. doi: 10.1016/j.rser.2015.10.024.
- Dupraz, C., H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, e Y. Ferard. 2011. «Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes». *Renewable Energy* 36(10):2725–32. doi: 10.1016/j.renene.2011.03.005.
- Ferrara, Giuseppe, Maurizio Boselli, Marino Palasciano, e Andrea Mazzeo. 2023. «Effect of shading determined by photovoltaic panels installed above the vines on the performance of cv. Corvina (*Vitis vinifera* L.)». *Scientia Horticulturae* 308:111595. doi: 10.1016/j.scienta.2022.111595.
- Galaffu, N., K. Bortlik, e M. Michel. 2015. «5 - An industry perspective on natural food colour stability». Pp. 91–130 in *Colour Additives for Foods and Beverages, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, a cura di M. J. Scotter. Oxford: Woodhead Publishing.
- Guastella, Salvatore. s.d. «Gli impianti fotovoltaici in attività agricole»:
- Mamun, Mohammad Abdullah Al, Paul Dargusch, David Wadley, Noor Azwa Zulkarnain, e Ammar Abdul Aziz. 2022. «A review of research on agrivoltaic systems». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 161:112351. doi: 10.1016/j.rser.2022.112351.
- Marrou, H., L. Guilioni, L. Dufour, C. Dupraz, e J. Wery. 2013. «Microclimate under Agrivoltaic Systems: Is Crop Growth Rate Affected in the Partial Shade of Solar Panels?» *Agricultural and Forest Meteorology* 177:117–32. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.04.012.
- Moon, Hyeon-Woo, e Kang-Mo Ku. 2022. «Impact of an Agrivoltaic System on Metabolites and the Sensorial Quality of Cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata) and Its High-Temperature-Extracted Juice». *Foods (Basel, Switzerland)* 11. doi: 10.3390/foods11040498.

- Niinemets, Ülo, Trevor F. Keenan, e Lea Hallik. 2015. «A Worldwide Analysis of Within-Canopy Variations in Leaf Structural, Chemical and Physiological Traits across Plant Functional Types». *New Phytologist* 205(3):973–93. doi: 10.1111/nph.13096.
- Ramos-Fuentes, Isaac A., Yassin Elamri, Bruno Cheviron, Cyril Dejean, Gilles Belaud, e Damien Fumey. 2023. «Effects of shade and deficit irrigation on maize growth and development in fixed and dynamic AgriVoltaic systems». *Agricultural Water Management* 280:108187. doi: 10.1016/j.agwat.2023.108187.
- Sánchez-Friera, Paula, Blanca Lalaguna, Daniel Montiel, J. Gil, Luis Jaime Caballero, Jesús Alonso, Michel Piliouguine, e Mariano Carmona. 2007. «Development and characterisation of industrial bifacial PV modules with ultra thin screen-printed solar cells». *22nd European Photovoltaic Solar Energy and Exhibition, Millan, Italy* 2708–11.
- Topcu, Yasin, Adem Dogan, Zehra Kasimoglu, Hilal Sahin-Nadeem, Ersin Polat, e Mustafa Erkan. 2015. «The effects of UV radiation during the vegetative period on antioxidant compounds and postharvest quality of broccoli (*Brassica oleracea* L.)». *Plant Physiology and Biochemistry* 93:56–65. doi: 10.1016/j.plaphy.2015.02.016.
- Weselek, Axel, Andrea Bauerle, Sabine Zikeli, Iris Lewandowski, e Petra Högy. 2021. «Effects on Crop Development, Yields and Chemical Composition of Celeriac (*Apium Graveolens* L. Var. *Rapaceum*) Cultivated Underneath an Agrivoltaic System». *Agronomy* 11(4):733. doi: 10.3390/agronomy11040733.