

## L'agrivoltaico come strumento per la mitigazione e l'adattamento al cambiamento climatico

Affinché l'agrivoltaico possa garantire i servizi e i vantaggi a cui aspira – dalla mitigazione delle emissioni alla tutela delle colture, fino al miglioramento della resilienza climatica e al sostegno economico degli agricoltori – è indispensabile considerare e approfondire: le configurazioni tecnologiche adottate, il quadro normativo di riferimento, i metodi di progettazione e ottimizzazione basati su indicatori di performance, le piattaforme di simulazione e i casi pilota, l'agricoltura di precisione e l'IA, nonché l'integrazione paesaggistica, la biodiversità e l'accettazione sociale.

DOI 10.12910/EAI2025-026



di Stefano Amaducci, Professore ordinario presso il Dipartimento di Produzioni Vegetali Sostenibili dell'Università Cattolica del Sacro Cuore

**L**a sfida di contenere l'aumento della temperatura globale entro gli obiettivi dell'Accordo di Parigi richiede un'accelerazione senza precedenti nella diffusione delle energie rinnovabili. Il fotovoltaico (PV), con la sua modularità e il costante calo dei costi di produzione, è destinato a svolgere un ruolo fondamentale nella decarbonizzazione del sistema energetico; studi recenti evidenziano però che per mantenere il riscaldamento al di sotto di 1,5-2 °C è necessario un'espansione su scala multi-terrawatt (Haegel et al., 2023). I sistemi tradizionali Ground-Mounted PV, che prevedono un uso del suolo monofunzionale da un lato massimizzano la produzione energetica per unità di superficie e in termini di costi, ma im-

pediscono la continuità delle attività agricole. In questo contesto, **l'agrivoltaico si presenta come una strategia dual-use in grado di conciliare la produzione di energia solare con l'attività agricola**. Attraverso l'installazione di moduli su strutture rialzate sopra le colture, verticali e potenzialmente ad inseguimento solare, l'agrivoltaico produce energia rinnovabile e, al contempo, può proteggere le piante da stress termici e idrici, generando un duplice vantaggio che coinvolge reddito agricolo e generazione elettrica. Affinché l'agrivoltaico possa garantire i servizi e i vantaggi a cui aspira – dalla mitigazione delle emissioni alla tutela delle colture, fino al miglioramento della resilienza climatica e al sostegno economico degli agricoltori – è indispensabile considerare e

approfondire in modo sistematico diversi aspetti: le configurazioni tecnologiche adottate, il quadro normativo di riferimento, i metodi di progettazione e ottimizzazione basati su indicatori di performance, le piattaforme di simulazione e i casi pilota, l'agricoltura di precisione e l'intelligenza artificiale, nonché l'integrazione paesaggistica, la biodiversità e l'accettazione sociale.

### Configurazioni tecnologiche agrivoltaiche

L'agrivoltaico, come illustrato nel report IEA-PVPS T13-29:2025 (Trommsdorff et al., 2025), comprende un insieme di sistemi caratterizzati dalla condivisione simultanea dello spazio tra produzione agricola e generazione fotovoltaica. Questi sistemi si classi-

ficano principalmente in:

- **Sistemi overhead**, con moduli posizionati su strutture rialzate (fino a 5 metri), adatti a colture orticole o permanenti, che consentono l'uso di macchinari agricoli sottostanti.
- **Sistemi verticali**, con moduli orientati nord-sud montati verticalmente sul terreno, adatti a regioni con bassa altezza solare o con elevata ventosità in cui i pannelli fungono da frangivento.
- **Sistemi interfilari**, in cui i moduli sono montati su file distanziate che lasciano spazio coltivabile tra le strutture.

**Ogni tipologia implica differenti compromessi tra produzione agricola, efficienza energetica, costi di installazione e manutenzione.** Ad esempio, i sistemi verticali mostrano buone performance in termini di ombreggiamento uniforme e minore impatto sul suolo, ma possono essere meno efficienti in termini di produzione elettrica in latitudini meridionali. I sistemi overhead, al contrario, garantiscono una migliore integrazione agricola e protezione climatica delle colture, ma richiedono maggiori investimenti strutturali. In tutti i casi, la scelta della configurazione deve tenere conto delle condizioni pedoclimatiche locali, del tipo di coltura e del valore della produzione energetica e agricola. Valutazioni economiche comparative (Zidane et al., 2025) mostrano che i sistemi mono-assiali sono spesso più vantaggiosi in regioni ad alta insolazione, mentre quelli verticali risultano competitivi in contesti nordici con alto prezzo dell'energia elettrica.

#### Quadro normativo e armonizzazione

**La crescita del settore agrivoltaico è frenata dalla mancata uniformità normativa (Chatzipanagi et al., 2023): a livello UE, ogni Stato membro adotta definizioni e requisiti**

**diversi, con linee guida spesso non vincolanti.** Un quadro regolatorio europeo armonizzato dovrebbe innanzitutto fornire una definizione tecnica chiara di agrivoltaico, distinguendo i sistemi dual-use dalle semplici installazioni PV su terreni agricoli, e stabilire criteri di performance agricola minimi, come un calo della resa non inferiore al 30%. Allo stesso tempo, sarebbe opportuno prevedere **incentivi economici mirati**, che possono spaziare da contributi a fondo perduto a sgravi fiscali, fino a meccanismi tariffari dedicati, e semplificare gli iter autorizzativi e le connessioni alle reti elettriche mediante sportelli unici regionali.

#### Progettazione, ottimizzazione e indicatori di performance

Per realizzare impianti agrivoltaici che offrano i vantaggi attesi — quali mitigazione delle emissioni, protezione delle colture e redditività economica — non basta un quadro normativo chiaro, ma **servono criteri di progettazione e ottimizzazione definiti e condivisi.** È quindi fondamentale **stabilire indicatori di performance (KPI)** in grado di guidare il dimensionamento e la configurazione dei sistemi, garantendo un equilibrio tra resa agricola, produzione energetica e sostenibilità economica.

Tra i KPI maggiormente utilizzati in letteratura e nelle applicazioni pratiche si segnalano:

- Il rapporto tra resa colturale in condizioni agrivoltaiche e resa in piena luce (Crop Ratio).
- La produzione di energia per unità di superficie agricola (MWh/ha) e per potenza installata (kWh/kWp).
- L'efficienza d'uso dell'acqua, ovvero il rapporto tra resa colturale e volume d'acqua impiegato (kg/m<sup>3</sup>).
- Il costo di investimento iniziale per megawatt di potenza dual-use (€/MWp).

Attraverso simulazioni avanzate e analisi multicriterio, è possibile valutare scenari differenti e identificare configurazioni ottimali. Studi recenti hanno evidenziato come soluzioni overhead mono-assiali con passo di circa 6 m consentano di mantenere il Crop Ratio al di sopra del 70% e massimizzare la produzione elettrica (Bellone et al., 2024), mentre sistemi verticali bifacciali ottimizzati in base a distanze tra le file di 9-10 m riescano ad uniformare la distribuzione della radiazione PAR, garantendo prestazioni colturali elevate senza sacrificare l'efficienza energetica (Campana et al., 2021). Le simulazioni permettono anche valutazioni economiche attraverso l'analisi del payback period, del Levelized Cost of Energy (LCOE) e della combinazione di reddito agricolo e proventi energetici, contribuendo alla definizione delle configurazioni più sostenibili dal punto di vista finanziario (Zidane et al., 2025).

#### Piattaforme di simulazione e casi pilota

**Le piattaforme di simulazione sono strumenti imprescindibili non solo per validare le ipotesi progettuali ma anche per condurre approfondite analisi di scenario, fondamentali per l'ottimizzazione dei sistemi agrivoltaici.** Grazie all'integrazione di modelli radiativi, termici e colturali (ad esempio GECROS, EPIC, APSIM, STICS) e all'inclusione di vincoli tecnici e normativi, queste soluzioni consentono di esplorare la variabilità delle prestazioni energetiche e agronomiche in funzione di fattori quali latitudine, climatologia, tipologie di coltura e configurazione impiantistica. In particolare, le analisi di scenario alla base degli studi di Bellone et al. (2024) e Campana et al. (2021) si basano su simulazioni che valutano il bilancio radiativo, la distribuzione della PAR, l'efficienza idrica e i costi

di investimento per decine di anni, restituendo informazioni preziose per definire il passo ottimale delle file, l'orientamento dei moduli e le strategie di gestione Operation & Maintenance. Un caso emblematico di trasferimento dalla simulazione al campo riguarda il primo impianto sperimentale agrivoltaico realizzato dall'Università Cattolica del Sacro Cuore presso il campus di Piacenza. Questa struttura, unica all'interno di un contesto universitario, fungerà da laboratorio per approfondite sperimentazioni agronomiche e tecnologiche, con sensori dedicati che monitorano microclima, umidità del suolo, resa colturale e produzione elettrica. I dati ottenuti permetteranno di perfezionare i modelli di simulazione, calibrare i parametri di progetto e definire best practice replicabili in ambienti operativi reali.

### Innovazione Tecnologica: Agricoltura di Precisione e Intelligenza Artificiale

**Il sistema agrivoltaico si configura come una "palestra" ideale dove testare, integrare e perfezionare le tecniche di agricoltura di precisione.** Tecnologie come sensori IoT, droni e GPS consentono un monitoraggio dettagliato e in tempo reale delle condizioni del suolo e delle colture. I droni, equipaggiati con telecamere multispettrali, possono mappare la salute delle piante e identificare stress idrici o carenze nutritive, permettendo interventi mirati. Questo approccio si sposa perfettamente con l'agrivoltaico, dove la variabilità microclimatica creata dai pannelli richiede una gestione differenziata. L'irrigazione a rateo variabile, ad esempio, permette di distribuire l'acqua in modo ottimale, applicandone di più nelle zone più esposte al sole e meno in quelle ombreggiate, con un notevole risparmio idrico. Portando l'ottimizzazione a un

livello superiore, algoritmi di intelligenza artificiale possono analizzare i dati raccolti dai sensori per prevedere le rese, ottimizzare l'irrigazione e la fertilizzazione, e persino controllare dinamicamente l'inclinazione dei pannelli per bilanciare la produzione energetica con le esigenze fotosintetiche delle colture. **Un'applicazione avanzata è la creazione di digital twins:** modelli virtuali dell'impianto agrivoltaico che, alimentati da dati in tempo reale, simulano l'interazione tra pannelli, colture e microclima. Questi strumenti consentono di testare diverse strategie di gestione e configurazioni impiantistiche in un ambiente virtuale, massimizzando così le performance e la resilienza del sistema e validando le scelte strategiche prima ancora della loro implementazione sul campo.

### Aspetti paesaggistici, biodiversità e accettazione sociale

**A livello italiano, l'elevata sensibilità paesaggistica, costituisce uno dei principali limiti all'espansione delle energie rinnovabili in generale ed all'agrivoltaico in particolare.** La progettazione dei sistemi agrivoltaico deve quindi considerare con grande attenzione l'integrazione paesaggistica. Il contributo dell'ENEA, grazie anche al contributo nell'ambito di AIAS, ha posto una specifica attenzione alle tematiche legate al paesaggio, considerandolo non un vincolo ma un'opportunità per una trasformazione controllata e qualitativa del territorio agricolo. Si promuovono soluzioni "sartoriali" che mirano a una "visibilità minima e massima verosimiglianza" con il contesto, utilizzando strumenti GIS-based per la modellazione del paesaggio e la valutazione degli impatti visivi. **Principi come il rispetto dei segni permanenti del paesaggio, la leggibilità del progetto e la sua re-**

**versibilità sono fondamentali per un inserimento armonico. Dal punto di vista della biodiversità, l'agrivoltaico può offrire opportunità significative.**

L'integrazione di vegetazione autocotona e la creazione di habitat specifici sotto e tra i pannelli, o nelle opere di mitigazione, possono sostenere le popolazioni di insetti impollinatori e altra fauna selvatica. Studi hanno riportato un aumento delle visite degli impollinatori in siti agrivoltaici ben gestiti. L'accettazione sociale gioca un ruolo cruciale. L'agrivoltaico gode generalmente di una maggiore approvazione pubblica rispetto ai tradizionali parchi solari a terra, essendo percepito meno negativamente in termini di impatto paesaggistico. Tuttavia, persistono preoccupazioni tra gli agricoltori e le comunità locali riguardo la complessità tecnologica, la sostenibilità economica a lungo termine, l'impatto visivo specifico e le difficoltà burocratiche. **Per superare queste barriere, è essenziale un coinvolgimento attivo degli stakeholder fin dalle prime fasi progettuali, attraverso processi partecipativi trasparenti.** La possibilità di utilizzare i percorsi tra le file di pannelli come itinerari didattici o turistici, come suggerito da Toledo & Scognamiglio (2021), può contribuire a migliorare la percezione pubblica e a valorizzare multi funzionalmente il territorio.

### Conclusioni

Lo sviluppo dell'agrivoltaico deve essere guidato dalla necessità di garantire effettivamente i benefici che gli sono attribuiti: riduzione delle emissioni, tutela delle attività agricole, miglioramento della resilienza ai cambiamenti climatici e sostegno economico alle comunità rurali. Per questo, è indispensabile un quadro normativo chiaro e armonizzato, strumenti di progettazione basati su KPI condivisi, piattaforme di simulazione

e monitoraggio in campo, adeguate valutazioni economiche e strategie di coinvolgimento delle comunità locali. Solo così l'agrivoltaico potrà realizzare appieno il suo potenziale di modello multifunzionale e sostenibile di gestione del suolo.

**Un'occasione importante per supportare tale sviluppo è rappresentata dai progetti finanziati nell'ambito del PNRR, i quali, se adeguatamente monitorati e accompagnati da una sistematica condivisione dei dati generati, possono contribuire in modo significativo alla crescita delle**

**conoscenze collettive sull'agrivoltaico. Tali progetti rappresentano un'opportunità unica per testare sul campo le ipotesi sviluppate in questi primi anni di esperienze, migliorando la comprensione delle interazioni tra sistemi fotovoltaici e produttività agricola.**

Un'ulteriore leva strategica per la crescita dell'agrivoltaico risiede nell'integrazione con le filiere agroalimentari, che possono trarre vantaggio dalla produzione di energia rinnovabile per ridurre l'impatto emissivo dei propri processi. Questa sinergia non solo

contribuisce alla decarbonizzazione del comparto, ma consente anche di dimostrare direttamente agli operatori agricoli l'efficacia (o i limiti) delle soluzioni agrivoltaiche adottate. È proprio in questa direzione che si muove il progetto **Agrivolt-ER**, finanziato dal POR FESR Emilia-Romagna 2021-2027, che mira a sperimentare l'integrazione tra tecnologie agrivoltaiche e sistemi produttivi agricoli regionali, promuovendo un modello replicabile e fondato sull'evidenza scientifica.

#### Riferimenti bibliografici

- 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>
- Bellone, Y., Croci, M., Impollonia, G., Nik Zad, A., Colauzzi, M., Campana, P. E., & Amaducci, S. (2024). Simulation-Based Decision Support for Agrivoltaic Systems. *Applied Energy*, 369, 123490. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123490>
- Campana, P. E., Stridh, B., Amaducci, S., & Colauzzi, M. (2021). Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 325, 129091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129091>
- Chatzipanagi, A., Taylor, N., & Jaeger-Waldau, A. (2023). Overview of the potential and challenges for Agri-Photovoltaics in the European Union. EUR 31482 EN, Publications Office of the European Union. doi:10.2760/208702
- Haegel, N. M., Verlinden, P., Victoria, M., Altermatt, P., Atwater, H., Barnes, T., Breyer, C., Case, C., De Wolf, S., Deline, C., Dharmrin, M., Dimmler, B., Gloeckler, M., Goldschmidt, J. C., Hallam, B., Haussener, S., Holder, B., Jaeger, U., Jaeger-Waldau, A., ... Bett, A. W. (2023). Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option. *Science*, 380(6640), 39–42. <https://doi.org/10.1126/science.adf6957>
- Trommsdorff, M., Campana, P. E., Macknick, J., Fernández Solas, A., Gorjian, S., & Tsanakas, I. (2025). Dual Land Use for Agriculture and Solar Power Production: Overview and Performance of Agrivoltaic Systems. *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme*. <https://doi.org/10.69766/xaeu5008>
- Scognamiglio, A., & Toledo, D. (2021). \*\*. *Sustainability*, 13(...):6871.
- Toledo, C., & Scognamiglio, A. (2021). Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns). *Sustainability*, 13(12), 6871. <https://doi.org/10.3390/su13126871>
- Zidane, T. E. K., Zainali, S., Bellone, Y., Guezgouz, M., Khosravi, A., Ma Lu, S., Tekie, S., Amaducci, S., & Elia Campana, P. (2025). Economic evaluation of one-axis, vertical, and elevated agrivoltaic systems across Europe: a Monte Carlo Analysis. *Applied Energy*, 391, 125826. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125826>