

# Ricerca ENEA & Agrivoltaico per la resilienza al cambiamento climatico

Nel quadro del cambiamento climatico, l'agrivoltaico, e cioè la combinazione sinergica dell'uso del suolo per generazione elettrica da fotovoltaico e produzione di cibo, è stato oggetto di una sempre maggiore attenzione negli ultimi anni. Tale interesse è in prima istanza legato al suo potenziale contributo alla mitigazione del cambiamento climatico, ponendosi come modalità di generazione di energia elettrica da fotovoltaico che può risolvere i conflitti legati all'uso del suolo agricolo per generare energia.

DOI 10.12910/EAI2024-064

di Alessandra Scognamiglio, Sezione Supporto Tecnico Strategico del Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti rinnovabili - ENEA

**N**el quadro del cambiamento climatico, l'agrivoltaico, e cioè la combinazione sinergica dell'uso del suolo per generazione elettrica da fotovoltaico e produzione di cibo, è stato oggetto di una sempre maggiore attenzione negli ultimi anni. Tale interesse crescente è confermato da una recente review sulle ricerche pubblicate negli ultimi 20 anni, che valuta in oltre il 18% per anno l'incremento di studi sul tema agrivoltaico <sup>[1]</sup>.

Tale interesse è in prima istanza legato al suo potenziale contributo alla mitigazione del cambiamento climatico, ponendosi come modalità di generazione di energia elettrica da fotovoltaico che può risolvere i conflitti legati all'uso del suolo agricolo per generare energia. Ma le ricerche confermano con sempre maggiore evidenza anche il suo interesse rispetto alla resilienza dei sistemi produttivi agricoli al cambiamento climatico. Sono, infatti ampiamente riconosciuti in letteratura i potenziali effetti benefici dell'agrivoltaico sui sistemi agricoli del futuro, specialmente legati alla possibilità di incrementare la produzione di cibo in climi aridi, o

che sperimentano problemi derivanti dalla siccità sempre più diffusa e frequente, grazie alla protezione delle colture offerta dai moduli fotovoltaici (condizioni climatiche meno variabili che senza protezione, protezione meccanica, ombreggiamento delle colture) ed alla conseguente potenziale migliore produzione (maggiore quantità e migliore qualità dei prodotti agricoli), anche in presenza di un significativo risparmio idrico.

## Impiego dell'agrivoltaico e incremento delle rese

In questo senso, le applicazioni dell'agrivoltaico ai vitigni forniscono un chiaro esempio delle potenzialità di questo approccio. In paesi come la Francia e l'Italia, a fronte di una generale diminuzione della produzione agricola collegata anche agli effetti del cambiamento climatico (ondate di calore, gelate tardive ed eventi estremi), l'impiego dell'agrivoltaico ha consentito un incremento della resa dell'uva coltivata sotto i moduli fotovoltaici.

In linea con questo quadro generale di interesse per l'agrivoltaico, nel nostro paese la misura "Sviluppo Agri-

voltaico", prevede una misura di finanziamento dedicata all'agrivoltaico legata al Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza. I fondi sono riservati a impianti innovativi, con moduli elevati da terra e dotati di sistemi di monitoraggio che dovranno fornire dati in merito alla resilienza al cambiamento climatico, con specifico riferimento, ad esempio, al risparmio idrico ed alla resa agricola dei sistemi implementati.

La ricerca in ambito ENEA si colloca in questo contesto di massima, e pone una specifica attenzione alle tematiche legate al paesaggio, in considerazione delle peculiarità del contesto nazionale, in cui la sentita minaccia di una trasformazione non controllata del paesaggio è spesso una barriera all'introduzione delle rinnovabili, e del fotovoltaico in particolare. A partire dal 2021, l'Agenzia ha lavorato nell'ambito di una definizione originale di "Agrivoltaico Sostenibile", che si riferisce a soluzioni "sartoriali" per l'agrivoltaico che supportino la trasformazione sostenibile del paesaggio agrario, e copre attività trasversali che includono anche la messa a punto di strumenti operativi e

tecniche per la sua implementazione<sup>1</sup>. In particolare, il Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili (TERIN) lavora su attività che sono di rilievo sia nel panorama nazionale che in quello europeo, ed internazionale. Queste includono la messa a punto di quadri conoscitivi e strumenti adatti a supportare una visione per l'Agrivoltaico Sostenibile, e la realizzazione di dimostratori a diverse scale per validare scelte tecnologiche e prestazioni di impianti con diverse configurazioni.

A ciò si affianca il coinvolgimento dei principali attori del processo di implementazione dell'agrivoltaico anche al fine di supportare la creazione di una filiera nazionale orientata a progetti di alta qualità per l'integrazione del fotovoltaico nel settore agricolo. Quest'ultima attività include la presidenza dell'Associazione Italiana Agrivoltaico Sostenibile (AIAS).

Coerentemente con il quadro sopra delineato, gli studi condotti coprono aspetti volti a fornire soluzioni nell'ottica della resilienza al cambiamento climatico, e vanno dalla messa a punto di metodologie e indicatori adeguati alla individuazione di potenziali siti per l'implementazione; alla ricerca di soluzioni innovative per il controllo delle condizioni di crescita delle specie vegetali in abbinamento al fotovoltaico (serre fotovoltaiche ed integrazione di fotovoltaico e fotobiorattori); fino alla sperimentazioni di

soluzioni da impiegare in condizioni di deficit idrico (abbinamento tra agrivoltaico e dissalatori) ed alla verifica degli effetti dell'agrivoltaico su produzioni tipiche dell'ambiente mediterraneo (agrumi, vite).

### Le principali attività del dipartimento TERIN sul tema dell'agrivoltaico

Nell'ambito dell'International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS), insieme a NREL (National Renewable Energy Laboratories, US), dall'aprile 2024 ENEA conduce l'Action Group Agrivoltaics. Questo ha lo scopo di individuare le nuove esigenze di ricerca in ambito IEA PVPS, a partire dalla sistematizzazione delle ricerche attualmente in corso. Finora sono emersi quattro principali settori di sviluppo della ricerca sull'agrivoltaico: standardizzazione (metriche e definizioni; principi guida; ampliamento dei criteri di valutazione); integrazione con l'agricoltura (priorità; tecnologie ed innovazioni per l'agricoltura); la necessità di approfondimenti tecnici per garantire la futura implementazione dell'agrivoltaico (strumenti semplici di valutazione delle prestazioni; modelli di business; contratti; best practices); la necessità di una adeguata strutturazione socio-politica del tema (comparazioni tra paesi; partecipazione sociale; dinamiche di giustizia ed equità sociale).

In ambito europeo, ENEA partecipa

al progetto europeo SYMBIOSYST<sup>2</sup> – **Create a Symbiosis where PV and agriculture can have a mutually beneficial relationship**, Horizon Europe Innovation Action (Gennaio 2023-Dicembre 2026), con la messa a punto di strumenti di modellazione per l'integrazione dell'agrivoltaico con il paesaggio, e il coordinamento delle attività relative al coinvolgimento dei diversi stakeholders, al fine di migliorare la partecipazione delle comunità all'implementazione dell'agrivoltaico, con specifico riferimento agli impatti sul paesaggio, e alla sua trasformazione sostenibile. La finalità, tra le varie, è la redazione di linee guida per l'integrazione dell'agrivoltaico nel paesaggio, e la realizzazione di un catalogo di soluzioni e best practices<sup>[2]</sup>.

Tra le attività concluse vi è lo sviluppo di una metodologia e di uno strumento digitale (web-) GIS-based per la modellazione del paesaggio per una pianificazione e uno sviluppo sostenibile dell'agrivoltaico (Figura 1)<sup>3</sup>.

### La riduzione degli impatti visivi

Un aspetto importante per l'efficace implementazione dell'agrivoltaico è la riduzione degli impatti visivi ad esso associati. In tal senso, un approccio progettuale è adoperare il criterio della "visibilità minima e massima verosimiglianza"<sup>[3] [4]</sup>. Allo scopo, è dunque necessario riuscire a modellare il pattern tridimensionale dell'unità di paesaggio in cui si inseri-

<sup>1</sup> Le attività sono svolte attraverso la partecipazione dei ricercatori che compongono la Task Force ENEA Agrivoltaico Sostenibile, che coinvolge il Dipartimento TERIN ed il Dipartimento Sostenibilità, Circolarità e Adattamento al Cambiamento Climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali (SSTP), ed è stata istituita con delibera presidenziale del 2021. L'istituzione della Task Force è avvenuta su proposta della Divisione Solare Fotovoltaico (TERIN-SPV), che opera tra l'altro per la diffusione delle applicazioni fotovoltaiche in vari contesti con particolare attenzione all'impiego ed integrazione del fotovoltaico negli edifici (BIPV), nel paesaggio e nel settore agricolo, sviluppando approcci metodologici innovativi (Agrivoltaico Sostenibile) nel rispetto del connubio energia-agricoltura-paesaggio.

<sup>2</sup> Il progetto coinvolge in maniera trasversale il Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili (TERIN) ed il Dipartimento Sostenibilità, Circolarità e Adattamento al Cambiamento Climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali (SSTP). In particolare, per TERIN partecipano al progetto la Sezione Supporto Tecnico Strategico (STS), la Sezione Metodologie, approcci e strumenti per l'analisi della sostenibilità delle tecnologie energetiche (STE), la Divisione Solare Fotovoltaico (TERIN-SPV), la Divisione Smart Sector Integration e generazione distribuita da FER (SSI) attraverso il Laboratorio Energia e Data Science (SSI-EDS). Per SSTP partecipa al progetto la Divisione Impatti Antropici e del Cambiamento Climatico sul Territorio (IMPACT).

<sup>3</sup> Per dettagli: Grazia Fattoruso, TERIN-SSI-EDS, grazia.fattoruso@enea.it

sce l'intervento, per poi progettare il sistema tecnologico in armonia con esso.

In tale direzione, e in linea con i principi generali dell'ecologia del paesaggio, lo strumento GIS-based sviluppato consente: la valutazione dell'idoneità del sito di interesse secondo un insieme di criteri sia solari che agricoli propriamente definiti; la valutazione degli impatti visivi sul paesaggio attraverso un concetto originale di analisi di visibilità; la modellizzazione e quantificazione degli elementi del paesaggio tramite Reality Mapping e GeoAI basati su metriche paesaggistiche originali a supporto delle scelte progettuali preliminari per integrare l'agrivoltaico nel paesaggio (es. dimensioni delle patch, geometria, orientamento, etc.). Questo strumento è di ausilio nel dialogo con decisori locali che vogliono sviluppare sistemi agrivoltaici aderenti ad obiettivi di qualità sito-specifici: è possibile, infatti, integrare l'analisi con ulteriori livelli informativi, che possano essere di supporto alle scelte operate dalle amministrazioni.

### Nuove frontiere dell'agrivoltaico

Nell'ambito di un contratto tra ENEA ed Enel Green Power (AgriPhoto-Voltaic, Multipurpose land use PV mitigation, Integrazione produzione microalghe con impianto solare), è stato messo a punto un concetto innovativo per lo sviluppo futuro dell'agrivoltaico, marchio depositato nel 2021 con il nome di Algovoltaico/Algaevoltaics, ed è stato realizzato un dimostratore presso il Centro Ricerche ENEA di Portici (Figura 2). Si tratta di una soluzione integrata per l'abbinamento della produzione di microalghe alla generazione di energia da fotovoltaico, con una configurazione spaziale adatta al layout di impianto fotovoltaico standard (ciò rende la soluzione adatta anche ai casi di

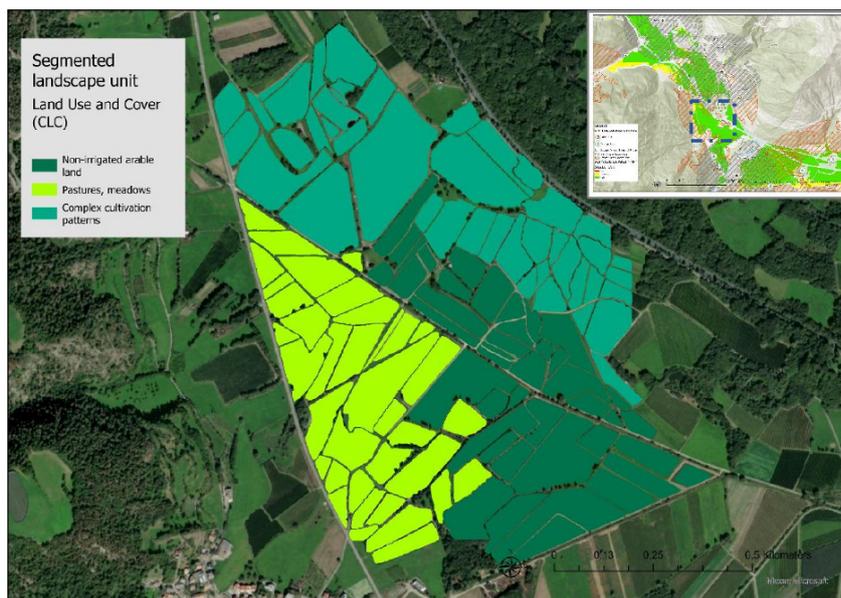


Figura 1. Esempio di applicazione dello strumento digitale (web-) GIS-based per la modellazione del paesaggio per una pianificazione e uno sviluppo sostenibile dell'agrivoltaico: vista di output dello di un'unità di paesaggio in Trentino-Alto Adige. Modellazione della geometria delle tessere agricole ricadenti all'esterno delle zone di visibilità (i.e. aree tratteggiate nella mappa in alto a destra).



Figura 2: Impianto Algovoltaico™. Il dimostratore realizzato alla fine del 2023 presso il Centro Ricerche ENEA di Portici è costituito da due generatori distinti, uno realizzato con 9 moduli monofacciali, l'altro realizzato con 9 moduli bifacciali, disposti su tre file da tre per una potenza nominale del singolo sottosistema di 3,4kW<sub>p</sub>. I fotobioreattori sono integrati in entrambi i sottosistemi, e allo scarico dei circuiti è collegata un'unica centrifuga per la separazione delle microalghe dall'acqua di coltura e la raccolta (~30kg/anno). Le prestazioni dell'impianto sono monitorate e valutate, e sono in corso attività di ottimizzazione in vista di ulteriori attività di ricerca.

revamping o repowering di impianti esistenti). L'impiego di fotobioreattori tubolari per la crescita delle microalghe consente un controllo continuo delle condizioni in ambiente di cresci-

ta, con notevoli vantaggi rispetto ad una coltivazione in pieno campo, soggetta invece alle continue variazioni ambientali. Le condizioni di crescita, anche in funzione dell'ombreggia-

mento, possono così essere variate in funzione anche della massima produzione della specie vegetale coltivata. Nell'ambito del **Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale**<sup>4</sup>, si sono sviluppate soluzioni per l'**integrazione di moduli e dispositivi fotovoltaici per l'ottimizzazione della trasmissione luminosa adeguata alla crescita delle colture**. Durante questo trien-

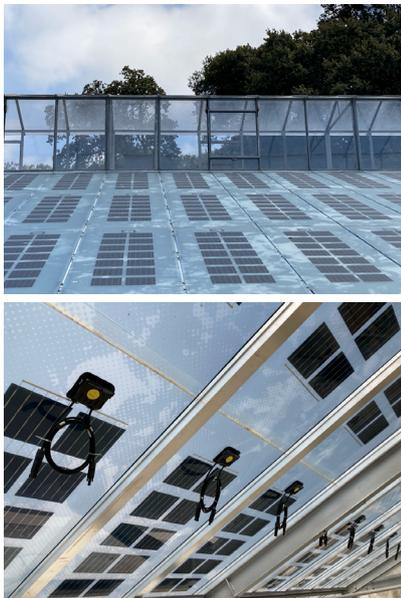


Figura 3: Dimostratore agrivoltaico in pieno campo, con impiego di vetri fotovoltaici progettati da ENEA per una piena funzionalità rispetto alla trasmissione luminosa all'interno della serra ed all'integrazione con il contesto di pregio. Presso l'Orto Botanico realizzato presso il giardino della Reggia Borbonica di Portici, sede del Museo delle Scienze Agrarie (MUSA) e della Facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Vetri fotovoltaici realizzati da SunAge.

nio sono stati realizzati dimostratori alla grande (100m<sup>2</sup>), media (10m<sup>2</sup>) e piccola (0,001m<sup>2</sup>) scala<sup>[5][6]</sup>. Per il dimostratore alla grande scala (serra) sono stati disegnati e realizzati vetri fotovoltaici che attraverso un pattern decorativo (pensato per il contesto di inserimento, l'Orto Botanico realizzato presso il giardino della Reggia Borbonica di Portici, oggi sede del Museo delle Scienze Agrarie-MUSA e della Facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Napoli Federico II) conseguono condizioni ottimali di trasmissione luminosa in funzione delle necessità delle piante ospitate all'interno della serra (Figura 3)<sup>5</sup>.

Tra le attività condotte durante il triennio 2022-2024 sono stati sviluppati: dispositivi fotovoltaici per l'integrazione in serre fotovoltaiche<sup>6</sup>; un dimostratore in pieno campo presso Scalea (CS)<sup>7</sup>; un sistema GIS per l'identificazione di siti adatti all'agrivoltaico sostenibile a livello regionale<sup>8</sup>.

#### Agrivoltaico, colture mediterranee e sistemi di dissalazione

Nello specifico, sono state realizzate **celle solari a film sottile di Si spettralmente selettive per applicazione in serre fotovoltaiche** (Figura 4). L'attività ha incluso la realizzazione e caratterizzazione di celle solari a film sottile di Si spettralmente selettive su area di 1 cm<sup>2</sup>; la realizzazione di un prototipo di serra su piccola scala con una appropriata sorgente di illuminazione a LED per studiare l'uso integrato della luce per fotovoltaico e foto-



Figura 4: Test sperimentali di crescita di piante di lattuga, illuminate dalla radiazione solare filtrata da vetri spettralmente selettivi sviluppati ad hoc.

sintesi in un ambiente controllato; la realizzazione e caratterizzazione di celle solari organiche di piccola area (circa 25 mm<sup>2</sup>) con materiale attivo adattato per garantire una buona trasmittanza nel range 400-700nm<sup>[7]</sup>. È stato poi realizzato, ed è oggetto di monitoraggio, un **dimostratore agrivoltaico elevato, avanzato a Scalea (Figura 5)**<sup>9</sup>, in collaborazione con



Figura 5: Dimostratore agrivoltaico elevato innovativo in pieno campo, con coltivazione di agrumi, collocato a Scalea (CS).

<sup>4</sup> Per info: Paola Delli Veneri, TERIN-SPV, [paola.delliveneri@enea.it](mailto:paola.delliveneri@enea.it)

<sup>5</sup> Per info: Responsabile scientifico TERIN-STs: Alessandra Scognamiglio, [alessandra.scognamiglio@enea.it](mailto:alessandra.scognamiglio@enea.it)

<sup>6</sup> Attività condotta dal laboratorio Dispositivi Innovativi della Divisione Solare Fotovoltaico. Per dettagli: Lucia Vittoria Mercaldo, TERIN-SPV-DIN, [lucia.mercaldo@enea.it](mailto:lucia.mercaldo@enea.it)

<sup>7</sup> Attività condotta dalla Divisione Solare Fotovoltaico (TERIN-SPV), in collaborazione con la Sezione Supporto Tecnico Strategico (STS). Per info: Paola Delli Veneri, TERIN SPV, e Alessandra Scognamiglio TERIN-STs, [alessandra.scognamiglio@enea.it](mailto:alessandra.scognamiglio@enea.it)

<sup>8</sup> Attività condotta dalla Divisione Solare Fotovoltaico (TERIN-SPV) insieme alla Sezione Supporto Tecnico Strategico (STS), in collaborazione con il Laboratorio Energia e Data Science dalla Divisione Smart Sector Integration e generazione distribuita da FER. Per info: Grazia Fattoruso, TERIN-SSI-EDS, [grazia.fattoruso@enea.it](mailto:grazia.fattoruso@enea.it)

<sup>9</sup> Per info generali: Alessandra Scognamiglio, TERIN-STs, [alessandra.scognamiglio@enea.it](mailto:alessandra.scognamiglio@enea.it). Per info su aspetti strutturali ed impiantistici Carmine Cancro, TERIN-SSI-SGRE, [carmine.cancro@enea.it](mailto:carmine.cancro@enea.it). Per info su aspetti agronomici: Federica Colucci, SSPT-IMPACT, [federica.colucci@enea.it](mailto:federica.colucci@enea.it)

operatori del settore energetico ed agricolo. (EF Solare, Le Greenhouse, SET Energie). Si tratta di un impianto agrivoltaico con moduli fissi, della potenza nominale di 18kW<sub>p</sub>, composto da quattro file di moduli fotovoltaici distanziati di 5m all'interasse, e collocati su strutture di supporto verticali ad un'altezza di circa 3m da terra, circa. L'impianto protegge una coltura di agrumi, ed il sistema è equipaggiato per il monitoraggio dei parametri agronomici in funzione delle principali condizioni ambientali. **Nell'ottica di sperimentare soluzioni che siano replicabili in contesti simili, e possano quindi fornire un contributo di ricer-**

**ca rispetto al tema della mitigazione degli impatti sull'agricoltura dovuti al cambiamento climatico, l'energia generata dal fotovoltaico è impiegata in un sistema di dissalazione.** Gli studi condotti su questo dimostratore vedono la collaborazione con il Dipartimento di Architettura (DiArc) dell'Università degli Studi di Napoli Federico II per le tematiche ambientali; e con il Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e degli Alimenti (Di.S.S.P.A.) - Sezione di Arboricoltura - Università degli Studi di Bari Aldo Moro.

È stata infine messa a punto una **metodologia originale di analisi di site**

**suitability per l'agrivoltaico sostenibile** che ha consentito di elaborare una **mapa interattiva nazionale del potenziale agrivoltaico a scala regionale** <sup>[8]</sup>. L'idoneità delle aree è valutata sulla base di un insieme originale di criteri multidimensionali, orientati alla ottimizzazione della produzione del sistema agrivoltaico (minimizzazione uso del suolo, resa energetica, produzione agricola), ma anche a fornire una soluzione per fare fronte agli effetti del cambiamento climatico. Tra gli indicatori scelti, c'è infatti la scarsità di acqua (water deficit) <sup>10</sup>.

*per info: [alessandra.scognamiglio@enea.it](mailto:alessandra.scognamiglio@enea.it)*

## Bibliografia

1. Ephraim Bonah Agyekum, A comprehensive review of two decades of research on agrivoltaics, a promising new method for electricity and food production, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 72, 2024, 104055, ISSN 2213-1388, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104055>.
2. David Moser, Martin Thalheimer, Alessandra Scognamiglio, Pascal Vullo, Giuseppe Demofonti, Harald Häberlein, Marcel Macarulla, Arvid van der Heide, Hesam Ziar, Jens Moschner, Angelo Pignatelli, James Macdonald, Niels Groen, Jonathan Leloux, Mohammed Gofran Chowdhury, Jennifer Porter, Sadiq van Overbeek, Paolo Picchi, From the Design to the Implementation, a Symbiosis Where PV and Agriculture Can Have a Mutually Beneficial Relationship, EUPVSEC 2023, pp. 020432-001 - 020432-035, ISBN 3-936338-88-4.
3. Richard T.T. Forman. (1995) Land Mosaics. The Ecology of Landscapes and Regions. Cambridge University Press, Cambridge
4. Scognamiglio A., 'Photovoltaic landscapes': Design and assessment. A critical review for a new transdisciplinary design vision, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 55, 2016, Pages 629-661, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.072>.
5. Alessandra Scognamiglio, Lucia V. Mercurio, Marco Della Noce, Manuela Ferrara, Paola Delli Veneri, Carlos Alberto Toledo Arias, Fabrizio Carteni, F. Giannino, Maurizio Zotti, N. Salvatori, S. Mazzoleni, Re-Uniting Photosynthesis and Photovoltaics: Design for Architectural Greenhouses, Proceedings EUPVSEC 2020, ISBN 3-936338-73-6, DOI 10.4229/EUPVSEC20202020-6CV.2.36.
6. Alessandra Scognamiglio, Carlos Alberto Toledo Arias, Lucia V. Mercurio, Marco Della Noce, Manuela Ferrara, Fabrizio Carteni, Maurizio Zotti, Stefano Mazzoleni, Paola Delli Veneri, Multi-scale Analysis of different PV Technologies for Greenhouses, Proceedings WCPEC 8, ISBN 3-936338-86-8.
7. Maurizio Zotti, Stefano Mazzoleni, Lucia V. Mercurio, Marco Della Noce, Manuela Ferrara, Paola Delli Veneri, Marcello Diano, Serena Esposito, Fabrizio Carteni, Testing the effect of semi-transparent spectrally selective thin film photovoltaics for agrivoltaic application: A multi-experimental and multi-specific approach, Heliyon, Volume 10, Issue 429 (2024) Article number e26323.
8. Grazia Fattoruso, Domenico Toscano, Andrea Venturo, Alessandra Scognamiglio, Massimiliano Fabbicino, and Girolamo Di Francia. 2024. "A Spatial Multicriteria Analysis for a Regional Assessment of Eligible Areas for Sustainable Agrivoltaic Systems in Italy" Sustainability 16, no. 2: 911. <https://doi.org/10.3390/su16020911>

<sup>10</sup> Quest'attività è stata condotta dal Laboratorio Energia e Data Science alla Divisione Smart Sector Integration e generazione distribuita da FER. Per info: [Grazia Fattoruso](mailto:Grazia.Fattoruso@enea.it), TERIN-SSI-EDS, [grazia.fattoruso@enea.it](mailto:grazia.fattoruso@enea.it)