

**IMPIANTO AGRIVOLTAICO**  
SITO NEI COMUNI DI BRINDISI E CELLINO SAN MARCO  
IN PROVINCIA DI BRINDISI

**Valutazione di Impatto Ambientale**

(artt. 23-24-25 del D.Lgs. 152/2006)

**Commissione Tecnica PNRR-PNIEC**

(art. 17 del D.L. 77/2021, convertito in L. 108/2021)

**Prot. CIAE: DPE-0007123-P-10/08/2020**

Idea progettuale, modello insediativo e coordinamento generale: **AG Advisory S.r.l.**

Paesaggio e supervisione generale: **CRETA S.r.l.**

Elaborazioni grafiche: **Eclettico Design**

Assistenza legale: **Studio Legale Sticchi Damiani**

**Progettisti:**

Responsabili VIA: **CRETA S.r.l.**

**Arch. Sandra Vecchietti**

**Arch. Filippo Boschi**

**Arch. Anna Trazzi**

**Arch. Giulia Bortolotto**

**Arch. Mattia Zannoni**

**Contributi specialistici:**

Acustica: **Dott. Gabriele Totaro**

Agronomia: **Dott. Agr. Barnaba Marinosci**

Agronomia: **Dott. Agr. Giuseppe Palladino**

Archeologia: **Dott.ssa Caterina Polito**

Archeologia: **Dott.ssa Michela Rugge**

Asseverazione PEF: **Omnia Fiduciaria S.r.l.**

Fauna: **Dott. Giacomo Marzano**

Geologia: **Geol. Pietro Pepe**

Idraulica: **Ing. Luigi Fanelli**

Piano Economico Finanziario: **Dott. Marco Marincola**

Vegetazione e microclima: **Dott. Leonardo Beccarisi**

Cartella **VIA\_3/**

Sottocartella **PROG\_COMP/**

Identificatore:  
**PROGCOMP602**

**Il Sistema “Agrovoltaico”**

Descrizione **Il Sistema “Agrovoltaico”- Una virtuosa integrazione multifunzionale in agricoltura - Position Report**

Nome del file:  
PROGCOMP602.pdf

Tipologia  
Relazione

Scala  
-

**Autori elaborato:** Prof. Massimo Monteleone

<b>Rev.</b>	<b>Data</b>	<b>Descrizione</b>
00	01/02/22	Prima emissione
01		
02		

**Spazio riservato agli Enti:**



Università di Foggia

**IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”:  
UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA**

**POTENZIALITA’ REALIZZATIVE NEL SETTORE ORTOFRUTTICOLO**

**ed applicazione esemplificativa alla coltivazione dell’asparago**

**“POSITION REPORT” A CURA DEL GRUPPO DI RICERCA  
“STAR\*AgroEnergy”  
Università di Foggia**

**ELABORAZIONE DEL TESTO:**

**Prof. Massimo Monteleone**

**Docente di “Ecologia Agraria” e di “Agronomia Ambientale e Territoriale  
Dipartimento di Scienze Agrarie, degli Alimenti e dell’Ambiente  
Università di Foggia**

**Luglio 2020**

## Descrizione dell’Unità di Ricerca “Star\*AgroEnergy”

L’Unità di ricerca STAR\*AgroEnergy riunisce professori, ricercatori, tecnici, assegnisti e dottorandi che collaborano strettamente in attività di sperimentazione e trasferimento tecnologico. STAR\*AgroEnergy si è posto l’obiettivo di realizzare un significativo avanzamento nelle capacità di ricerca ed innovazione tecnologica dell’Università di Foggia nel campo della bioeconomia e delle bioenergie, specificamente in relazione al contesto agrario, ma non solo. STAR\*AgroEnergy promuove un approccio integrato alla generazione di energia da fonti rinnovabili, ottenute da materie prime agricole ed agro-industriali. Ulteriore carattere distintivo è la rilevanza assegnata a rigorosi criteri di sostenibilità a cui si conforma ogni intervento di progettazione. Il riferimento è alla knowledge-based bio-economy (KBBE). STAR delinea un approccio metodologico che armonizza le più avanzate tecnologie nel settore bioeconomy con le esigenze di uno sviluppo equilibrato ed armonico con l’ambiente, il paesaggio ed il patrimonio culturale, per la promozione di un modello energetico a carattere “distribuito”. Uno degli elementi di forza dell’attività consiste nel raccordare le esigenze espresse dalla comunità scientifica, dagli imprenditori, dagli amministratori locali e decisori politici, per generare opportunità d’innovazione. Valorizzando queste interazioni si dispiegano pienamente le potenzialità di ricerca e sviluppo tecnologico in grado di favorire l’evolversi dell’economia regionale, nazionale ed europea, interpretando al meglio le sfide epocali espresse dalla società.

## Descrizione dello “Star Facility Centre”

Lo STAR\*Facility Centre è un polo tecnico-scientifico dell’Università di Foggia basato su una concezione innovativa che coniuga la presenza di attrezzature di laboratorio all’avanguardia, con impianti pilota fra loro integrati e uno staff di ricerca di tipo multidisciplinare, operante in collaborazione con altri centri di ricerca internazionali. Il Centro è in grado di estendere i suoi servizi dalle attività di ricerca accademica a quelle dell’innovazione tecnologica e dello sviluppo industriale, al fine di cogliere le opportunità derivanti dallo sviluppo della “bioeconomy”. L’ampia gamma di servizi offerti parte dalla caratterizzazione delle biomasse e dei biomateriali, per individuarne i processi in grado di ottenere prodotti ad un più elevato valore economico. L’approccio industriale, si basa sull’idea della “bioraffineria”, intesa come una struttura produttiva in grado d’integrare una serie di processi di conversione di biomasse di diversa origine, per l’ottenimento di prodotti d’interesse industriale, biocarburanti ed energia. La piattaforma tecnologica del Centro consente la realizzazione di modelli pilota in grado di calibrare e valutare sistemi tecnologici assimilabili alle bioraffinerie.

### STAR\*AgroEnergy Research Unit

Università di Foggia  
www.star-agroenergy.eu  
prof. Massimo Monteleone  
via Napoli, 25 – 71121 Foggia  
tel. +39.0881.589223  
massimo.monteleone@unifg.it

### Università di Foggia

Dipartimento di Scienze Agrarie,  
degli Alimenti e dell’Ambiente  
Via Napoli 25 – 71121 Foggia  
Direttore: prof.ssa Milena Sinigaglia  
Segreteria amministrativa  
tel. +39.0881.589216

### STAR\*Facility Centre

Zona Industriale di Foggia  
S.S.16 (Foggia-Bari) km 684,3  
<http://starfacilitycentre.unifg.it>  
dott. Matteo Francavilla  
tel. +39.0881.680195  
matteo.francavilla@unifg.it

## Acronimi

- CREA: Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria. Ente pubblico di ricerca, organo tecnico del Ministero dell'Agricoltura (MIPAAF). E' il più importante ente di ricerca dedicato all'agroalimentare. Esso si articola in 12 Centri di ricerca distribuiti su tutto il territorio nazionale.
- ET: Evapotraspirazione di una coltura agraria, ovvero il flusso di evaporazione dell'acqua libera dalla superficie del suolo ed il flusso di traspirazione dell'acqua che si origina dal manto vegetale di una coltura agraria.
- ETS: Emission Trading System. Il sistema ETS UE opera secondo il principio della limitazione e dello scambio delle emissioni. Viene fissato un tetto alla quantità totale di alcuni gas serra che possono essere emessi dagli impianti che rientrano nel sistema. Il tetto si riduce nel tempo di modo che le emissioni totali diminuiscono. Entro questo limite, le imprese ricevono o acquistano quote di emissione che, se necessario, possono scambiare. La limitazione del numero totale garantisce che le quote disponibili abbiano un valore. Un solido prezzo della CO<sub>2</sub> favorisce inoltre gli investimenti in tecnologie pulite e a basso rilascio di CO<sub>2</sub>.
- FER: Fonti energetiche rinnovabili. Il termine energia rinnovabile indica tutte le fonti di energia non soggette ad esaurimento e con un limitato impatto ambientale. Le principali sono: energia solare; energia eolica; energia idroelettrica; energia da biomasse.
- FV: Fotovoltaico. Un impianto fotovoltaico è un impianto di generazione elettrica costituito dall'assemblaggio di più moduli fotovoltaici. L'energia radiante proveniente dal sole ed incidente al suolo viene intercettata dai pannelli ed impiegata per essere convertita in energia elettrica.
- GHG: Greenhouse gases, ossia “gas ad effetto serra”. Sono chiamati gas serra quei gas naturalmente presenti in atmosfera e quelli emessi a seguito delle attività antropiche che hanno la proprietà di assorbire e riemettere una parte considerevole della componente nell'infrarosso emessa dalla superficie terrestre. I gas coinvolti nel determinare l'accentuazione dell'effetto serra sono CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub> ed altri ancora.
- ISTAT: Istituto Nazionale di Statistica, l'ente di ricerca pubblico italiano che si occupa di censimenti e indagini sociali ed economiche.
- NAMEA: National Accounts Matrix including Environmental Accounts. L'Istat diffonde la serie storica delle emissioni atmosferiche calcolate attraverso il conto Namea il quale consente di confrontare – per le stesse attività produttive e di consumo – aggregati socio-economici e pressioni esercitate sull'ambiente naturale.
- PAC: Politica agricola comune. Rappresenta l'insieme delle regole che l'Unione europea, fin dalla sua nascita, ha inteso darsi riconoscendo la centralità del comparto agricolo per uno sviluppo equo e stabile dei Paesi membri.
- PNIEC: Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima.
- SIN: Sito d'interesse nazionale. Sito contaminato oggetto di un intervento di bonifica. Ai fini della bonifica, un SIN è individuabile in relazione alle caratteristiche del sito, alle quantità e pericolosità degli inquinanti presenti, al rilievo dell'impatto sull'ambiente circostante in termini di rischio sanitario ed ecologico, nonché di pregiudizio per i beni culturali ed ambientali.

## Sommario

<b>Introduzione</b> .....	5
<b>Sillabo</b> .....	7
<b>Ripartire dall’agricoltura: espandere la frontiera dell’innovazione</b> .....	10
<b>Il “nodo gordiano” alla base della proposta “agrovoltaica”</b> .....	12
Sistemi agricoli ad elevata compatibilità ambientale, “permeabili” all’innovazione, energeticamente autonomi, altamente remunerativi.....	13
Salvaguardia del territorio, contrasto al consumo di suolo, arresto della perdita di biodiversità, creazione di sistemi agricoli ad elevato valore ecologico .....	15
Energia da fonti rinnovabili, mitigazione dei cambiamenti climatici .....	16
<b>Il pianificato sviluppo del fotovoltaico necessita l’impiego di ampie superfici</b> .....	17
<b>L’agrovoltaico allenta il vincolo di scarsità della risorsa suolo</b> .....	19
L’indice LER: la sinergia “simbiotica” dell’agrovoltaico .....	19
Agrovoltaico secondo i migliori crismi agronomici ed ambientali .....	21
<b>I fondamenti della proposta “agrovoltaica”: parametri tecnici e culturali</b> .....	23
L’impostazione agrovoltaica: la disposizione spaziale dei moduli .....	23
La componente fotovoltaica: condizioni radiative dell’agrovoltaico .....	26
La componente agraria: interpretazione del vantaggio attribuito all’agrovoltaico .....	31
<b>Inserimento ed armonizzazione paesaggistica dell’agrovoltaico</b> .....	36
<b>La coltivazione dell’asparago: un esempio applicativo dell’agrovoltaico</b> .....	38
<b>Conclusioni</b> .....	41
<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	42

## Introduzione

La presente relazione espone ed argomenta gli orientamenti riguardo al tema del cosiddetto “*agrovoltaico*” maturati nell’ambito del gruppo di ricerca **STAR\*AgroEnergy**, afferente al **Dipartimento di Scienze Agrarie, degli Alimenti e dell’Ambiente dell’Università di Foggia**.

Rispetto ai tradizionali impianti fotovoltaici, installati su suolo ad uso agricolo e poi adibito in modo esclusivo a tale nuovo utilizzo energetico, **la soluzione “agrovoltaica” consente di svolgere in modo simultaneo sia l’ordinaria attività di coltivazione delle specie agrarie (selezionate in modo opportuno per caratteri fisiologici e morfologici), sia la generazione elettrica mediante l’impiego di pannelli fotovoltaici (FV)**. Si tratta, in altri termini, di una soluzione “integrata”, definibile anche “ibrida”. Allo scopo, i pannelli (o moduli) FV sono installati in maniera da non interferire (almeno in modo rilevante) sulle ordinarie pratiche colturali. Questa condizione, di fatto, si realizza dislocando i pannelli ad un’altezza adeguata da terra e ad una distanza opportuna fra loro, tale da lasciare spazio adeguato per le coltivazioni agricole nonché per il passaggio dei mezzi meccanici (trattrici ed operatrici). Considerando la soluzione indicata, è chiaro che la risorsa radiativa proveniente dal sole viene ripartita fra il processo di coltivazione e quello di generazione energetica, secondo rapporti variabili che sono in relazione alla particolare configurazione strutturale assunta dall’impianto ed alle peculiari esigenze ecofisiologiche della specie coltivata. Per questo motivo si parla anche di tecnologia “*solar sharing*”.

Il documento è stato predisposto alla luce di uno studio ampio e di un’approfondita analisi, eseguendo una valutazione completa sulla scorta di una ricca bibliografia e la verifica di alcuni casi esemplificativi. I suoi contenuti esprimono la posizione a cui il gruppo di ricerca è pervenuto, anche a seguito di una feconda discussione interna ed un serrato confronto fra gli orientamenti individuali.

La prospettiva, od il punto di osservazione, assunto nello sviluppo dell’analisi parte espressamente dalle esigenze dell’agricoltura ed è proprio sulle potenzialità di miglioramento delle prestazioni produttive ed ambientali dell’agricoltura che si focalizza la riflessione qui condotta. **Il settore produttivo dell’energia da fonti rinnovabili è considerato, infatti, come strumentale a favorire e sostenere lo sviluppo dell’agricoltura, con particolare riferimento a quella sua componente incentrata sulla coltivazione delle specie orticole e frutticole**. Questo viene affermato a chiare lettere, al fine d’invertire una tendenza, divenuta purtroppo consuetudine, per la quale le esigenze dello sviluppo industriale trovano fra le imprese agricole e nei territori rurali il contesto fertile per operazioni che non ne riconoscono appieno il contributo e che ne marginalizzano gli utili. Nel caso oggetto di studio, al contrario, si intende **definire un modello, o meglio un “sistema” produttivo, che abbia una precisa e netta identità agricola, che la conservi nel tempo, e che sia in grado di avvantaggiarsi di un’attività aggiuntiva, integrativa, strettamente connessa ed intimamente associata a quella agricola** e che possa svolgere una funzione di supporto ad essa, interagendo sinergicamente col settore della produzione di energia da fonte rinnovabile.

Il complesso dei requisiti agronomici ed ingegneristici associati/associabili alla proposta “agrovoltaica” definiscono tale proposta non come una semplice soluzione tecnologica, bensì come un **sistema integrato agro-energetico**, potremmo addirittura parlare di sistema di “consociazione” o di “ibridazione” od ancora di “simbiosi” produttiva. Il sistema agrovoltaico, dunque, si qualifica come un insieme articolato di processi tecnologici connessi l’uno all’altro a costituire un modello funzionalmente unitario di coltivazione (in ambito orticolo e/o frutticolo) e di generazione elettrica da pannelli fotovoltaici. Componenti del sistema sono dunque quelli di tipo agronomico in

## IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”: UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

associazione a quelli di tipo ingegneristico che devono armonizzarsi nel modo migliore possibile per conseguire il risultato ottimale, ovvero la combinazione dei due processi produttivi valorizzando tutte le possibili interazioni positive.

Il “sistema” così definito può qualificarsi anche come “modello” in quanto esso diviene un conveniente termine di paragone, uno schema di riferimento ai fini della sua riproduzione generalizzata ed implementazione nei contesti più diversi (ma idonei e selettivamente prescelti), un esempio ideale a cui tendere attraverso l’adozione delle soluzioni che il sistema individua come le più appropriate, al netto delle inevitabili modulazioni di contesto.

Si vogliono qui anticipare alcune *parole chiave* in modo, si spera, da predisporre interesse in merito a quanto verrà riferito più avanti. Esse sono: bioeconomia, energia da fonte rinnovabile, agricoltura biologica, processi di bioraffineria, tecniche agronomiche avanzate e gestione automatizzata delle operazioni colturali, nutraceutica, destagionalizzazione della produzione orticola, ampliamento dei mercati ortofrutticoli, integrazione paesaggistica, risparmio d’uso del suolo.

## Sillabo

Sono di seguito riassunti, in forma schematica, i concetti più rilevanti che riepilogano le considerazioni svolte nell'intero documento. Ciascuno dei punti riportati sarà poi oggetto di una più approfondita esposizione nelle diverse sezioni che compongono questo report.

- **L'ortofrutta comparto trainante dell'agricoltura nazionale.** La proposta “agrovoltaica” è stata recepita, prima, e poi prospettata a partire dalla sollecitazione di numerose aziende del comparto ortofrutticolo, settore che rappresenta, nel quadro generale dell'agricoltura nazionale, la “punta di diamante”, ovvero l'apice più evoluto dell'agricoltura, sia per il livello tecnologico raggiunto che per la professionalità dei suoi imprenditori (Nomisma, 2015).
- **Conseguire l'eccellenza nell'innovazione tecnologica.** La sfida lanciata dal comparto ortofrutticolo è quella di affiancare all'adozione delle più efficienti tecnologie di produzione e di trasformazione del prodotto, anche processi di generazione di energia da fonte rinnovabile. Il vantaggio che ne discende è duplice: non solo quello di conseguire un rilevante risparmio dei consumi energetici aziendali, ma anche di acquisire un'importante integrazione di reddito (che dia forza economica e stabilità alle imprese agricole). Tali vantaggi non sono semplicemente additivi, ma sinergici, ovvero il beneficio complessivo che ne consegue è superiore alla somma di quelli singolarmente considerati.
- **Un modello produttivo integrato.** L'intento è quello di applicare un modello produttivo perfettamente integrato. La sua ottimizzazione prevede l'adozione di rigorosi processi di gestione delle tecniche di coltivazione, sistemi di tracciabilità e certificazione della qualità del prodotto, tecnologie di supporto alla gestione aziendale incentrati su sensoristica, automazione, tecnologie ICT, *precision farming*. Nel medesimo pacchetto tecnologico che definisce il rilevante portato dell'innovazione proposta, s'innesta un'ulteriore attività, riconosciuta come “connessa” al complesso delle funzioni in cui si articola l'attività agricola. Essa consiste nella generazione energetica da fonte rinnovabile. La fonte energetica solare, non sarebbe nemmeno il caso di precisarlo, accomuna strettamente l'agricoltura al fotovoltaico e quindi affranca il sistema produttivo agricolo dalla dipendenza da fonti energetiche di origine fossile (quest'ultima una condizione “paradossale” per il settore medesimo che, invece, dovrebbe “nutrirsi” solo di fotosintesi – funzione autotrofa per eccellenza).
- **Attivare interazioni di “sinergia” e processi di “simbiosi”.** Si vuole indicare la condizione per cui è possibile conseguire risultati produttivi (e pertanto economici) che sono superiori alla semplice somma dei risultati che potrebbero essere ascritti alle soluzioni semplici, ossia singolarmente od isolatamente applicate. In particolare, l'utilizzo produttivo delle superfici agrarie (ovvero l'utilizzo del suolo, risorsa sempre più scarsa) risulterebbe molto efficiente adottando la proposta “agrovoltaica”, così come dimostrato da un indice LER (*Land Equivalent Ratio*) anche di molto superiore all'unità.
- **Ottimizzare la scelta colturale da associare al modello agrovoltaico.** Il modello proposto non può prescindere da una razionale ed efficace individuazione di una gamma di colture agrarie (e, più in particolare, di specie ortofrutticole) che meglio si prestino alle condizioni previste e che, pertanto, possano manifestare la piena espressione del risultato produttivo atteso (nei suoi migliori aspetti quantitativi e qualitativi). Dunque, la scelta della coltura orticola o frutticola ricopre un significato strategico ai fini dell'ottimizzazione del sistema agrovoltaico. Da essa

discendono poi i caratteri strutturali dell’impianto fotovoltaico da combinare con la coltivazione prescelta a costituire un *unicum* integrato, opportunamente ottimizzato mediante l’applicazione del set più avanzato di tecniche colturali.

- **Diversificazione del sistema agro-ecologico.** L’ottimizzazione dei processi produttivi deve tendere alla definizione di un “pacchetto” tecnologico completo che si collochi alla frontiera delle tecnologie finora conosciute e che traguardi obiettivi di compatibilità ambientale e sostenibilità ecologica. Questo, ad esempio, vuol dire che una precisa scelta agronomica sarà quella di indirizzare le tecniche di coltivazione verso la realizzazione del regime biologico (“*organic farming*”). Inoltre, la strutturazione dei campi coltivati, così come dei margini delle unità colturali, degli spazi cosiddetti “improduttivi” e delle aree interpoderali di afferenza aziendale terrà debitamente in conto gli indirizzi di diversificazione ecologica (“*greening*”) mediante la realizzazione di plurimi elementi d’interesse ecologico (“*ecological focus area*”) ed elementi caratteristici del paesaggio, a costituire una sorta di “rete ecologica” aziendale capace di connettersi a quella territoriale mediante la realizzazione di fasce tampone, margini inerbiti, siepi arboreo-arbustive, ed altre infrastrutture ecologiche. Il modello così concepito esalta la biodiversità, quella agraria e quella selvatica associata alla prima, ed incrementa la resistenza e la resilienza degli agroecosistemi (ossia la capacità di fronteggiare perturbazioni o di ripristinare condizioni di stabilità dopo che tali perturbazioni abbiano agito). Ciò consente di aumentare il grado di autonomia ed autoregolazione dei sistemi agrari, di ridurre significativamente gli interventi di gestione basati sull’apporto di *input* agrotecnici (estremamente energivori e a rischio di causare inquinamento) evitando che i processi naturali vengano surrogati per azione diretta da parte dell’agricoltore.
- **Il territorio rurale e lo sviluppo endogeno delle sue comunità.** Se l’azienda agraria ad indirizzo ortofrutticolo è il “cuore pulsante” della proposta, le aree rurali ne rappresentano, evidentemente, il contesto territoriale. La proposta “agrovoltaica” non può che realizzarsi presso le aziende agricole ed è fisicamente allestita nelle aree che hanno destinazione agricola e specifico indirizzo ortofrutticolo. Si ribadisce che tale innovativa soluzione è contraddistinta da un connubio inscindibile fra coltivazione agricola e produzione energetica, trattandosi di una “ibridazione” tecnologica fondata su di un legame di tipo “simbiotico”. Avvalorando la visione multifunzionale che oggi contraddistingue l’agricoltura nelle sue espressioni più avanzate, il territorio rurale diviene quindi teatro di virtuosi processi d’innovazione (e di “svecchiamento” tecnologico) che attivano fermenti di sviluppo “a cascata”, ossia forieri di un rilevante effetto moltiplicativo a vantaggio delle comunità locali.
- **Coerenza con la “vision” europea.** Il pacchetto tecnologico integrato qui discusso interpreta in modo coerente gli orientamenti ormai consolidati che la politica europea ha assunto (Programmazione 2021-2027), così come quelli previsti a medio-lungo termine (2030 e 2050). In particolare, essi rimandano sul piano internazionale all’**Accordo di Parigi** (2015) e sul fronte europeo alla strategia **Green Deal** (energia, biodiversità, agricoltura ed alimentazione) così come a numerose altre linee programmatiche elaborate dalla Commissione Europea e recepite anche dal Governo italiano, sia attraverso il Ministero dell’Ambiente (MAATM), che quello dell’Agricoltura (MIPAAF) o dello Sviluppo Economico (MISE). Si pensi, ad esempio al PNIEC, trasmesso dal Governo italiano alla Commissione Europea nel gennaio 2020.
- **Consentire il pieno dispiegamento delle potenzialità del fotovoltaico.** La generazione elettrica da fotovoltaico ha ormai conseguito una piena condizione di “*grid parity*”. Ciò implica che lo

sviluppo di tale tecnologia è del tutto concorrenziale, nei suoi profili di costo, alla generazione elettrica da fonte fossile e che non è più necessario sostenerne ulteriormente la produzione attraverso sussidi economici di natura pubblica. L'energia elettrica da fotovoltaico è la forma di generazione energetica più competitiva nel settore delle fonti rinnovabili e si contraddistingue per uno sviluppo progressivo ed accelerato (in termini di potenze installate a scala mondiale) che non ha uguali rispetto ad altre tecnologie. Gli obiettivi nazionali ed internazionali che sono stati fissati in merito alla sua espansione oggi incontrano un vincolo evidente, ovvero la difficoltà crescente di dover occupare superfici sempre più ampie sulle quali posizionare gli impianti. Precise stime suggeriscono che le aree urbane e quelle infrastrutturate (aree industriali, periurbane, aree di frangia, ecc.) non sono sufficienti allo scopo (rappresentando solo il 20% circa di quelle necessarie) ed è evidente che un *tradeoff* si viene a determinare in merito alla destinazione d'uso dei suoli agricoli che potrebbero, o meno, sostenere la crescita del fotovoltaico. Occorre superare questo “doppio legame” (o, in altri termini, questo “aut-aut”) ed individuare soluzioni “*disruptive*”. Una sorta di “salto quantico” o svolta paradigmatica potrebbe per l'appunto provenire dalla proposta “agrovoltaica”.

- **Definire l'ambito territoriale ed il contesto paesistico più idoneo per l'adozione del sistema agrovoltaico.** A riguardo della progressiva espansione degli impianti fotovoltaici su suolo agricolo, certamente non sfuggono gli allarmi, da più parti sollevati, sul rischio che ciò possa condurre all'insorgere di un progressivo snaturamento delle aree rurali. Questo non deriverebbe soltanto dal rischio di una graduale disattivazione produttiva dei terreni agricoli. Un ulteriore elemento di rischio, infatti, sarebbe rappresentato dall'impatto negativo che questi interventi determinerebbero sui caratteri identitari del *paesaggio agrario*. In rapporto agli ambiti ed alle figure territoriali di riferimento, tali caratteri sono il risultato della stratificazione storica delle diverse forme di organizzazione agraria, a loro volta specchio dell'organizzazione socio-economica delle civiltà del passato, fino ai tempi più recenti. Sono, in altri termini, patrimonio culturale inalienabile. Compito di una corretta “pianificazione” a scala territoriale, così come di una accurata “progettazione” a scala aziendale, è quello di salvaguardare i “*pattern*” paesaggistici più significativi. Alcune forme peculiari del “mosaico” agroecologico, nonché forme esclusive del patrimonio storico-agrario sono infatti oggetto di tutela, così come gli “ulivi monumentali”, ad esempio, ed i “paesaggi rurali storici” riconosciuto dal Ministero dell'Agricoltura ed iscritti in un apposito catalogo nazionale. Occorre però qui chiaramente affermare che l'ottimale, armonica e più funzionale implementazione del modello “agrovoltaico” è associabile a quelle aree dove l'intensificazione agricola, così come determinatasi nel corso degli ultimi decenni, nonché la vicinanza alle installazioni di lavorazione, trasformazione e commercializzazione del prodotto agricolo consentono una più efficace interazione con l'industria agro-alimentare, con i mercati, con le infrastrutture di trasporto, quelle di lungo raggio, ciò al fine di alimentare un prevalente flusso in *export* del prodotto lavorato. Anche sotto il profilo paesaggistico, quindi, si viene a determinare una sintonia fra attività agricola ed attività energetica in quanto è richiesta una preferenziale localizzazione in aree che, sebbene ancora agricole, sono quelle più prossime ai centri urbani, alle aree con un “denso” livello d'infrastrutturazione, caratterizzate da una buona presenza di industrie di trasformazione agro-alimentare. Ne consegue che si tratterebbe di aree territoriali che, probabilmente già da lungo tempo, hanno perso quei caratteri di ruralità che manifestano una più spiccata esigenza di tutela paesaggistica ed hanno invece assunto caratteri di ibridazione con quelli associati ai processi di espansione urbana ed agglomerazione delle sue infrastrutture economico-produttive.

## Ripartire dall’agricoltura: espandere la frontiera dell’innovazione

Nonostante le difficoltà e l’incessante susseguirsi di periodi di crisi economica (il cui culmine è stato raggiunto negli ultimi mesi con la gravissima situazione di pandemia virale da Covid-19), l’agricoltura italiana offre a considerare prestazioni di grande rilevanza in virtù dei risultati economici che riesce ad esprimere (di certo non l’unico indicatore, ma sicuramente quello più attentamente monitorato).

Sebbene, in Italia, le realtà imprenditoriali del mondo agricolo siano composite e territorialmente articolate, anche in risposta ad un’accentuata diversificazione geografica, i livelli competitivi conseguiti dal settore nel suo complesso sono considerevoli. Occorre sinteticamente enumerarli, in particolare rispetto agli altri Stati Membri dell’UE, significativamente quelli più importanti (ovvero Francia, Germania, Spagna, Olanda, aggiungendovi anche il Regno Unito, ormai formalmente fuori dalla UE). I dati riportati di seguito (*Tabella 1*) sono il frutto di un’indagine periodicamente realizzata dal CREA (2020).

**Tabella 1.** Valore della produzione, dei consumi intermedi e valore aggiunto conseguito dal settore agricolo nei più importanti paesi europei. (unità di misura: milioni di Euro; il riferimento è ai prezzi base).

	UE 28	Francia	Germania	Italia	Spagna	Regno Unito	Paesi Bassi	Polonia
Produzione agricola di beni	398.381	68.918	49.811	47.090	51.628	27.046	25.163	24.183
Produzione agricola di servizi	20.746	4.552	2.424	5.010	520	1.317	2.687	548
Attività secondarie (non separabili)	16.768	2.536	964	4.630	1.244	1.518	899	106
<b>Produzione della attività agricola</b>	<b>435.895</b>	<b>76.006</b>	<b>53.199</b>	<b>56.730</b>	<b>53.392</b>	<b>29.882</b>	<b>28.749</b>	<b>24.837</b>
Consumi intermedi	253.562	43.866	36.428	24.497	23.205	19.128	17.735	15.373
<b>Valore aggiunto</b>	<b>182.333</b>	<b>32.140</b>	<b>16.772</b>	<b>32.233</b>	<b>30.187</b>	<b>10.754</b>	<b>11.014</b>	<b>9.464</b>

(Tratto da “L’agricoltura Italiana Conta 2019. Pubblicazione realizzata dal CREA, 2020)

Nel confronto tra Paesi, l’Italia è al secondo posto tra i principali partner comunitari per il valore della **produzione agricola**, dopo Francia e prima di Spagna e Germania, mentre considerando il **valore aggiunto** della nostra agricoltura, essa si colloca al primo posto della graduatoria comunitaria. A riguardo, è anche opportuno riferire che l’Italia, con poco meno di 12.5 milioni di ettari di SAU, è il settimo paese nella graduatoria UE per superfici coltivabili a disposizione (meno della metà della Francia, che è la prima in graduatoria). Ciò nonostante, l’Italia produce il valore aggiunto maggiore di tutta la UE.

Il valore della produzione agricola, infatti, ha sfiorato i 57 miliardi di euro (nel 2018); quasi il 14 % è rappresentato dalle produzioni di ortaggi, quasi il 12 % dai prodotti vitivinicoli, il 2,3 % dai prodotti dell’olivicoltura, mentre frutta ed agrumi coprono quasi il 10 % del valore totale. Ciò significa che poco meno del 40 % della produzione agricola nazionale è attribuibile al **comparto ortofrutticolo**.

E’ preminente rilevare, inoltre, come la quota della produzione agricola relativa ai **servizi ed alle attività secondarie** sia ben più alta per il nostro Paese rispetto agli altri, così come decisamente più contenuti siano i nostri **consumi intermedi**. E’ da questa combinazione di fattori che scaturisce il primato dell’agricoltura italiana in termini di valore aggiunto, che supera i 32 miliardi di Euro (sempre nel 2018). Il valore corrente dei consumi intermedi è di poco superiore ai 24 miliardi di Euro. L’Italia si conferma, pertanto, il Paese europeo con la più **bassa incidenza dei consumi intermedi** rispetto al valore totale della produzione agricola. In termini complessivi, il 43% del valore della produzione agricola è assorbito dai consumi intermedi (contro il 58% della media europea). E’ questo il risultato dell’ampia diversificazione del sistema produttivo agricolo con la presenza di

attività che richiedono minori impieghi di mezzi tecnici ma, soprattutto, la capacità di conseguire un livello particolarmente elevato di **efficienza produttiva** in raffronto agli altri Paesi UE.

Quasi tutti i Paesi UE hanno visto aumentare significativamente la quota dei consumi intermedi sulla produzione; questo incremento rimane però più contenuto in riferimento all'Italia. La crescita dei consumi intermedi è stata determinata dall'incremento dei prezzi ed in particolare quelli dei prodotti energetici (oltre che dei mangimi). L'incidenza dei **costi energetici** rappresenta, per l'Italia, il 14% dei consumi intermedi totali (prevalentemente connessi alla meccanizzazione agricola), di gran lunga superiori ai consumi di concimi (6,2%) e dei fitofarmaci (3,9%).

Si confermano, inoltre, i forti caratteri di diversificazione dell'agricoltura italiana. Infatti, il valore congiunto della produzione agricola legata alle **attività di supporto** ed alle **attività secondarie** ha superato l'incidenza del 20% sul totale. Riguardo alle attività secondarie, si conferma il ruolo di primo piano della **produzione di energia da fonti rinnovabili**, a cui corrisponde un valore produttivo valutabile intorno a 1,5 miliardi di Euro.

Qual è, dunque, l'informazione che possiamo trarre da questi dati e quali le prospettive che è opportuno delineare per il futuro, affinché i caratteri altamente positivi del settore possano confermarsi nel tempo ed anzi viepiù svilupparsi secondo le tendenze appena evidenziate?

Si può certamente affermare, in estrema sintesi, che la nostra agricoltura è competitiva, è più efficiente di altre, si contraddistingue per minor consumi, un'elevata diversificazione, una maggiore incidenza di attività secondarie connesse all'attività prettamente agricola e che al suo interno si manifesta il dinamismo di un settore ortofrutticolo in grado di esprimere quanto di meglio l'innovazione tecnologica ed organizzativa può oggi proporre.

In altri termini, l'ortofrutta è un settore posto su di un fronte tecnologico altamente efficiente che deve però costantemente confermare la sua posizione di ottimo “relativo” attraverso un **flusso incessante d'innovazione**, garantendo costanti **trasferimenti tecnologici** in grado di spostare ulteriormente il posizionamento già conseguito verso condizioni migliorative. Le possibilità di miglioramento vanno progressivamente chiudendosi a misura che gli incrementi marginali si contraggono e ciò chiama in causa l'opportunità di una **“disruptive innovation”** che sappia efficacemente ampliare le potenzialità di manovra, generando nuovi spazi di sviluppo imprenditoriale.

L'ambito di sviluppo qui traguadato (entro il quale “incastonare” il processo d'innovazione) riguarda, pienamente e coerentemente, la strategia **“green deal”** che la UE ha lanciato solo pochi mesi fa e che deve contraddistinguere il prossimo settennato 2021-2027. Si avrà modo, nel proseguo del report, di mettere a fuoco le convergenze e le sinergie con questo ambizioso programma europeo. Avendo ravvisato questo particolare orizzonte strategico, è possibile sviluppare un percorso innovativo che miri ad un profondo e radicale perfezionamento tecnologico del processo produttivo in ambito ortofrutticolo, in grado d'integrare un complesso ed articolato set di tecnologie che nel loro insieme definiscano una modalità efficace, sostenibile e redditizia di “fare agricoltura”.

Le forze endogene al settore potrebbero indirizzarsi, anche autonomamente, verso virtuosi percorsi d'innovazione. Ma per rendere di fatto praticabili questi percorsi, occorre che essi siano adeguatamente **accompagnati e sostenuti da una lungimirante programmazione istituzionale** e, in particolare, che non vengano **ostacolati da un assetto normativo e regolamentare** che, pur salvaguardando principi e valori irrinunciabili, abbia la capacità di armonizzare virtuosamente sviluppo economico, salvaguardia ambientale, protezione delle risorse naturali, della biodiversità e

del paesaggio. Conseguire questa armonizzazione non è certo un compito facile, per questo occorre che le istituzioni ed i modelli di *governance* da esse elaborati siano all'altezza delle aspettative ed alla portata delle sfide che ci attendono. Occorre discernere in modo rigoroso ed efficace le innovazioni “vere”, che questa armonizzazione la interiorizzano come presupposto da cui far partire l'innovazione tecnologica, rispetto ad innovazioni più “speculative”, probabilmente più remunerative nel breve periodo, ma dal “fiato-corto”.

L'analisi da noi condotta consente di sostenere che la proposta “agrovoltaica” potrebbe candidarsi ad essere una di quelle soluzioni in grado di favorire e rendere praticabile quella “**transizione ecologica**” da più parti invocata, ma ancora difficile da definire in termini di programmi e misure d'intervento. Programmi concreti (come quelli che dovrebbero figurare nel *portfolio* del **Next Generation Europe**) e che siano in grado di guidare la ripresa delle nostre società, traguardando entro il 2030 ed il 2050 la fine della dipendenza dalle fonti energetiche di origine fossile ed una ristrutturazione economico-produttiva all'insegna della **bioeconomia** e dell'**economia circolare**, prima che il nostro pianeta vada incontro ad un riscaldamento globale capace di causare danni ecologici irreversibili e conseguenti effetti socio-economici ed umanitari di portata disastrosa.

### Il “nodo gordiano” alla base della proposta “agrovoltaica”

Le tematiche globali (“macro-sistemiche”) attorno alle quali s'incentra l'elaborazione della proposta “agrovoltaica” sono fundamentalmente tre; esse costituiscono una sorta di “trilemma” le cui implicazioni sono talmente avviluppate fra loro da costituire una sorta di “nodo gordiano”, inscindibile, non scomponibile, eventualmente sormontabile solo attraverso una strategia unitaria (“olistica”) che affronti tutti i problemi in modo contestuale e simultaneo (da cui l'esigenza di un approccio “*disruptive*”).

Le nostre società, pervenute ad un livello ormai globale d'integrazione economica, sono alla ricerca di soluzioni che possano rispondere adeguatamente alla pressante esigenza che si articola su tre fondamentali tensioni strategiche: **sicurezza alimentare, ambientale ed energetica**. Almeno in termini programmatici, la “transizione ecologica” proposta dalla strategia europea 2021-2027 si propone di affrontare congiuntamente questi stessi temi a carattere “epocale”.

Perseguire uno dei tre obiettivi significherebbe, quasi fatalmente, allontanarsi dalla realizzazione degli altri due, in un nefasto gioco “*ad excludendum*”. Infatti:

1. l'intensificazione dei processi produttivi agricoli da cui trarre produzioni sufficienti a soddisfare le richieste alimentari globali di una popolazione ancora in crescita può implicare un eccessivo sfruttamento delle risorse naturali ed una profonda alterazione degli equilibri ambientali;
2. d'altro canto, salvaguardare il patrimonio naturale e la biodiversità richiederebbe che aree più o meno vaste siano sottratte alle attività antropiche ed ai processi produttivi conseguenti;
3. infine, l'esaurimento progressivo delle fonti fossili di energia ed il loro stretto legame causale con il riscaldamento a scala planetaria implicano il pieno dispiegamento delle fonti rinnovabili le quali, per esprimere appieno le loro potenzialità, necessitano una notevole occupazione di suolo, a discapito sia dell'agricoltura che della protezione delle aree naturali.

Come risolvere questo intricato “nodo”?

Sistemi agricoli ad elevata compatibilità ambientale, “permeabili” all’innovazione, energeticamente autonomi, altamente remunerativi

Sebbene negli ultimi decenni si sia registrato un significativo incremento della produttività agricola, esso è stato conseguito sottoponendo le risorse naturali e l’ambiente a sollecitazioni molto pressanti e non più sopportabili. Il 45% dei terreni europei presenta problemi di degrado, evidenziati ad esempio, da bassi livelli di sostanza organica; inoltre, quasi un quarto di essi è afflitto da un grado di erosione moderato od elevato. Ecosistemi preziosi, e con essi la fornitura di insostituibili servizi ecosistemici, sono stati danneggiati o sono addirittura ormai del tutto pregiudicati.

Considerando la scala europea, le emissioni atmosferiche (gas serra) ad azione clima-alterante attribuibili al settore delle produzioni agrarie contribuiscono al fenomeno del riscaldamento globale per una proporzione del 10%, addirittura superiore, sebbene di poco, a quella del settore industriale (9%), rimanendo del tutto dominanti i processi di combustione connessi al riscaldamento ed ai trasporti. Proseguendo nella comparazione fra i settori produttivi, un notevole interesse riveste anche il dato di “intensità” emissiva. A questo riguardo, secondo la statistica NAMEA prodotta dall’ISTAT, il settore dell’agricoltura evidenzia un livello emissivo pari a 1.452 t CO<sub>2</sub>-eq. per milione di Euro di valore aggiunto, valore circa sette volte superiore al livello medio dell’intera economia italiana (244 t CO<sub>2</sub>-eq. per milione di Euro di valore aggiunto).

Oltre ad aggravare il riscaldamento globale, queste emissioni inquinano l’aria e costituiscono un pericolo sanitario per l’uomo nonché una minaccia a carico della biodiversità. I dati statistici relativi all’Italia, infatti, confermano che l’agricoltura agisce in modo rilevante sull’inquinamento atmosferico. Volendo procedere al computo dei costi economici conseguenti a queste forme di inquinamento (le cosiddette “esternalità”), ogni anno il settore agricoltura (includendovi anche la zootecnia) segna un costo a danno della collettività pari a quasi 11 miliardi di Euro, a fronte dell’industria manifatturiera a cui si addebita un costo di poco superiore ai 7 miliardi di Euro (dati ISPRA; Aspromonte e Molocchi, 2013).

Occorre pertanto contenere drasticamente queste tipologie di emissioni, ridimensionando i costi esterni ascrivibili al settore agricolo. Elaborare/progettare sistemi produttivi agricoli a forte risparmio di *input* agrotecnici, meno esigenti in energia fossile, più validi nell’impiego dell’energia nativa del sole, ottimizzati a seguito di accurate valutazioni eseguite a mezzo di bilanci energetici ed emissivi, significa traguardare un modello di agricoltura “*carbon neutral*” (ovvero capace di non aggravare il bilancio emissivo a carico di gas serra). Per di più, se si mettessero in atto interventi in grado di capitalizzare l’energia radiante del sole in forma di sostanza organica nel suolo, di esaltare processi di *sink* del carbonio atmosferico adottando le migliori tecniche agronomiche (anche in chiave di rivisitazione moderna di antiche pratiche), di massimizzare gli effetti positivi conseguenti all’apporto di ammendanti, compost, ecc. si riuscirebbe a conseguire un modello di agricoltura “*carbon negative*” (ovvero capace di effettuare un sequestro di carbonio atmosferico).

***La scelta di adottare il regime di agricoltura biologica come “tassello” integrante della proposta “agrovoltaica” è un’esplicita indicazione di voler traguardare la realizzazione di sistemi agricoli ad elevato valore naturale ed ecologicamente sostenibili.***

D’altro canto, le recenti proposte legislative della Commissione Europea inerenti alla Politica Agricola Comune (PAC), relativa al nuovo periodo di programmazione 2021-2027, accentuano il ruolo dell’agricoltura che si pone a vantaggio della sostenibilità ecologica e della compatibilità ambientale. Infatti, in parallelo allo sviluppo sociale delle aree rurali ed alla competitività delle

aziende agricole, il conseguimento di precisi obiettivi ambientali e climatici è componente rilevante della proposta strategica complessivamente elaborata dalla Commissione EU. In particolare, alcuni specifici obiettivi riguardano direttamente l’ambiente ed il clima. Contribuire alla mitigazione ed all’adattamento nei riguardi dei cambiamenti climatici, come pure ***favorire l’implementazione dell’energia sostenibile nelle aziende agricole***; promuovere lo sviluppo sostenibile ed un’efficiente gestione delle risorse naturali (come l’acqua, il suolo, l’aria); contribuire alla tutela della biodiversità, migliorare i servizi ecosistemici e preservare gli habitat ed i paesaggi sono esplicitamente fra le finalità della PAC 2021-2027.

In particolare, fra le diverse esigenze d’innovazione si annovera anche un ***uso più rilevante di fonti energetiche rinnovabili*** e la riduzione dei rifiuti, in linea con gli orientamenti dell’economia circolare e gli indirizzi della ***“bio-based economy”***.

In questo contesto, un potenziale di sviluppo importante è offerto dalla disponibilità di ***tecnologie altamente innovative***. Ci si riferisce, ad esempio, alle ***“Information and Communication Technologies”*** (ICT), agli strumenti di navigazione satellitare, all’agricoltura di precisione (***“precision farming”***) o sito-specifica, ai sistemi di supporto alle decisioni ed ai sistemi automatizzati di gestione dei processi colturali, ecc.

***Attività integrative del reddito agricolo***. D’altro canto, l’aumento sostenibile della produzione deve accompagnarsi ad un ***miglioramento della redditività economica dei produttori agricoli***. La quota di valore aggiunto maturata dagli imprenditori agricoli nell’arco della gestione complessiva delle filiere agro-alimentari si è, invece, progressivamente erosa. Senza un incremento della redditività delle aziende agricole, raggiungere la sostenibilità ecologica ed il conseguimento di incrementi produttivi sarà impresa vana.

Riuscire a ***conseguire un adeguato livello di reddito da parte delle aziende*** è il risultato di una maggiore competitività che si consegue in termini di volumi di produzioni adeguate, ridotto profilo dei costi colturali, buon piazzamento di mercato, adeguate strategie di ***marketing***. Il prodotto ortofrutticolo ha tutte le potenzialità per accrescere il suo livello di penetrazione commerciale. Particolare rilevanza assume, fra le altre, la strategia di riuscire ad offrire il prodotto in periodi di limitata offerta generalizzata (ma forte richiesta da parte del consumatore). Questa tendenza alla ***“destagionalizzazione”*** (riuscendo ad ottenere un prodotto ***“precoce”*** oppure ***“tardivo”***) rappresenta un fattore competitivo di notevole importanza che orienta le strategie messe in atto da numerosi imprenditori.

A quanto precedentemente riferito si deve poi aggiungere la ***diversificazione produttiva*** come obiettivo per lo sviluppo economico, sociale e ambientale. La multifunzionalità delle attività è un’occasione importante per le aziende agricole, consente di riappropriarsi di un loro ruolo strategico nell’economica nel suo complesso. L’ampliamento dei confini tradizionali dell’agricoltura nasce all’interno del processo di riorganizzazione del settore avviatosi negli ultimi decenni e accelerato nell’ultimo periodo dalla globalizzazione e dalla crisi economica. Da un lato, la multifunzionalità è una strategia idonea a fronteggiare la riduzione e l’instabilità dei redditi; dall’altro, è uno strumento per sottolineare il ruolo che il settore può esprimere nel contribuire allo sviluppo del paese, all’insegna della sostenibilità economica, ma anche culturale, alimentare, territoriale ed ambientale. Il ruolo multifunzionale, così come favorito dalle politiche comunitarie, mira infatti a restituire centralità al settore produttivo primario, contribuendo a riaffermare il suo ruolo strategico sul piano dello sviluppo futuro (Tolomeo, 2013).

## IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”: UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

La produzione di energia da fonte rinnovabile è da considerarsi un'espressione peculiare della multifunzionalità dell'agricoltura e, pertanto, la proposta “agrovoltica” conferma la direttrice strategica che contraddistingue le politiche di “sviluppo rurale” adottate da tutti i Paesi appartenente alla UE.

Da questa prospettiva, ***il fotovoltaico non sostituisce l'attività agricola, anzi ne incrementa significativamente la redditività e contribuisce alla sua permanenza e stabilizzazione, evitando l'insorgere di processi di disattivazione delle aziende agricole ed abbandono delle aree rurali. Ciò ha come logico corollario anche il mantenimento dell'occupazione degli agricoltori i quali, sempre più di frequente orientano le loro capacità professionali in altri settori produttivi.***

Salvaguardia del territorio, contrasto al consumo di suolo, arresto della perdita di biodiversità, creazione di sistemi agricoli ad elevato valore ecologico

Il consumo di suolo procede senza sosta, determinando ingenti perdite ambientali. Inoltre, la progressiva contrazione di superficie agricola pone a rischio la sicurezza alimentare del nostro Paese, esponendo la comunità nazionale ad una pronunciata dipendenza da approvvigionamenti esteri.

Le dinamiche inerenti alla perdita di suolo agricolo sono però complesse sebbene, sostanzialmente, esse possano riferirsi a due processi contrapposti, spazialmente distinti. Da un lato, la disattivazione e l'abbandono delle aziende agricole che insistono in aree marginali e che non riescono a fronteggiare adeguatamente condizioni di mercato sempre più competitive e globalizzate; dall'altro, l'aggressione continua ed incessante dell'espansione urbana e delle sue infrastrutture commerciali e produttive a scapito delle aree agricole, particolarmente dei terreni di pianura, quelli più produttivi e logisticamente meglio serviti.

L'aggressione del costruito e le modifiche d'uso del suolo alterano la conformazione del paesaggio, specie quello rurale, ne modificano profondamente le caratteristiche idrologiche (permeabilità dei suoli e ricarica delle falde), compromettono la connettività ecologica e la salvaguardia degli *habitat* che insistono sul territorio, con particolare allarme per quelli considerati prioritari ai fini della conservazione della biodiversità.

Se ben progettato ed ottimamente gestito, un sistema *agrovoltico*, collocato in un contesto agricolo contraddistinto da un grado d'intensificazione culturale medio-alta, consente la presenza di elementi di diversificazione ecologica entro i campi coltivati e fra essi, lungo i margini, le capezzagne, le aree intra- ed inter-poderali. Dunque favorisce la realizzazione di una ***rete ecologica locale*** capace di riconnettersi con quella territoriale, promuovendo la biodiversità (quella del suolo e quella del soprassuolo), la mobilità delle specie animali selvatiche attraverso la realizzazione di corridoi ecologici, l'erogazione di importanti processi ambientali che presiedono alla circolazione degli elementi nutritivi, alla depurazione delle acque, all'accumulo di sostanza organica nel suolo, alla qualità dell'aria, all'equilibrio biologico fra le specie (in particolare fra quelle utili e nocive alle colture agrarie). Questo assetto conferisce stabilità e resilienza all'agroecosistema, proteggendolo da sempre più frequenti perturbazioni, spesso correlate all'azione dei cambiamenti climatici.

***Sistemi agricoli diversificati, sistemi misti, eterogenei, come quelli che la proposta “agrovoltica” è in grado di esprimere, se ben progettati e gestiti al meglio delle conoscenze tecniche, sono sistemi ad elevato valore naturale, capaci di salvaguardare la biodiversità associata all'uso agricolo dei suoli, proteggendo un'ampia gamma di specie e di habitat che trovano nel contesto agricolo le condizioni più idonee al loro sviluppo.***

Questo benefico effetto può conseguire dalla **gestione in regime biologico** delle superfici coltivate, condizione che consente di escludere danni diretti a carico delle specie selvatiche in conseguenza dell’impiego di principi attivi presenti nei fitofarmaci, essendo precluso il loro impiego.

### Energia da fonti rinnovabili, mitigazione dei cambiamenti climatici

Il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), presentato dal Ministero dello Sviluppo Economico, insieme ai Ministeri dell'Ambiente e delle Infrastrutture e dei Trasporti, in attuazione del Regolamento (UE) 2018/1999, è il documento che delinea le strategie energetiche nazionali per il periodo 2020-2030. Esso fa parte del pacchetto di provvedimenti comunitari indispensabili per assicurare il rispetto degli obiettivi 2030 in materia di energia e clima.

In accordo col succitato PNIEC, una vera e propria riconversione industriale ed ecologica deve contraddistinguere il prossimo decennio. Tale transizione è segnata da ambiziosi e vincolanti impegni, riassumibili nei seguenti obiettivi nazionali: conseguire almeno il 30% di copertura dei consumi finali lordi di energia da fonti energetiche rinnovabili (FER); ridurre di almeno il 43% i consumi di energia primaria rispetto allo scenario 2007; contenere del 33% le emissioni antropogeniche di gas serra (GHG) con riferimento ai settori non ETS e rispetto ai livelli del 1990.

Per riuscire a conseguire tali ambiziosi risultati nel nostro Paese è del tutto evidente che **le installazioni FER debbono poter progredire rapidamente**. Il ritmo di sviluppo ritenuto necessario sarebbe pari ad almeno cinque volte quello attuale. In particolare, secondo il PNIEC, considerando il solo fotovoltaico, la crescita della potenza installata, da realizzarsi entro il 2030, deve essere pari a 30 GW, con installazioni sia a terra che sugli edifici. Ciò significa un incremento, in dieci anni, pari a 2,5 volte la potenza attualmente installata (+158%). Per quanto riguarda la generazione elettrica, si assume che essa debba aumentare del 65% rispetto ad oggi, arrivando a coprire oltre il 55% dei consumi nazionali.

Lo sviluppo delle installazioni riferibili ad impianti fotovoltaici dovrebbe realizzarsi secondo un tasso annuo di crescita, nel medio termine (2025) pari a 1,5 TWh/anno, accompagnato da circa 0,9 GW di potenza installata *ex-novo* ogni anno. Ancor più accentuato l’incremento previsto tra il 2025 ed il 2030, pari a 7,6 TWh/anno di generazione elettrica e 4,8 GW/anno di potenza installata (Figura 1).

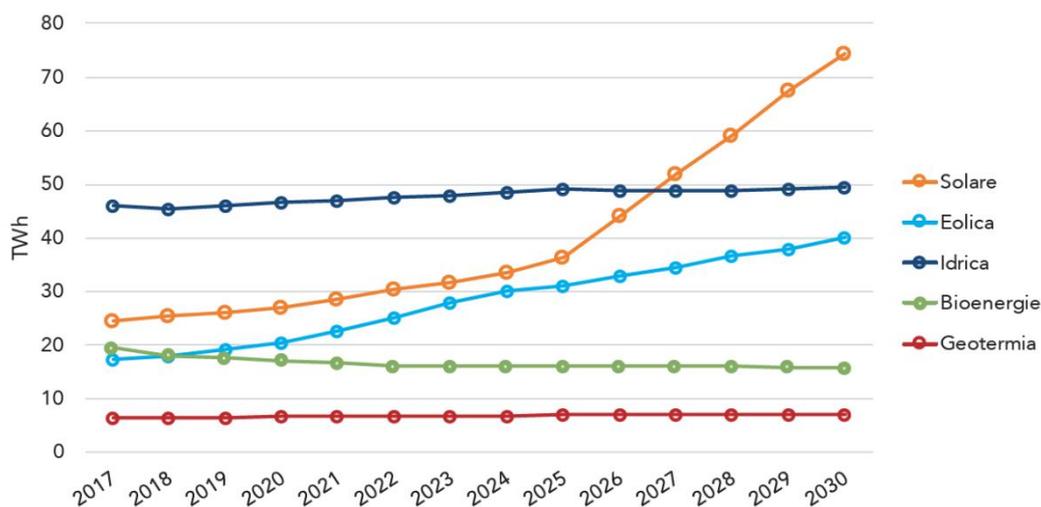


Figura 1. Traiettorie di generazione elettrica da FER

*Considerando le notevoli richieste di superfici su cui dispiegare, fino a pieno regime, le potenzialità del fotovoltaico, la proposta “agrovoltaica” consente di contemperare, in modo virtuoso, sia l’impiego agricolo dei suoli che quello energetico e costituisce, pertanto, una soluzione particolarmente idonea non solo per superare l’annoso conflitto “food vs energy”, ma anche per favorire il potenziamento di vantaggi reciproci, sia agronomici che energetici.*

### **Il pianificato sviluppo del fotovoltaico necessita l’impiego di ampie superfici**

Lo scenario di sviluppo del fotovoltaico, come osservato nella sezione precedente, prevede una forte crescita degli impianti di grande taglia i quali, nella maggior parte dei casi, vengono installati a terra. Al contrario, le installazioni di autoconsumo (sia per impianti residenziali che industriali) sono in prevalenza architettonicamente integrate sui tetti degli edifici (ES, 2019).

Sebbene gli impianti fotovoltaici di piccola taglia (ovvero di limitata potenza di picco) possano trovare una facile e funzionale integrazione architettonica su edifici in area urbana ed industriale, o nelle aree edificate dismesse, così favorendone il recupero, essi non consentono un rapido e significativo incremento della potenza complessivamente installata, come richiesto dal piano nazionale (PNIEC). Diversamente, gli impianti di grande taglia collocati “al suolo” offrono un’elevata potenzialità di sviluppo, compatibilmente rapido rispetto agli obiettivi posti al 2030 e 2050, ma manifestano la forte limitazione di non tener conto del vincolo relativo alla protezione del suolo e del conflitto diretto che si determinerebbe con le attività produttive agricole.

A dimostrazione di ciò, ad esempio, nel Decreto FER 1 si sostiene l’inammissibilità degli incentivi a favore di impianti installati su aree agricole. Al contrario, vengono favoriti impianti realizzati su discariche chiuse e ripristinate, cave non suscettibili di ulteriore sfruttamento estrattivo, nonché aree bonificate, anche quelle ricomprese nei cosiddetti “siti di interesse nazionale” (SIN), per le quali sia stata rilasciata la certificazione di avvenuta bonifica (ES, 2019).

A fronte dell’intensa ma necessaria espansione delle FER, e del fotovoltaico in particolare, si pone quindi il tema di garantire una corretta localizzazione degli impianti, con specifico riferimento alla necessità di limitare un ulteriore e progressivo consumo di suolo agricolo e, contestualmente, garantire la salvaguardia del paesaggio.

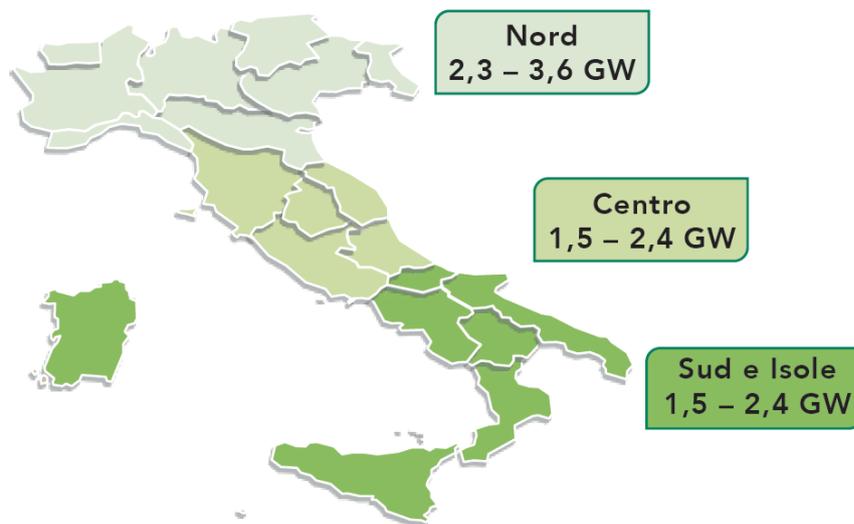
Un gruppo di lavoro del Politecnico di Milano (ES, 2019) ha eseguito una valutazione a scala nazionale riguardo alle superfici disponibili relative a discariche dismesse, cave esaurite, aree industriali dismesse, aree SIN. Il dato inerente a tali superfici è stato poi convertito in potenza fotovoltaica installabile, applicando un “fattore di occupazione suolo” (pari a 50 MW/kmq) e stimando, in ultimo, l’energia elettrica così producibile. I dettagli della valutazione possono essere rintracciati nel documento redatto dal Gruppo di lavoro “Energy & Service” del politecnico di Milano (ES, 2019).

Sebbene in Italia, teoricamente, si possano stimare tra i 3.800 ed i 4.000 kmq di aree “dismesse”, il potenziale effettivo è di gran lunga più contenuto, tenuto conto del complesso delle limitazioni che non rendono quelle superfici pienamente disponibili o quei siti tecnicamente idonei allo sfruttamento fotovoltaico). Infatti, le aree di effettiva utilizzazione si riducono drasticamente ad un *range* fra 140 e 210 kmq. Il potenziale reale delle aree dismesse potrebbe quindi garantire tra i 5,3 e gli 8,4 GW di potenza da impianti fotovoltaici. Anche considerando un tasso di realizzazione del

## IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”: UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

100%, questo valore è ampiamente inferiore alle quantità necessarie stimate dal PNIEC, pari a 30 GW (cui andrebbero in realtà sottratte le installazioni “a tetto”), rappresentando un contributo compreso tra il 20 e il 30% della nuova potenza prevista.

Si può quindi concludere che, fermo restando la prioritaria localizzazione degli impianti fotovoltaici presso aree già intensamente antropizzate e degradate (quali discariche ormai esaurite, cave non più suscettibili di ulteriore sfruttamento estrattivo, siti bonificati, ecc.), esse non risultano nel complesso sufficientemente estese per realizzare le installazioni fotovoltaiche in programma al 2030-2050. Si pone pertanto il problema di verificare la disponibilità di aree ulteriori in cui realizzare i suddetti impianti così come richiesti dal PNIEC. Ciò costringe, quasi necessariamente, ad attingere ad aree agricole, nonostante le remore e le resistenze che da più parti, giustificatamente, vengono sollevate.



**Figura 2.** Installazione massima di potenza elettrica da fotovoltaico nelle aree dismesse (discariche, cave, siti industriali, aree bonificate) del territorio nazionale, ripartito in Nord, Centro, Sud ed Isole.

Se si considerasse di utilizzare, in prima approssimazione, solo il 3-4% della superficie agricola non utilizzata (SANU), che secondo le ultime rilevazioni censuarie (ISTAT, 2010) è pari a poco più di 12 mila kmq, si realizzerebbe una disponibilità compresa tra i 340 ed i 490 kmq, superficie ritenuta sufficiente a garantire la totalità delle installazioni previste nello scenario definito dal PNIEC (ES, 2019). E' quindi di tutta evidenza che, vista l'impossibilità di poter installare tutti i nuovi impianti su aree dismesse e considerando la **potenziale disponibilità di terreni agricoli non utilizzati**, questi ultimi potrebbero fornire un contributo determinante per rendere di fatto praticabile lo sviluppo così come programmato. Ciò implicherebbe che, mediante accurati processi di **pianificazione territoriale** da parte delle amministrazioni regionali occorrerebbe quindi procedere all'individuazione di ulteriori aree a vocazione energetica adottando rigorosi criteri di valutazione in un'ottica di efficace contenimento del consumo di suolo.

***In questo quadro contraddittorio e conflittuale, potrebbe opportunamente inserirsi la proposta di una virtuosa integrazione fra impiego agricolo ed utilizzo fotovoltaico del suolo, ovvero un connubio (od "ibridazione") fra due utilizzi produttivi del suolo finora alternativi (e ritenuti inconciliabili).***

Una vasta letteratura tecnico-scientifica inerente alla tecnologia “agrovoltaica” consente oggi di avanzare un’ipotesi d’integrazione sinergica fra esercizio agricolo e generazione elettrica da pannelli fotovoltaici.

### L’agrovoltaico allenta il vincolo di scarsità della risorsa suolo

E’ necessario operare una sintesi e risolvere il “trilemma” a cui si è già accennato, ovvero le tre dimensioni problematiche di sicurezza alimentare, ambientale ed energetica. Occorre, si diceva, adottare un approccio integrale ed affrontare contestualmente le tre istanze, al fine di elaborare un modello produttivo che abbia tratti di forte innovazione, in grado di ridurre tutti i possibili contrasti (*food vs environment; renewable energy vs land availability; land vs agriculture, ecc.*) e rafforzare tutti i potenziali rapporti di positiva interazione fra le istanze medesime.

Da questa prospettiva, la proposta “agrovoltaica” mostra diversi pregi. Essa consentirebbe di conseguire dei vantaggi che sono superiori alla semplice somma dei vantaggi ascrivibili alle due utilizzazioni del suolo singolarmente considerate, rispettivamente l’uso agricolo e quello energetico.

### L’indice LER: la sinergia “simbiotica” dell’agrovoltaico

Numerosi studi hanno affrontato i potenziali impatti degli impianti fotovoltaici tradizionali, in particolare in relazione all’occupazione del suolo ed al conflitto che gli impianti fotovoltaici su larga scala possono generare a discapito dell’integrità dei terreni agricoli (Nonhebel et al., 2005; Rathmann et al., 2007; Zanon e Verones, 2013; Sacchelli et al., 2016).

La produzione agraria non viene compromessa e nemmeno drasticamente ridimensionata allorché l’impianto fotovoltaico venga installato secondo principi di ottimale integrazione, così come la proposta “agrovoltaica” suggerisce. Ciò può essere dimostrato attraverso il computo dell’indice LER, ovvero “*land equivalent ratio*”. Alcune valutazioni sperimentali realizzate in Germania, negli Stati Uniti, in Cina ed anche in Italia confermano la praticabilità di questo “matrimonio”. Nel caso in cui sia la produzione agricola che quella energetica risultassero almeno superiori al 50% rispetto alle condizioni in cui le produzioni avvengano in impianti esclusivi e separati, ne conseguirebbe un LER superiore all’unità ( $LER > 1$ ), valore che decreta il vantaggio della produzione congiunta rispetto a quella singola. Ammettendo, a mo’ di esempio, che in condizioni “ibride” le produzioni agricole ed energetiche siano ridotte all’80%, ciò implica che verrebbe raggiunto un valore di LER pari a 1,6 (ovvero  $0,8 + 0,8 = 1,6$ ), di gran lunga superiore al valore unitario. Il valore unitario, infatti, indica un semplice effetto additivo fra le due tipologie d’uso congiuntamente presenti in campo. Un valore del LER superiore all’unità, diversamente, evidenzia un’interazione positiva (ossia una sinergia) fra i due processi produttivi, condizione che giustifica pienamente la convenienza ad esplicitare i due processi in “consociazione” fra loro (volendo impiegare un termine propriamente agronomico), ovvero in modo “combinato” od “integrato”.

Di solito, rimanendo in ambito agronomico, i sistemi di coltivazione mista forniscono un LER tra 1.0 e 1.3, mentre i sistemi agroforestali manifestano un LER tra 1.1 e 1.5. Un LER di 1,4 significa che, adottando un sistema misto, la produzione di un’azienda agricola di 100 ettari sarà tanto elevata quanto la produzione di un’azienda agricola di 140 ettari in cui le produzioni si realizzano separatamente. Tali aumenti sostanziali della produttività complessiva sono interpretabili in conseguenza di un utilizzo migliore delle risorse da parte del sistema misto rispetto a quello unico,

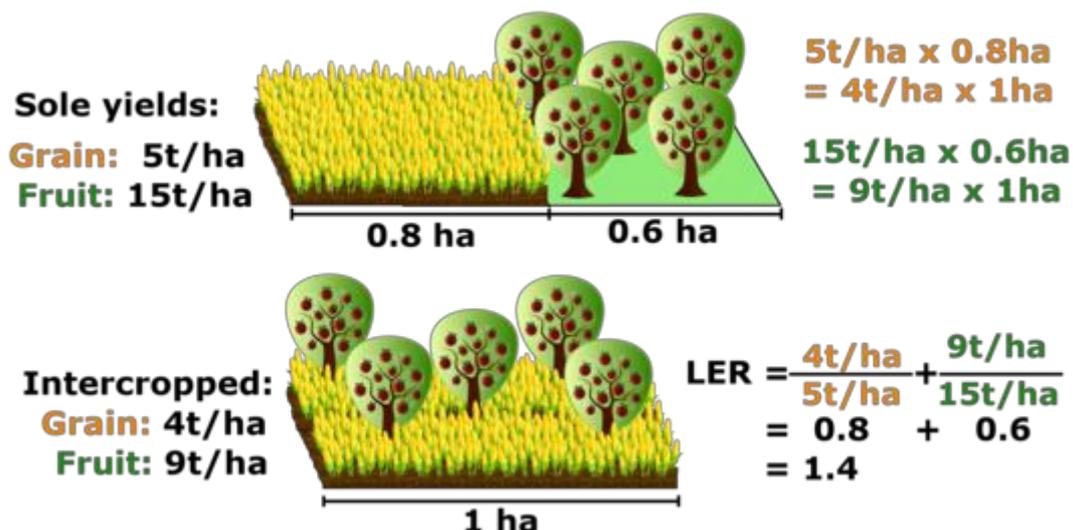
ciò che risulta dalla complementarità nell’impiego delle risorse. Nel caso in esame ci si riferisce alla radiazione solare che viene condivisa fra i due utilizzi produttivi. Inoltre, possono essere coinvolti altri processi in cui uno degli utilizzi beneficia della presenza dell’altro e viceversa. Ad esempio, la riduzione dell’evaporazione (ET) dovuta all’ombreggiamento va a vantaggio della componente agricola rispetto a quella energetica perché consente una limitazione dei consumi idrici colturali. D’altro canto, la stessa evaporazione utilizza l’energia netta disponibile sotto forma di calore latente, riducendo in modo complementare quella che verrebbe investita in calore sensibile; ciò determina, a sua volta, una limitazione degli innalzamenti termici e consente una più efficiente conversione dell’energia radiante in energia elettrica, condizione che beneficia la componente energetica rispetto a quella agricola. Si crea pertanto una condizione di “mutuo” appoggio o beneficio che definisce i termini di un rapporto che potremmo definire, solo per analogia, “simbiotico”.

**Box 1. Il concetto di Land Equivalent ratio (LER)**

Il LER è un concetto elaborato in ambito agronomico che descrive la frazione relativa della superficie agricola richiesta dalle coltivazioni in monocultura affinché forniscano la stessa produzione delle medesime colture ma realizzate in consociazione fra loro. Ne caso più semplice di due sole specie coltivate, il LER è il risultato della seguente formula:

$$LER = \frac{Y_{acons}}{Y_{a\text{mono}}} + \frac{Y_{bcons}}{Y_{b\text{mono}}}$$

Dove i pedici *a* e *b* indicano due ipotetiche coltivazioni agrarie, i termini “*mono*” e “*cons*” indicano, rispettivamente, la condizione monocolturale o quella consociata.



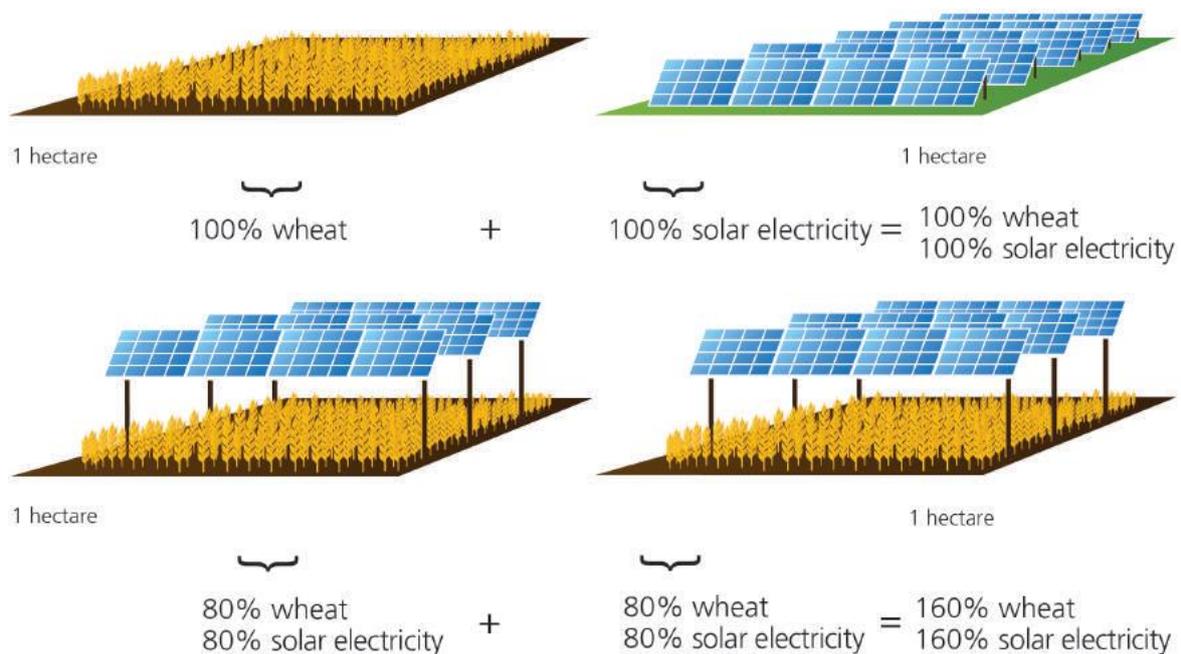
**Figura 3.** Applicazione dell’indice LER (land equivalent ratio) al caso di una consociazione fra due coltivazioni agrarie, frumento e frutteto (riprodotto da Wikipedia).

Nel caso riportato in *Figura 3* (tratto da Wikipedia), la produzione unitaria (cioè ad ettaro) del cereale in consociazione è l’80 % di quella in coltura singola (monocultura); corrispondentemente, la produzione unitaria di frutti in consociazione è pari al 60 % di quella in coltura singola. Questo vuol dire che in condizioni consociate la produzione complessiva dei due beni alimentari risulterà pari al 40 % in più (LER = 0,8 + 0,6 = 1,4) rispetto alle rispettive condizioni monocolturali.

## IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”: UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

I valori di LER ottenuti tramite l'impiego di modelli avanzati di simulazione di sistemi agrovoltaiici sono risultati molto elevati, raggiungendo livelli mai riportati in letteratura e nemmeno prevedibili per sistemi colturali misti (sistemi consociati) o per sistemi agroforestali. Valori di LER fino a 1,7 ottenuti realizzando queste simulazioni sono davvero rimarchevoli. Un LER così elevato significherebbe che un'azienda agricola che investisse 100 ettari in un sistema agrovoltaiico produrrebbe la stessa quantità di elettricità e di produzione agricola solo investendo complessivi 170 ettari in condizione di separazione dei due processi. Pertanto, questi risultati forniscono indicazioni sorprendentemente incoraggianti, suggerendo che sarebbe molto efficiente ottenere sia elettricità che produzioni vegetali sulla stessa unità di colturale.

La figura riportata di seguito (*Figura 4*) fornisce una rappresentazione abbastanza esplicita dei vantaggi che si verrebbero a determinare confrontando un assetto a processi separati rispetto ad un assetto che prevedesse i due processi integrati secondo il modello agrovoltaiico.



**Figura 4.** A) Impiego separato e distinto, agricolo e fotovoltaico, di due ettari di superficie; B) Utilizzo congiunto ed integrato, agricolo e fotovoltaico, di due ettari di superficie. In questo esempio, l'efficienza produttiva aumenta del 60 %

### Agrovoltaiico secondo i migliori crismi agronomici ed ambientali

L'agricoltura praticata in “connubio” con il fotovoltaico (nella soluzione definita “agrovoltaiica”) consentirebbe di porre in essere le migliori tecniche agronomiche e di sperimentarne di nuove, per conseguire un significativo risparmio emissivo di gas clima-alteranti, incamerare sostanza organica nel suolo e pertanto sequestrare carbonio atmosferico, adottare metodi “integrati” di controllo dei patogeni, degli insetti dannosi e delle infestanti, valorizzare al massimo le possibilità d'includere in azienda aree d'interesse ecologico (“*ecological focus areas*”), così come indicato dalle misure del “greening” previsto dalla PAC; quale strumento vincolante della “condizionalità” (“primo pilastro”). Ciò si potrebbe realizzare, ad esempio, creando fasce inerbite a copertura del suolo collocate immediatamente al disotto dei pannelli fotovoltaici, parte integrante di un sistema di rete ecologica

## IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”: UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

opportunamente progettato ed idoneo a favorire la biodiversità e la connettività ecosistemica a scala di campo e a livello territoriale.

La disponibilità energetica da fonte fotovoltaica che si rende disponibile direttamente in campo consentirebbe di rendere autonomi (per lo meno parzialmente) i consumi energetici aziendali. Per esempio, renderebbe possibile (senza costi aggiuntivi) azionare i motori delle macchine e delle attrezzature impiegate nell'esecuzione degli interventi colturali (in particolare, il parco macchine aziendale potrebbe essere integralmente convertito all'alimentazione elettrica) od attivare le pompe per l'attingimento e l'erogazione in campo dell'acqua irrigua, alimentare tutti i sistemi di controllo e gestione automatica che presiedono al compimento degli interventi colturali, ecc.

Per fare un ulteriore esempio, di grande rilevanza tecnico-economica, la disponibilità energetica conseguente al modello agrovoltaico consentirebbe il riscaldamento dell'acqua impiegata in sub-irrigazione ad una temperatura idonea ad accelerare l'accrescimento degli ortaggi, ciò al fine di conseguire una precoce raccolta ed una commercializzazione anticipata del prodotto, in un periodo dell'anno in cui i prezzi vigenti sul mercato sono altamente remunerativi, in assenza di un'offerta competitiva del medesimo prodotto.

Queste condizioni di vantaggio produttivo e commerciale da parte degli imprenditori agricoli determinano le circostanze più opportune per una qualificazione tecnologica sempre più spinta della gestione aziendale, venendo favorita l'implementazione di nuove tecnologie improntate sull'automazione, il *remote control*, l'applicazione di sistemi esperti in grado di promuovere l'adozione di tecniche di agricoltura di precisione ed il conseguimento di livelli di altissima efficienza nell'impiego dei fattori produttivi, così riducendo gli sprechi ed i rilasci ambientali più inquinanti.

Si porrebbero dunque le condizioni per una piena realizzazione del modello “agro-energetico”, capace d'integrare la produzione di energia rinnovabile con la pratica di un'agricoltura innovativa, condotta secondo il regime “integrato” o addirittura quello “biologico”, conservativa delle risorse del suolo, rispettosa della qualità delle acque e dell'aria, in grado di conseguire ottimi risultati produttivi e commerciali. Tale modello innovativo vedrebbe pienamente il fotovoltaico come un'efficace strumento d'integrazione del reddito agricolo capace di esercitare un'azione “volano” nello sviluppo del settore orto-frutticolo.

In particolare, la proposta agrovoltaica evidenzia i seguenti effetti virtuosi:

- Mantenimento della vocazione agricola dei terreni: i terreni continuerebbero ad essere impiegati per finalità agricole senza soggiacere ad impropri ed inopportuni cambiamenti di destinazione.
- Introduzioni delle “*best practice*” agronomiche: implementazione delle più innovative tecniche di gestione del campo coltivato, sia con riferimento agli aspetti agronomici che a quelli di tipo ecologico-ambientale. Adozione del regime di coltivazione “biologico” (“organic farming”).
- Integrazione, diversificazione e stabilizzazione del reddito agricolo: il fotovoltaico non sostituisce l'attività agricola nei siti interessati all'installazione agrovoltaica, ma ne incrementa significativamente la redditività. E' questa una chiara manifestazione della “multifunzionalità” di questo modello di agricoltura.

## I fondamenti della proposta “agrovoltaica”: parametri tecnici e culturali

L'idea di procedere ad un'integrare tra i pannelli solari e le colture agrarie, entrambe ad insistere su di una medesima superficie di suolo, è stata presa in considerazione per la prima volta già nei primi anni '80 del secolo scorso. Uno dei pionieri dell'approccio a duplice uso è stato il fondatore del Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE di Friburgo, in Germania, che ha iniziato a valutare la possibilità di un doppio impiego della radiazione solare. La prima pubblicazione scientifica in merito a questa possibilità è quella a firma di Goetzberger e Zastrow (1982). Questa proposta andava a scardinare un convincimento assai diffuso, ed assunto per appurato, ovvero che la presenza dei pannelli fotovoltaici disposti a copertura di un suolo agrario avrebbe irrimediabilmente precluso qualsiasi uso agricolo del suolo medesimo. In effetti, prima di questo studio del 1982 la presenza dei pannelli solari “a terra” si limitava alle aree aride (dove la crescita vegetale era di fatto impedita) e la possibilità che delle colture agrarie potessero svilupparsi al disotto dei pannelli era considerata priva di fondamento.

Questa proposta è rimasta disattesa per lunghi anni mentre un'altra modalità di “ibridazione” ha preso piede, quella delle “serre fotovoltaiche”. Si tratta di sistemi fotovoltaici progettati per combinare la produzione di energia fotovoltaica con le colture agrarie nell'ambito di una installazione serra. Si tratta di una strategia finalizzata al risparmio energetico (Cuce et al., 2016) o per integrare i redditi degli agricoltori (Sgroi et al., 2014). Le serre fotovoltaiche sono molto diffuse nell'Europa meridionale (Cossu et al., 2014) ed hanno visto una rapida espansione anche in Cina (Li, 2017). Le tariffe incentivanti ed i sussidi di cui ha goduto il fotovoltaico negli anni passati ha contribuito non poco alla diffusione di questa tecnologia.

Al contrario, pochi sistemi fotovoltaici sono stati realizzati per superare la competizione tra produzione di energia da fonti rinnovabili e produzione agricola in condizioni di campo aperto, secondo l'indirizzo originariamente proposto da Goetzberger e Zastrow (1982). Solo negli ultimi anni, in virtù delle le drastiche riduzioni dei costi connessi alla tecnologia fotovoltaica e con il conseguimento della “grid parity”, questa particolare applicazione è divenuta un'opzione realistica, come dimostrato dai primi progetti agrovoltaici realizzati in numerosi paesi.

### L'impostazione agrovoltaica: la disposizione spaziale dei moduli

Goetzberger e Zastrow (1982) hanno sostenuto la validità di questa opzione “*double use*” sviluppando un sistema in cui i pannelli solari e le colture agrarie insistono sulla medesima area. Questo sistema è basato su alcuni semplici postulati affinché, secondo gli autori, possa conseguire i risultati giudicati migliori; verifichiamoli schematicamente:

- L'orientamento dei pannelli fotovoltaici deve avvenire in direzione Sud (ovviamente nell'emisfero settentrionale) e la loro inclinazione approssimarsi ad un angolo uguale alla latitudine geografica del luogo in cui sorge l'impianto.
- I pannelli o i “filari” dei moduli solari devono essere adeguatamente distanziati fra loro per evitare un eccessivo ombreggiamento del suolo. In generale, viene consigliata una distanza pari ad almeno 3 volte l'altezza a cui sono collocati i pannelli medesimi.
- Portando i pannelli ad un'altezza ragguardevole (4-5 m) vi sarebbe spazio adeguato perché le colture non vengano ostacolate nel loro accrescimento dalla presenza dei pannelli, anche al di

## IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”: UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

sotto degli essi. Inoltre, una tale altezza consentirebbe l'ordinario utilizzo delle macchine e delle attrezzature agricole per lo svolgimento delle operazioni colturali.

- La collocazione in altezza dei moduli fotovoltaici consentirebbe, inoltre, la penetrazione di una sufficiente quantità di luce. In particolare, la proiezione dell'ombra dei pannelli al suolo sarà più uniformemente distribuita (ossia le condizioni radiative saranno più omogenee) di quanto non si realizzerebbe, invece, con pannelli assai prossimi al suolo, i quali proietterebbero la loro ombra su di un'area assai più ristretta (generando così condizioni assai disomogenee di illuminazione al suolo).



*Figura 5. Apprestamento agrovoltaico presso lo Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), Freiburg, Germany.*

Sono questi, in “pillole”, i caratteri fondamentali della soluzione “agrovoltaica” così come proposta in origine. La conclusione di questa prima valutazione teorica condotta da Goetzberger e Zastrow (1982) fu che in un sistema così strutturato circa i 2/3 della radiazione solare sarebbero ancora disponibili per la crescita delle colture agrarie sottostanti ai pannelli. Ciò avverrebbe anche nel caso in cui la disposizione spaziale dei moduli solari fosse ottimizzata per massimizzare l'intercettazione radiativa da destinare alla produzione elettrica. Gli autori, inoltre, dimostrano che questa radiazione si distribuisce abbastanza uniformemente durante il giorno in modo da consentire una crescita omogenea delle colture agrarie. La conclusione, pertanto, suggerisce che l'intensità radiante pervenuta al suolo sarebbe sufficiente a consentire non solo un idoneo accrescimento, ma anche un'adeguata produzione nei riguardi di un'ampia gamma di specie coltivate.

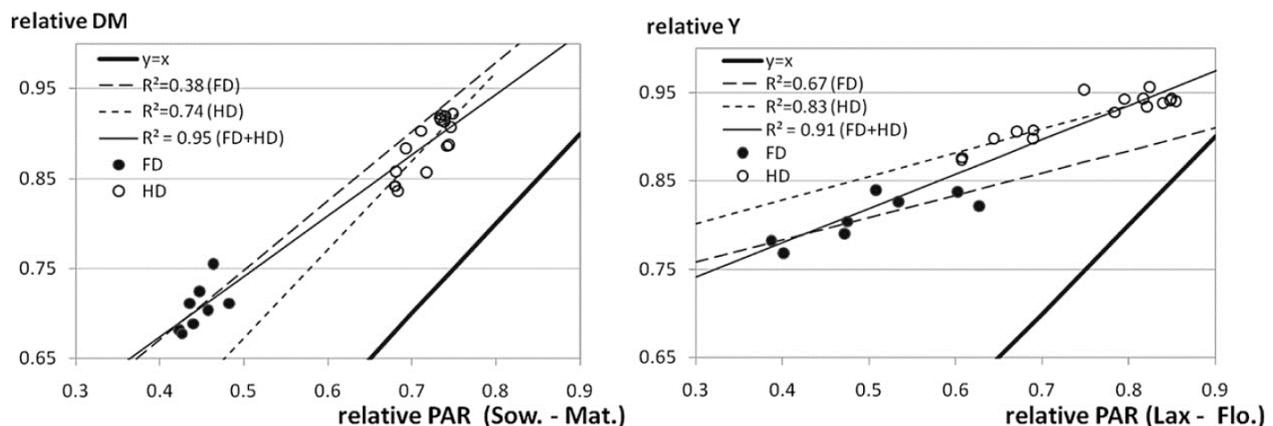
Successivamente, con l'installazione dei primi impianti fotovoltaici montati “a terra”, si ottennero prove evidenti circa la fattibilità di questo approccio “double use”, semplicemente osservando l'abbondante crescita di erbe infestanti che si determina anche al di sotto dei pannelli, a riprova del

fatto che quella stessa vegetazione spontanea dovesse essere gestita a mezzo di trattamenti di diserbo chimico (quindi causando costi aggiuntivi di manutenzione ed inquinamento ambientale).

Un sistema sperimentale che combinava pannelli fotovoltaici statici, installati a 4 m di altezza, con coltivazioni al suolo sotto i pannelli viene poi descritto, quasi 20 anni dopo, da Dupraz et al. (2011a) e in Marrou et al. (2013c). Anche questi sistemi, come quelli precedenti, si basano sul concetto che un parziale ombreggiamento può essere tollerabile per le colture agrarie, tale da non inficiarne gravemente le potenzialità produttive. Questa condizione di apparente vantaggio potrebbe perfino ridurre il consumo di acqua per evapotraspirazione durante l'estate o in condizioni siccitose (Dinesh e Pearce, 2016).

Per questa "ibridazione" sono state utilizzate diverse formule terminologiche: "double use" e "agrophotovoltaics" nel contesto di ricerca tedesco, "agrivoltaic" o "agrovoltaic" nel contesto di ricerca francese ed statunitense, "photovoltaic agriculture" nel contesto cinese, e "solar sharing" in quello giapponese.

Pertanto, ai fini di questo studio, la proposta agrovoltaica può essere così definita: **"generazione di energia e produzione agricola deliberatamente combinate sulla stessa unità di suolo"**. Ciò consente di ridurre i conflitti competitivi per l'uso del suolo e di ottenere benefici economici aggiuntivi rispetto all'impiego esclusivo di entrambe le applicazioni.



**Figura 6.** Simulazione della biomassa (DM: dry matter) e della produzione (Y: yield) del grano duro così come stimato dal modello STICS in condizioni "agrovoltaiche" in funzione della quantità di radiazione luminosa intercettata dalla coltura (PAR: photosintetic active radiation). I valori riportati sugli assi sono espressi in termini relativi, ovvero rispetto al valore di riferimento (cioè la biomassa e la produzione della coltura ottenuta senza copertura fotovoltaica, così come la quantità di radiazione rilevata senza copertura fotovoltaica). Con riferimento alla biomassa (DM), la radiazione è integrata lungo tutto il ciclo colturale, dalla semina (Sow) alla maturazione (Mat). Per la produzione in granella (Y), la radiazione è integrata lungo le 3 settimane che precedono la fioritura, dal momento (Lax) in cui la coltura perviene al massimo LAI (leaf area index), fino alla fioritura (Flo). La valutazione è stata condotta considerando due differenti disposizioni dei moduli solari, rispettivamente moduli a piena densità (FD: full density) e moduli a metà densità (HD: half density). Tutti i dati ottenuti dalla simulazione così come le relative rette di regressione si collocano ben al di là della retta 1:1 (segno nero in grassetto) ad indicare il vantaggio della soluzione agrovoltaica e la proporzionalità diretta della produzione rispetto alla quantità di radiazione intercettata. Grafico tratto da Dupraz et al. (2011a).

## IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”: UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

In altri termini, si ottengono doppi ricavi, considerando che la produzione agricola evidenzia livelli produttivi solo di poco inferiori rispetto a quelli potenzialmente attesi. Le perdite produttive risulterebbero comunque meno che proporzionali rispetto al decremento radiativo determinatosi per la presenza dei pannelli che intercettano la radiazione solare incidente (*Figura 6*).



*Figura 6. Sistema agrovoltaico realizzato su di un impianto di vite.*

### La componente fotovoltaica: condizioni radiative dell’agrovoltaico

Descriviamo, in termini qualitativi, le condizioni radiative che si vengono a determinare al suolo in conseguenza della realizzazione di un sistema agrovoltaico.

Del tutto ovvia la considerazione che tanto maggiore è la distanza fra i pannelli (o fra i filari dei pannelli) tanto minore è l’ombreggiamento della superficie del suolo, ciò che avvantaggia la crescita delle colture agrarie e, pertanto, la loro produttività.

La **distanza fra le fila dei pannelli** deve essere comunque adeguata per consentire il passaggio delle macchine e delle attrezzature agricole. Considerando i trattori, la loro omologazione prevede dimensioni che possono raggiungere una larghezza di 2,55 m ed un’altezza di 4,00 m. Ne consegue che la distanza fra due vele adiacenti di pannelli PV deve essere di almeno 3,00 metri od un multiplo di tale valore modulare. Ovviamente, il numero di filari di piante che troverà spazio fra le due vele di pannelli PV dipenderà dalla dimensione dell’interfilare, anch’esso un dato modulare (ovvero che si ripete regolarmente nello spazio) caratteristico della specie coltivata.

Lo spazio tra le vele dei moduli PV differisce da progetto a progetto ed è in realtà un parametro chiave della configurazione agrovoltaica. Dipende, in gran parte, dalla tolleranza all’ombra delle colture che crescono al di sotto. I progetti pilota e i siti di test di solito sperimentano rapporti di ombreggiamento diversi creati da densità diverse dei moduli solari (si veda il confronto FD ed HD riportato in *Figura 6*).

Pannelli dislocati ad un’altezza superiore ai 4 metri (per esempio 4,5-5,0 metri) consentono il passaggio delle macchine agricole al disotto e, pertanto, permettono un’occupazione continua del suolo agrario da parte delle coltivazioni. All’aumentare dell’altezza a cui sono collocati i pannelli, aumenta la superficie interessata alla proiezione spaziale dell’ombra. Questo, di primo acchito, può sembrare un fattore negativo, ma occorre considerare che in questo modo, nel corso della giornata, ovvero tenendo conto del percorso apparente del sole al di sopra dell’orizzonte, l’ombra si

distribuisce su di una superficie del suolo notevolmente più ampia per cui il livello di ombreggiamento che ne consegue, in termini di media giornaliera, risulta aumentato, ma decisamente superiore è il grado di omogeneità delle condizioni radiative sulla superficie del campo, ciò che avvantaggia la produzione agraria. Altrettanto può dirsi in relazione alla latitudine del luogo. La provenienza più inclinata dei raggi del sole proiettano ombre più lunghe dunque un livello di ombreggiamento più omogeneamente distribuito.

Un fattore non del tutto trascurabile, inoltre, è che le condizioni di penombra risultano aumentare con l'altezza a cui è posto l'ostacolo luminoso che, intercettando la luce, proietta al suolo la sua ombra.

Altro elemento progettuale di grande importanza è l'**orientamento delle vele e l'inclinazione dei pannelli PV** portati su di esse. Le prime ricerche sull'agrovoltaico si sono limitate a considerare condizioni in cui i pannelli sono di tipo fisso (Marrou et al., 2013c); più recentemente sono cominciate a comparire valutazioni in merito a sistemi FV mobili ad 1 asse (Valle et al. 2017); oggi anche i sistemi mobili a due assi sono entrati nel novero delle analisi e delle valutazioni sperimentali. Queste diverse configurazioni necessitano di una spiegazione più approfondita, come di seguito riportato.

I moduli fotovoltaici possono essere montati sulla struttura che li sorregge in modo rigido avendo quindi orientamento ed inclinazione prestabilite e fisse. Diversamente, possono essere moduli ad inseguimento solare, il che vuol dire che il loro orientamento e la loro inclinazione può variare nel corso delle ore del giorno in relazione alla posizione del sole sull'orizzonte, in modo da rivolgere la propria superficie il più possibile in modo perpendicolare alla direzione di arrivo dei raggi solari. Possiamo quindi distinguere un singolo asse di rotazione (quello di orientamento del modulo rispetto alla direzione del sole) od un doppio asse di rotazione (in cui varia anche l'inclinazione del modulo rispetto all'altezza del sole).

Se i sistemi “*sun tracking*” (ossia ad inseguimento) sono in grado d'intercettare una maggiore quantità di radiazione solare rispetto ai sistemi fissi, ciò implica che essi determineranno anche un maggior ombreggiamento della coltura e che, di conseguenza, potrebbero provocare un effetto più marcato nel rallentare la crescita delle colture agrarie sottostanti e, di conseguenza, la loro produzione. I sistemi ad inseguimento a singolo asse di rotazione si riscontrano, generalmente, nelle aree geografiche più prossime all'equatore, mentre il tracciamento a doppio asse è dato osservarlo in particolare nelle regioni più lontane dall'equatore.

Le analisi di modellizzazione hanno dimostrato che la produzione in un sistema agrivoltaico può essere ottimizzata modificando l'architettura dei pannelli (Dinesh e Pearce, 2016; Valle et al. 2017) e la produttività delle colture può essere stimolata regolando l'inclinazione del pannello durante il ciclo colturale (Valle et al. 2017). Se è vero che, di norma, l'orientamento giudicato ottimale dei pannelli è quello che consente la maggiore intercettazione radiativa possibile, allorché si faccia riferimento ad un sistema “agrovoltaico” è possibile però definire condizioni che avvantaggino l'una o l'altra componente (ossia la produzione energetica o quella vegetale) ovvero stabilire condizioni di *trade-off* ritenute le più opportune. Un passo avanti sarebbe quindi quello di installare pannelli fotovoltaici in grado di orientarsi in modo regolabile al fine di massimizzare la produzione di energia o, viceversa, la produzione vegetale, ovvero di ottimizzare il sistema nel suo complesso (Valle et al. 2017).

## IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”: UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

Dunque, il controllo dinamico della direzione e dell'inclinazione del modulo nei sistemi ad inseguimento può essere utilizzato per:

- a) aumentare la resa solare del sistema (più kWh generati per kWp installati);
- b) aumentare, viceversa, la quantità di luce solare in grado di raggiungere le colture o determinare un ombreggiamento più omogeneo e diffuso al livello del suolo, a beneficio dell'umidità del suolo e del microclima che si determina nel manto vegetale che il suolo ricopre.
- c) impostare una possibile condizione intermedia fra le due precedenti.

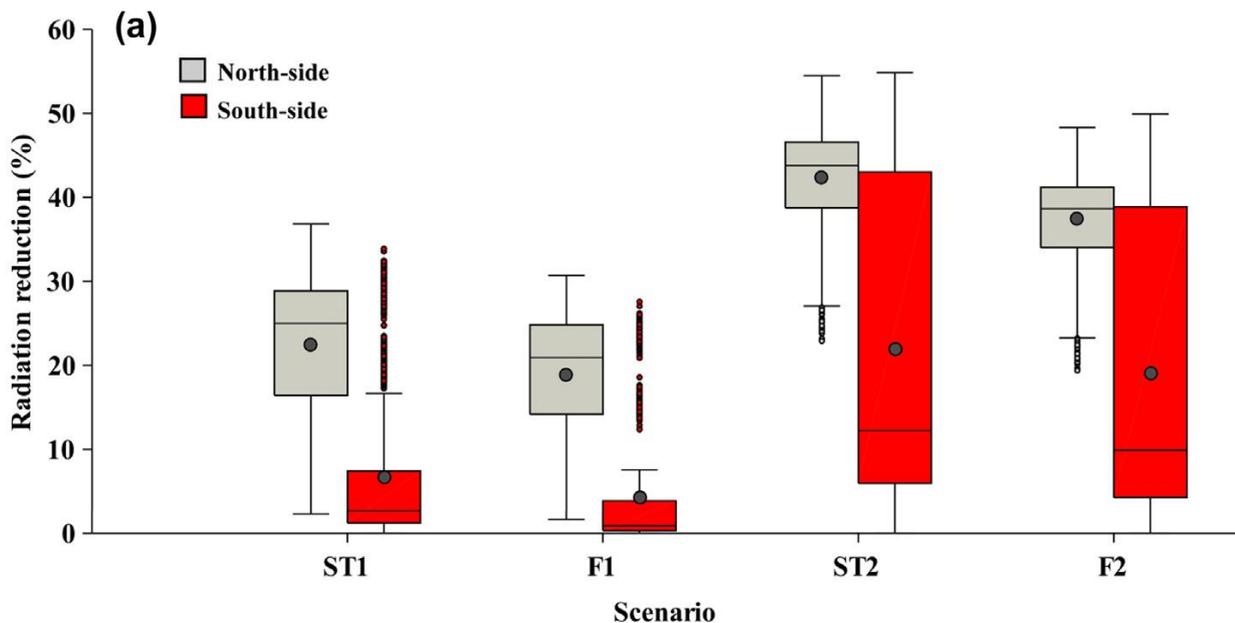
Le tre possibili configurazioni potrebbero anche variare nel corso del ciclo colturale in base a specifiche esigenze. Ad esempio, in fasi fenologiche ritenute critiche, allegagione dei frutti o maturazione, si potrebbe ritenere opportuno incrementare l'apporto radiativo al livello della coltura, mentre nelle fasi di semplice accrescimento vegetativo potrebbe risultare più vantaggioso favorire l'intercettazione radiativa da parte dei pannelli e quindi incrementare la produzione elettrica.

L'esperienza iniziale con questi sistemi ad inseguimento ha dimostrato che può essere utile per alcune colture consentire un maggior afflusso di luce solare nelle prime fasi di crescita delle piante, allorché la sensibilità all'ombreggiamento è maggiore rispetto alle fasi successive del loro ciclo ontogenetico. Le esigenze di luce solare nel corso delle diverse fasi del ciclo variano da coltura a coltura e l'adeguata distribuzione della luce solare, o dell'ombreggiamento, durante il ciclo di coltivazione richiede un attento monitoraggio.



**Figura 7.** Sistema agrovoltaico ad inseguimento, dotato di doppio asse di rotazione, realizzato dalla “Rem Tec” ed installato in Italia, Monticelli D’Ongina (PC).  
Riferimenti: Praderio e Perego (2017), Rem Tec (2017).

La valutazione condotta da Amaducci et al. (2018), ancora una volta tramite una simulazione modellistica, ha consentito di svolgere alcune importanti verifiche. Il sistema agrovoltaico adottato nella simulazione è della tipologia illustrata in *Figura 7*. Sono stati messi a confronto due differenti disposizioni dei pannelli fotovoltaici, lo *Scenario 1* con pannelli a disposizione singola, più rada; lo *scenario 2* con pannelli a disposizione doppia, più compatta. Inoltre, le configurazioni saggiate sono le seguenti: gestione con pannelli statici (F: *fixed*); gestione con pannelli ad inseguimento (ST: *sun tracking*). La combinazione fattoriale delle due variabili sperimentali fornisce le seguenti quattro possibilità di trattamento: F1, F2, ST1, ST2. I medesimi codici sono riportati in *Figura 8*.



**Figura 8.** Valori percentuali di riduzione dell'intensità radiativa in relazione ai trattamenti sperimentali saggiati (F1, F2, ST1, ST2) ed alla esposizione (lato Nord e lato Sud)  
Grafico tratto da Amaducci et al. (2018).

La riduzione della radiazione globale è stata maggiormente influenzata dall'area dei pannelli solari (Scenario 1 vs Scenario 2) piuttosto che dalla modalità di gestione dei pannelli (F vs ST). Durante il periodo di simulazione, la riduzione media delle radiazioni è stata del 12,1%, 14,6%, 27,9% e 31,8% rispettivamente in F1, ST1, F2 ed ST2. Il valore medio di riduzione radiativa, così come la variabilità spaziale e temporale del dato, sono di gran lunga superiori con riferimento ai pannelli “doppi” rispetto ai pannelli “singoli”. L'inseguimento solare (ST) accentua, ma di poco, questa variabilità (*Figura 8*). In particolare, dividendo l'area di studio in due parti, si è notato che l'area a sud dell'asse lungo il quale i moduli FV sono dislocati si contraddistingue per la più alta frequenza di pixel con una bassa riduzione della radiazione globale, mentre il contrario si riscontra per l'area a nord (*Figura 8*). Pertanto è possibile affermare che la riduzione della radiazione è massima nel lato nord rispetto al lato sud. Inoltre, la gestione dell'orientamento dei moduli fotovoltaici sembra avere un effetto assai più contenuto sulla radiazione disponibile per le colture e per la loro crescita rispetto alla densità dei moduli (Amaducci et al., 2018).

Sperimentazione analoga è stata realizzata anche da Miskin et al. (2019) considerando pannelli posizionati a 5 metri di altezza da terra. Anche in questo caso, sono stati confrontati due differenti livelli di densità spaziale dei moduli FV (l'uno prevede 3,81 m di distanza fra le fila adiacenti di pannelli; l'altro raddoppia questa distanza a 7,62 metri). Due differenti modalità di gestione dei

## IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”: UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

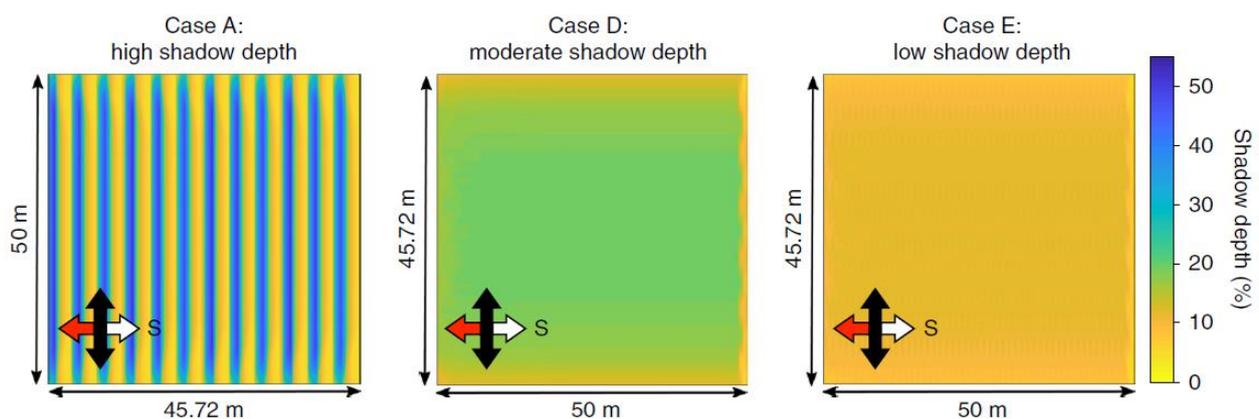
pannelli (pannelli statici e pannelli ad inseguimento, rispettivamente). In ultimo, si è anche confrontato un modulo fotovoltaico continuo rispetto ad un modulo a “scacchiera” (“chequered”). In quest’ultima tipologia nel modulo sono presenti piccoli riquadri che non intercettano la luce ma la lasciano trasmettere.

La *Tabella 2* riporta i risultati riguardo all’entità della riduzione della radiazione che perviene al suolo (indicata come “*shadow depth*” ed espressa in termini percentuali) così come la variabilità spaziale e temporale di questo dato.

**Tabella 2.** Valori percentuali di riduzione dell’intensità radiativa in relazione ai trattamenti sperimentali. Dati tratti da Miskin et al. (2019).

Configuration	Panel design	Row spacing (m)	Average shadow depth (%)	Shadow depth s.d. (%)	Land with less than 25% shadow depth (%)	
A	South facing	Continuous	3.81	35.2	15.2	41.0
B	South facing	Chequered	3.81	17.6	7.6	74.7
C	East-west tracking	Continuous	3.81	31.5	0.6	0
D	East-west tracking	Continuous	7.62	21.4	0.6	100.0
E	East-west tracking	Chequered	7.62	11.5	1.1	100.0

La *Tabella 2* elenca la *profondità media dell’ombra*, la sua deviazione standard e la percentuale di superficie al suolo con meno del 25% di riduzione radiativa per le diverse configurazioni messe a confronto. I dati ottenuti dalla simulazione confermano quanto precedentemente riferito, ovvero che la distanza fra i “filari” dei moduli FV (3,81 vs 7,62) è fattore ampiamente più rilevante della modalità di gestione dei moduli (*fixed vs sun tracking*). Per il caso A, la profondità media dell’ombra è del 35,2%, l’omogeneità è bassa (15% deviazione standard) e solo il 41% della superficie al suolo manifesta una riduzione radiativa inferiore al 25%, il che indica che più della metà della superficie al suolo sarà in ombra piena se viene applicato un regolare schema di installazione fotovoltaica esposto rigidamente a sud.



**Figura 9.** Mappature dell’attenuazione percentuale della radiazione globale al suolo con riferimento ai casi A, D ed E così come riportati in *Tabella 2*. Immagine tratta da Miskin et al. (2019).

La *Figura 9*, caso A, evidenzia inoltre la presenza di fasce ad elevata riduzione radiativa (anche superiori al 40%) che è dato riscontrare nella simulazione ottenuta, condizione che interessa più del

20% della superficie complessiva. Si tratta, quindi, della condizione meno favorevole all'accrescimento delle colture fra tutte le configurazioni saggiate. Il caso C, prende in considerazione pannelli ad inseguimento posti, come nel caso A, ad una limitata distanza tra le file. Sebbene i valori di riduzione radiativa siano lievemente inferiori rispetto al caso A, preoccupa particolarmente il fatto che nessuna porzione della superficie del suolo si contraddistingua per una riduzione radiativa inferiore al 25%. In entrambi i casi, sia A che C, si dimostra che i normali parchi fotovoltaici non dovrebbero essere presi a modello allorché si fosse interessati a realizzare coltivazioni agricole al di sotto dei pannelli.

Occorre quindi applicare distanze fra le file dei moduli FV almeno doppie rispetto alle precedenti, come appunto si verifica nel caso D ed E. Con riferimento al caso D, la riduzione radiativa è molto più contenuta (21,4%), la distribuzione radiativa è assai omogenea (deviazione standard 0,6%) e, soprattutto, tutta la superficie al suolo non manifesta alcuna presenza di spot con riduzioni radiative superiori al 25%. La condizione di elevata omogeneità spaziale della radiazione è verificabile dalla osservazione della *Figura 9*, caso D. Si tratta quindi di condizioni che ben si conciliano con la possibilità di svolgere una ordinaria attività agricola al disotto dei pannelli solari.

I casi B ed E, infine, si riferiscono della particolare tipologia di pannello che si è definito “a scacchiera”. Come era da attendersi, questa tipologia di modulo aumenta significativamente la penetrazione della radiazione al suolo, contribuendo a migliorare ulteriormente la omogenea distribuzione dell'ombra che, però, risulta notevolmente attenuata. Il sensibile miglioramento ottenuto è facilmente visibile in *Figura 9*, caso E.

### La componente agraria: interpretazione del vantaggio attribuito all'agrovoltaico

Vi è un'ampia variabilità di specie agrarie che possono essere impiegate in un sistema agrovoltaico. Generalmente le piante a metabolismo fotosintetico C3 si adattano meglio alle condizioni di ombra rispetto alle piante C4 (Campillo et al. 2012; Greer et al. 2012; Barber et al. 1992; Leopold, 1964). Le varietà vegetali tolleranti all'ombra (specie dette “sciafile”) possono essere considerate più idonee ai sistemi agrovoltaici rispetto alle piante che prediligono il soleggiamento (specie dette “eliofile”) e per questo in grado di fornire rese più elevate (Marrou et al. 2013b).

Le specie agrarie considerate probabilmente più idonee ad essere inserite nei sistemi “agrovoltaici” sono le seguenti: spinacio, broccolo, fagiolo, pisello, insalata / lattuga, cavolo, asparago, carota, porro, finocchio, sedano, cipolla, cetriolo, zucchino. Tale elencazione è comunque solo indicativa e certamente non esaustiva; inoltre, anche alcune specie ritenute scarsamente idonee a condizioni di ombreggiamento, alla prova dei fatti, ovvero allorché sono state eseguite delle valutazioni sperimentali, hanno poi mostrato produzioni adeguate (come per esempio il mais nel lavoro di Amaducci et al., 2018).

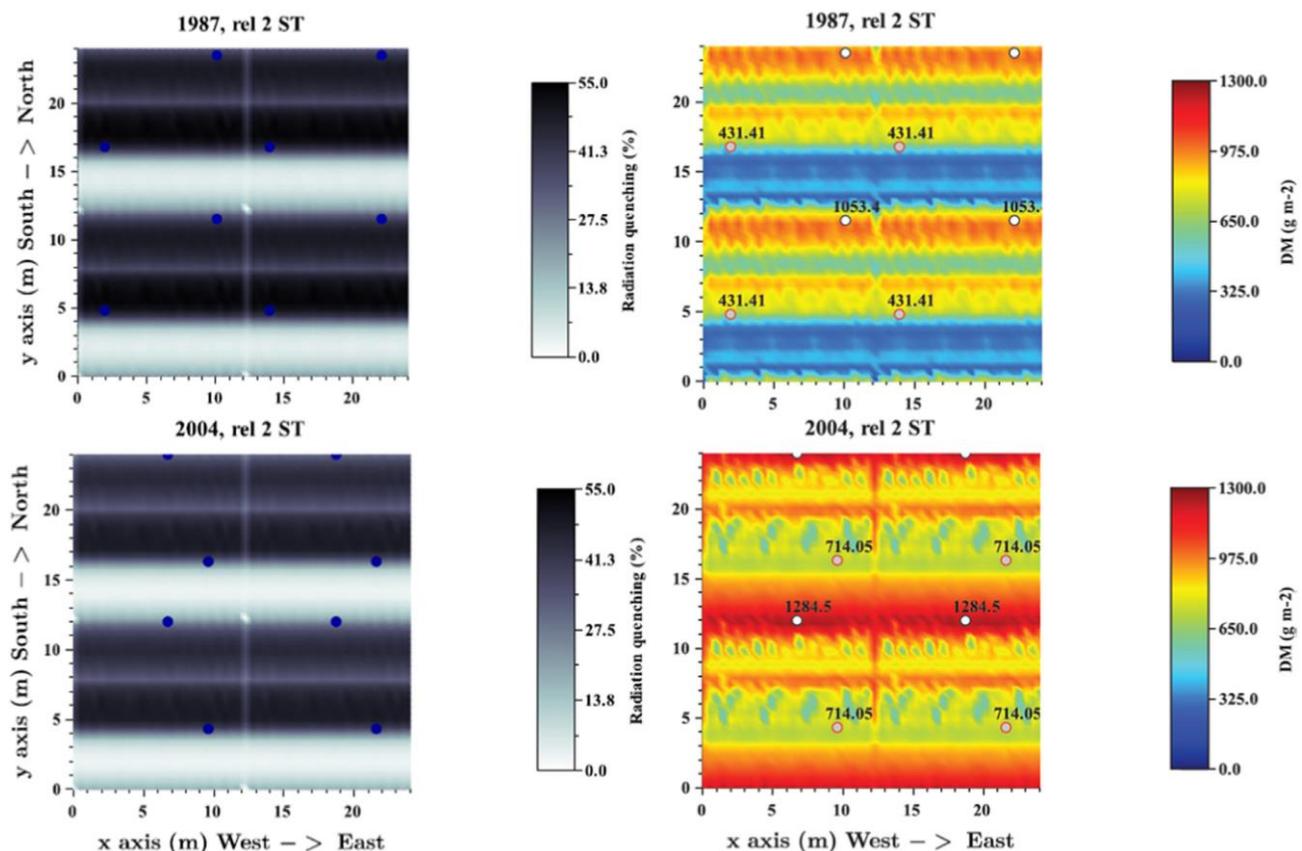
Come confermato da un buon numero di studi, le condizioni di ombreggiamento possono ridurre il diametro dei fusti e l'altezza delle piante (Cantagallo et al. 2004; Worku et al. 2004). Sebbene la maggior parte delle colture agrarie a valenza commerciale non sia mai stata studiata approfonditamente in relazione alle condizioni di ombreggiamento, Dupraz e Marrou hanno lavorato su alcune specie orticole abbastanza diffuse in Europa, come lattuga, cetriolo, fagiolo. Sono state rilevate le rese produttive di queste colture e, in generale, è stata riscontrata una buona risposta, non così distante da quella riferibile a condizioni di regime radiativo normale. Le specie considerate, pertanto, hanno dimostrato la capacità di ambientarsi a livelli d'intensità radiativa inferiori all'ordinario (Marrou et al. 2013c).

## IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”: UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

Si è osservato che una coltura tollerante a condizioni di ombreggiamento, come la lattuga, coltivata al di sotto di pannelli fotovoltaici modifica la sua morfologia, ad esempio producendo foglie di maggior larghezza e di ridotto spessore. Ciò, però, non ne pregiudica l'accrescimento (Dinesh e Pearce, 2016).

È stato inoltre suggerito che i vantaggi mostrati dai sistemi agrovoltaiici siano sostanzialmente analoghi a quelli relativi a sistemi agroforestali (Dupraz et al., 2011). I pannelli fotovoltaici, tra le altre cose, proteggono le colture da un calore eccessivo e favoriscono un'efficace mitigazione della temperatura del suolo (Morrau et al., 2013b), il che potrebbe implicare che i sistemi agrovoltaiici conferiscano una maggiore resistenza agli effetti perturbativi causati dai cambiamenti climatici rispetto ai sistemi di coltivazione ordinari (Dupraz et al., 2011).

L'integrazione del solare fotovoltaico in agricoltura secondo l'approccio agrovoltaiico può essere utile alle colture agrarie in diversi modi. L'ombreggiamento determinato dalla presenza dei moduli fotovoltaici può aiutare a ridurre il flusso evapotraspirativo, soprattutto nei caldi mesi estivi o nel corso delle stagioni a clima sub-arido (nel caso non coincidessero con l'estate). Ciò, a sua volta, favorisce un incremento dell'efficienza d'uso dell'acqua, un accrescimento vegetale meno condizionato dalla carenza idrica, un bilancio radiativo che attenua le temperature massime e minime registrate al suolo e sulla vegetazione. In un contesto climatico europeo, è stato osservato che l'ombreggiamento comporta un risparmio idrico, compreso fra il 14 ed il 29% registrato nelle valutazioni condotte da Marrou et al. (2013a) a seconda del livello di ombreggiamento realizzato.

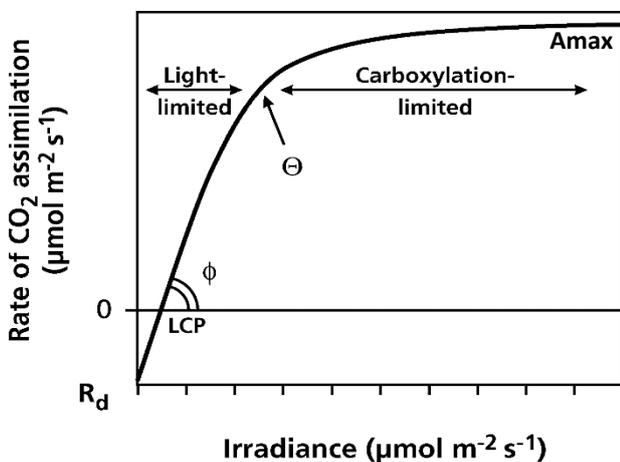


**Figura 10.** Mappe di riduzione stagionale della radiazione in condizioni di pieno campo (%) e produzione in granella del mais ( $\text{g m}^{-2}$ ) in due anni contrastanti, annata siccitosa (1987) ed annata piovosa (2004), rispettivamente, sotto un sistema agrovoltaiico, scenario ST2. Immagine tratta da Amaducci et al. (2018).

Anche il lavoro di Amaducci et al. (2018) conferma quanto appena evidenziato. La riduzione radiativa dovuta all'ombreggiamento ha influenzato la temperatura media del suolo così come l'evapotraspirazione (ET) ed il bilancio idrico. Per tutto il lungo periodo di simulazione (pari a 39 anni), la temperatura media del suolo è sempre stata inferiore nel sistema agrovoltaico rispetto alle condizioni di piena luce (FL: "full light"), con una differenza media di circa 1 °C. Analogamente per l'ET cumulato, i cui valori sono stati inferiori nel sistema agrovoltaico rispetto alle condizioni FL, tranne negli anni molto secchi. L'ET medio per l'intera stagione di crescita è stato inferiore nell'agrovoltaico rispetto alle condizioni FL.

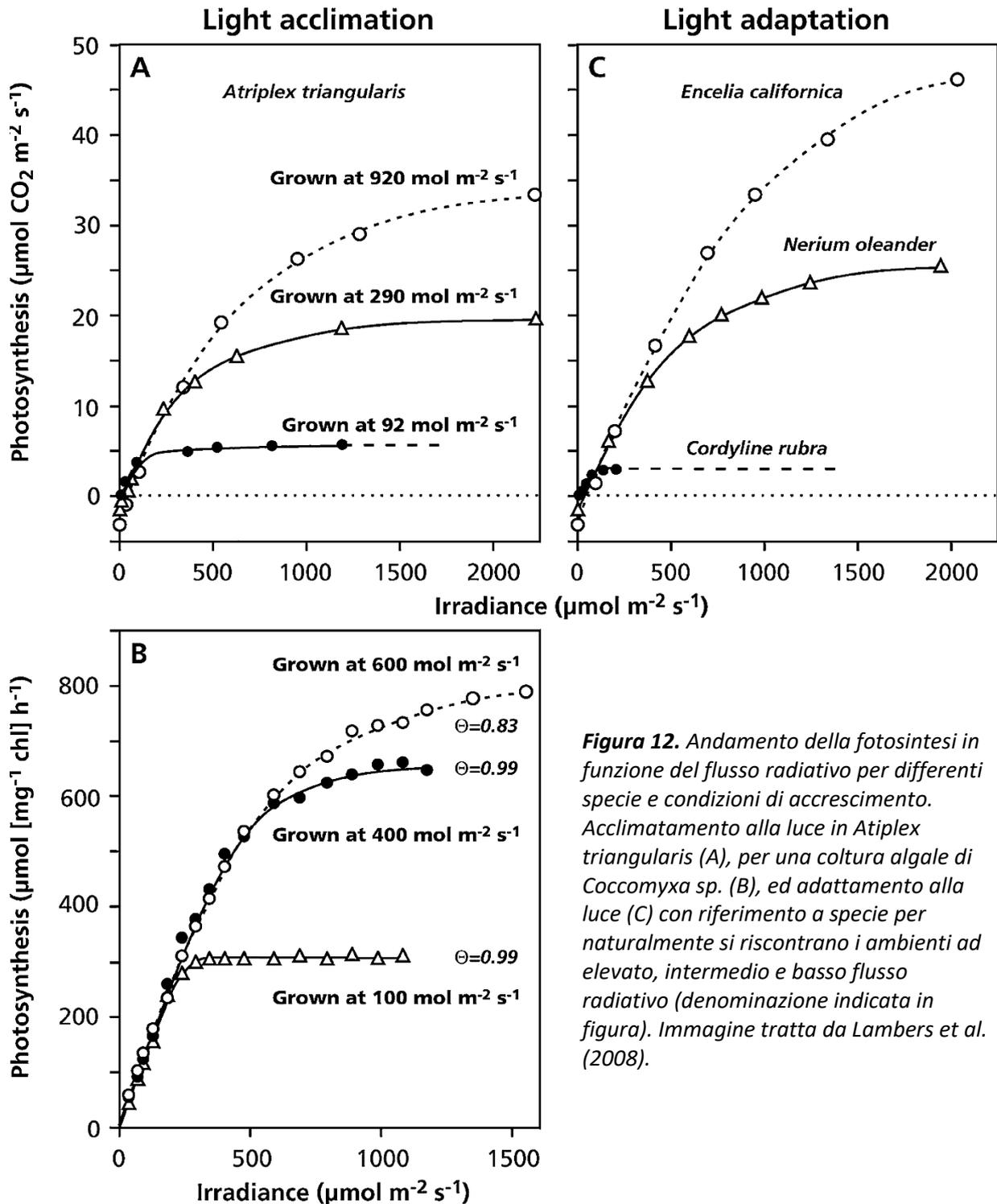
Sono state confrontate le mappe di riduzione delle radiazioni con quelle della resa simulata della granella per due anni nettamente contrastanti, 1987 e 2004 (Figura 10). Si può affermare che le rese più elevate registrate nel piovoso 2004 siano state ottenute nelle aree del campo in cui la radiazione era relativamente alta; diversamente, nel siccitoso 1987 le produzioni più elevate sono state raggiunte nelle aree del campo a radiazione più contenuta. In Figura 10 (riquadro a destra) i punti grigi e bianchi rappresentano le zone in cui si sono conseguite, rispettivamente, le produzioni più basse e più alte considerando una riduzione annuale della radiazione pari al 40–45% nel 1987 ed al 25-30% nel 2004. Come già notato in precedenza, le zone "a bassa resa" (punti grigi) si trovano nel lato sud e le zone "a bassa resa" (punti bianchi) si trovano nel lato nord dell'asse di rotazione principale.

Con riferimento al mais, Amaducci et al. (2018) mettono ben in evidenza che il **vantaggio di coltivare le specie agrarie all'ombra del sistema agrovoltaico aumenta proporzionalmente allo stress idrico conseguente ad un decorso siccitoso del ciclo culturale, il che indica che i sistemi agrovoltaici potrebbero aumentare la resilienza delle colture ai cambiamenti climatici.**



**Figura 11.** La tipica risposta della fotosintesi netta ( $A_n$ ) all'irradianza. L'intercetta con l'asse delle ascisse è il punto di compensazione della luce (LCP), la pendenza iniziale della linea fornisce la resa quantica ( $\phi$ ) e l'intercetta con l'asse delle ordinate definisce il tasso di respirazione al buio ( $R_d$ ). La curvatura è descritta da  $\theta$ . A bassa irradianza, il tasso di assimilazione della  $CO_2$  è limitato dalla luce; quanto l'irradianza è elevata,  $A_n$  è limitata dalla carbossilazione (ossia dalla concentrazione della  $CO_2$ ).  $A_{max}$  è il tasso di assimilazione di  $CO_2$  in condizioni di saturazione luminosa. Immagine tratta da Lambers et al. (2008).

Come appare evidente dall'osservazione della Figura 11, il tasso di assimilazione della  $CO_2$  ( $A_n$ ) aumenta all'aumentare dell'intensità radiativa. Al di sotto del punto di compensazione della luce (LCP) il valore di  $A_n$  è inferiore a 0, pertanto l'intensità del flusso radiativo non è sufficiente a compensare la perdita respiratoria di carbonio dovuta alla fotorespirazione e alla respirazione al buio (Figura 11).



**Figura 12.** Andamento della fotosintesi in funzione del flusso radiativo per differenti specie e condizioni di accrescimento. Acclimatamento alla luce in *Atriplex triangularis* (A), per una coltura algale di *Coccomyxa sp.* (B), ed adattamento alla luce (C) con riferimento a specie per naturalmente si riscontrano i ambienti ad elevato, intermedio e basso flusso radiativo (denominazione indicata in figura). Immagine tratta da Lambers et al. (2008).

A basse intensità di luce, *An* aumenta linearmente con l'irraggiamento, ed il tasso fotosintetico è limitato dalla velocità con cui si realizza il trasporto di elettroni guidato dalla flusso luminoso. La pendenza iniziale della curva di risposta alla luce (resa quantica) descrive l'efficienza con cui la luce viene convertita in carbonio fissato (in genere circa 0,06 moli di CO<sub>2</sub> fissata per mole di quanti in condizioni di normale concentrazione della CO<sub>2</sub> in atmosfera). In condizioni di elevato flusso radiativo, la fotosintesi tende a saturarsi ed è limitata dal tasso di carbossilazione, governato dalla

velocità di diffusione della CO<sub>2</sub>. La forma della curva di risposta alla luce può essere descritta in modo soddisfacente da un'iperbole non rettangolare, così come rappresentato in *Figura 12*.

La *Figura 12* illustra che per le piante è possibile invocare due distinti processi di adeguamento alle condizioni di soleggiamento intenso o, al contrario, di prevalente ombreggiamento. Un primo meccanismo è quello definibile “acclimatemento” (*Fig. 12A*) e che costituisce una risposta di adeguamento fisiologico nell'ambito della stessa specie per effetto delle prevalenti condizioni ambientali (di luce ovvero di ombra). Diversamente, il meccanismo di “adattamento” (*Fig. 12B*) è un processo di lunga durata, geneticamente selettivo, che contribuisce a definire differenze interspecifiche divergenti, determinando la progressiva affermazione di specie sciafile o, al contrario, eliofile, in rapporto all'influenza esercitata dall'ambiente.

Le foglie “eliofile” differiscono dalle foglie “sciafile” principalmente per i valori più elevati di *Amax* (*Figura 12*). Il tasso di respirazione al buio in genere varia unitamente ad *Amax*. La pendenza iniziale delle curve di risposta alla luce delle piante acclimatate alla luce e acclimatate all'ombra (ovvero la resa quantica) rimarrebbe invece sostanzialmente invariato.

Analogamente al meccanismo di “acclimatemento”, la maggior parte delle piante che si sono evolute in condizioni di elevata luminosità (dunque per “adattamento”) mostrano tassi di fotosintesi a saturazione (*Amax*) più elevati, punti di compensazione per la luce (LCP) più elevati e tassi di fotosintesi più bassi in condizioni di scarsa luminosità rispetto alle piante adattate all'ombra quando vengono coltivate nelle la stesse condizioni.

In presenza di un flusso radiante molto elevato, si potrebbe dire pericolosamente elevato, non solo il processo fotosintetico è saturato, ma è possibile che si determini un danneggiamento diretto a carico dei fotosistemi (PS). Tutti i fotoni assorbiti dai pigmenti fotosintetici contribuiscono a determinare lo stato “eccitato” della clorofilla; quando però i livelli radiativi superano la regione lineare di risposta della fotosintesi alla luce (*Figura 11*) non tutta la clorofilla eccitata può essere utilmente indirizzata al processo fotochimico, la frazione di energia di eccitazione che non può essere utilizzata aumenta progressivamente con l'intensità dell'irraggiamento. Questa è una condizione potenzialmente dannosa per le piante, poiché l'eccesso di energia di eccitazione può provocare gravi danni se la stessa non riesce ad essere dissipata. L'eccesso di energia di eccitazione, infatti, può causare danni alle membrane fotosintetiche nel caso in cui i meccanismi di dissipazione fossero inefficienti. Questo fenomeno si chiama “fotoinibizione”, conseguente allo squilibrio tra il tasso di danneggiamento ed il tasso di riparazione del PS II. Una resa quantica che si riduce per effetto della fotoinibizione ma che viene ristabilita in pochi minuti a valori normali si definisce di tipo “dinamico” ed è principalmente associata a cambiamenti nel ciclo della xantofilla. Diversamente, si parla di fotoinibizione “cronica” quando il danno è più grave e sono richieste delle ore affinché si faccia ritorno alle condizioni di normalità.

A fronte di questa rilevante variabilità di casi di adattamento / acclimatemento radiativo delle piante, risulta chiaro che un ombreggiamento che riduca il flusso radiativo entro quel tratto di curva di risposta della fotosintesi che si presenta tendenzialmente appiattito (ovvero in condizioni di saturazione) non costituisce un grave pregiudizio ai fini dei processi di assimilazione del carbonio atmosferico e, pertanto, di accrescimento della pianta. Ciò spiega le ragioni per cui piante che si accrescano in condizioni di ombreggiamento (moderato e mai eccessivo) possano comunque esprimere livelli di produzione buoni e non così penalizzanti rispetto alle condizioni ordinarie di pieno soleggiamento.

## Inserimento ed armonizzazione paesaggistica dell’agrovoltaico

Le criticità individuate dal *Piano Paesaggistico Territoriale della Regione Puglia* (PPTR) nei riguardi degli impianti fotovoltaici sono strettamente connesse ad un possibile uso improprio della tecnologia, ovvero al rischio che, attraverso una progressiva espansione delle installazioni, si realizzi un’indebita occupazione del suolo a destinazione agricola, nonché uno snaturamento del territorio agricolo, ciò che arrecherebbe un conseguente impatto negativo sul paesaggio (PPTR, 2013).

Si evidenzia, infatti, che sempre più numerosi sono gli impianti che si sostituiscono alle coltivazioni agrarie e che le possibilità d’installare impianti fotovoltaici in aree agricole può innescare uno scenario inusitato di potente trasformazione della *texture* agricola, con forti processi di “artificializzazione” del suolo (PPTR, 2013).

A ciò si aggiunga che le rilevanti superfici asservite alla costruzione di impianti fotovoltaici pone anche il problema del successivo recupero delle aree medesime, allorché si debba procedere allo smantellamento dell’impianto ivi realizzato.

Nelle “linee guida” del PPTR (PPTR, 2013) si conclude, pertanto, che il processo di riconversione del suolo agricolo va dunque controllato mediante una pianificazione attenta ai valori del patrimonio e del paesaggio agrario. Ciò a partire dai singoli comuni, fino alla scala regionale. Ne consegue che il PPTR si propone di disincentivare l’installazione “a terra” del fotovoltaico e, al contrario, d’incentivare la distribuzione diffusa dei pannelli solari sulle coperture e sulle facciate degli edifici o su strutture di copertura utilizzate per altri usi (serre agricole, pensiline parcheggi, zone d’ombra, ecc.).

Alla luce di quanto sviluppato nei capitoli precedenti di questo report riguardo alle peculiarità ed alle prerogative del modello “fotovoltaico”, è possibile indicare che le cautele e le precauzioni indicate dalle “linee guida” del PPTR sono condivisibili. Le medesime preoccupazioni, infatti, hanno mosso e poi guidato l’elaborazione della “proposta” agrovoltaica. Essa affronta e risolve, per lo meno in massima parte, tutte le obiezioni avanzate riguardo all’installazione “esclusiva” del fotovoltaico (ovvero allorché tali impianti siano installati al solo scopo di produrre energia elettrica) e prefigura un approccio innovativo di un fotovoltaico “integrato” (ovvero “multifunzionale”). Tale modello, allorché idoneamente implementato, può considerarsi perfettamente in sintonia con le indicazioni espresse dal PPTR. Infatti, non sussiste un’indebita occupazione di suolo agrario, non avviene alcuna conversione d’uso e, al contrario, le produzioni agrarie vengono non solo confermate ma addirittura migliorate.

Sempre il PPTR suggerisce, con riguardo ai criteri ed agli orientamenti metodologici, che i progetti dovrebbero sviluppare sinergie con altri usi e funzioni. Sebbene, nel PPTR, il riferimento sia prevalentemente riferibile al contesto urbano, ci pare che la sollecitazione possa essere estesa ad abbracciare anche il contesto agricolo, evidenziando che il modello “agrovoltaico” proprio su questa “sinergia” fra usi molteplici del suolo ha fondato la proposta d’ibridazione fra produzione agricola ed energetica (da fonte rinnovabile).

Un’altra prerogativa dell’agrovoltaico è che i pannelli sono “appoggiati” al suolo mediante una struttura di supporto che consente l’elevazione dei pannelli solari largamente al di sopra della copertura vegetale, agevolando così gli interventi di coltivazione, anche quelli condotti con gli ordinari mezzi meccanici. Si esclude, pertanto, l’impiego di plinti in cemento armato od altre installazioni a carattere permanente che siano profondamente infisse nel suolo. La struttura, nel

suo complesso, è quindi rimovibile in modo assai agevole, senza che siano necessari pesanti interventi meccanici di escavazione e ripristino.

Rimane, però, un ultimo aspetto ancora da affrontare, ovvero quello relativo alla **localizzazione più idonea degli impianti agrovoltai**. Ciò al fine di non alterare o snaturare quello che il PPTR indica come il tradizionale *texture* del paesaggio agricolo, ovvero il “mosaico” costituito da una pluralità di “patch” (o “*tessere*”) rappresentate dalle unità di coltivazione e dalla loro reciproca disposizione a formare, per l’appunto, un paesaggio agrario unitariamente considerato.

Ebbene, è possibile affermare che le installazioni agrovoltai, considerando le tipiche prerogative connesse al modello produttivo agricolo (ancorché energetico), non possono trovare collocazione in aree agricole a forte connotazione tradizionale come quelle, ad esempio, di un paesaggio rurale storico. Al contrario, le aree agricole più dense d’infrastrutturazioni, lì dove l’attività di coltivazione è particolarmente intensiva, realizzandosi rapidi avvicendamenti colturali ed *input* agrotecnici che traggono produttività elevate, nonché dove la meccanizzazione trova largo impiego, così come diffusi sono gli apprestamenti protettivi, queste sono le aree dove l’inserimento dell’agrovoltai potrebbe risultare più idoneo e meglio saprebbe armonizzarsi con le condizioni al contorno e le esigenze di un modello agricolo dinamico, orientato all’industria ed alla tempestiva commercializzazione sui mercati globali.

Si viene così a delineare, passo dopo passo, l’architettura di un nuovo modello agricolo, certamente intensivo ed idoneo alle aree agricole più produttive e più prossime agli sbocchi di mercato, aree in cui l’ibridazione agrovoltai non costituirebbe un fattore d’impatto paesaggistico ma, viceversa, attenuerebbe gli aspetti controproducenti legati ad una pratica agricola altrimenti fortemente inquinante.

Si afferma, infatti, che proprio in queste condizioni territoriali, certo non degradate ma più esposte ad impatti ambientali (siano essi originati dall’agricoltura o da altre attività produttive ivi insediate), ***l’implementazione di un modello agrovoltai potrebbe apportare sensibili miglioramenti ambientali ed anche una qualificazione di tipo paesaggistico, così come una rifunzionalizzazione di tipo agro-ecologico***, allorché si procedesse ad adottare un *design* impiantistico studiato *ad hoc* per conseguire un inserimento armonioso dell’impianto.

Non si vuol qui far riferimento ad interventi di “**compensazione ambientale**”, che potrebbero presupporre la necessità di controbilanciare, portando a pareggio, presunti impatti ambientali provocati dall’insediamento impiantistico. Al contrario, si fa appello a delle prerogative intrinseche che solo un corretto ed armonioso *design* dell’impianto agrovoltai può esprimere. In particolare, trattandosi di “agrovoltai”, non si può prescindere dal rimarcare che, in questo caso, non si realizza una mera “sovrapposizione” di un impianto fotovoltaico ad un suolo agrario che perde così la sua vocazione a fornire servizi ecosistemici qualificati. Si consegue, piuttosto, una vera e propria “integrazione” di processi produttivi agro-energetici che hanno la proprietà di generare ricadute ambientali ed ecologiche altamente positive in quel determinato contesto ambientale ed agrario (come già ampiamente esposto nei capitoli precedenti ed ai quali si rimanda).

“Tradizionale” diviene ciò che, di volta in volta, si tramanda da una generazione alla successiva, segno del successo e della stabilità di alcune soluzioni tecniche che coniugano efficacemente la disponibilità delle risorse con le esigenze della società del tempo. Le esigenze si evolvono e le risorse disponibili possono modificarsi. Per non “tradire” la “tradizione” occorre “tradurla” in modo da mantenerla vitale, assegnando ad essa nuove finalità entro nuove contestualizzazioni.

Siamo poi così sicuri che non si stiano costruendo le basi di un paesaggio agrario “tradizionale” del terzo millennio?

### La coltivazione dell’asparago: un esempio applicativo dell’agrovoltaico

L’analisi dei sistemi colturali, nonché le valutazioni produttive ed economiche inerenti a tali sistemi, ha condotto all’individuazione della coltura dell’asparago come quella in grado di esprimere al meglio le potenzialità offerte dal suddetto modello integrato di produzione. Ovviamente essa non è l’unica e numerose altre possono essere le possibilità applicative dell’agrovoltaico.

**L’asparago può essere assunto come la coltura orticola di riferimento del modello agrovoltaico per gli ambienti mediterranei.** L’Italia è tra i primi paesi produttori di asparago in Europa, dopo Germania e Spagna, con una superficie stimata di circa 6.500 ettari. La Puglia è fra le regioni più vocate, dove si coltiva il 50% degli asparagi verdi in aziende agricole di grandi dimensioni, con superfici anche superiori ai 200 ettari. Oltre alla rilevanza produttiva ed economica (fattori certamente di non scarsa rilevanza), fattore decisivo nell’individuazione dell’asparago come coltura di riferimento è l’ottima combinazione fra esigenze colturali e condizioni ambientali che il modello agrovoltaico riesce ad esprimere allorché esso veda l’asparago come sua coltura d’elezione. Questa scelta, infatti, dovrebbe offrire le più alte garanzie di conseguire a pieno quelle potenzialità sinergiche precedentemente indicate parlando di “simbiosi” produttiva.

Analizziamo schematicamente le ragioni agronomiche della scelta dell’asparago come specie orticola di riferimento del sistema “agrovoltaico”.

- La **fase di accrescimento vegetativo** della coltivazione dell’asparago coincide con la stagione primaverile-estiva. In questo periodo, infatti, l’intensa attività di crescita e di assimilazione fotosintetica consente di accumulare ingenti quantità di risorse nutritive che vengono indirizzate all’apparato radicale, in particolare ai rizomi che assolvono alla funzione di organi di accumulo e riserva. Quanto maggiore sarà la riserva costituitasi in questa fase, tanto maggiore potrà essere il sostegno alla fase successiva di emissione ed accrescimento dei turioni (la parte edule della pianta), processo che avverrà solo più tardi, quando saranno pienamente superati i rigori dell’inverno. Durante l’autunno, invece, il manto vegetale si dissecca progressivamente e vi rimane in tal modo durante tutto l’inverno, ovvero fino a quando non riprenda una nuova attività vegetativa che consiste nella produzione di turioni che saranno, per l’appunto, oggetto di raccolta.
- La **temperatura** ottimale perché si compia il processo fotosintetico durante la fase vegetativa primaverile-estiva è compresa fra i 18 ed i 28 °C; al di là di questo valore termico il processo rallenta progressivamente ed è fortemente inibito oltre i 36 °C di temperatura dell’aria. Considerando le condizioni climatiche estive che si riscontrano negli areali di coltivazione dell’asparago, ne consegue che il rischio di superare questi valori “soglia” di temperatura è molto elevato, anzi può frequentemente verificarsi. Solo il ricorso a turni irrigui brevi ed all’applicazione di adeguati volumi di adacquamento può consentire un’efficace termoregolazione del manto vegetale allorché sia in attiva traspirazione.
- Il **fattore idrico**, pertanto, è determinante nella coltivazione dell’asparago. Le possibilità di ridurre le esigenze, riuscendo a conseguire un significativo risparmio della risorsa, è di grande rilevanza (in termini aziendali e, più in generale, rispetto al valore ambientali ed ecologico della

risorsa). La funzione ombreggiante esercitata dalla presenza dei pannelli consente, da un lato, l’instaurarsi di un regime termico al suolo decisamente più basso, limitatamente ai suoi strati più superficiali; dall’altro, sebbene l’apporto radiativo diretto sia fortemente limitato, meno rilevante è invece l’interferenza dei pannelli fotovoltaici nei riguardi della radiazione luminosa diffusa, quest’ultima più efficace nel promuovere la fotosintesi. Ne consegue, complessivamente, che le richieste evapotraspirative espresse dalla coltura risultano inferiori, così come inferiori si rilevano i consumi irrigui, mentre l’efficacia d’uso dell’acqua, ossia la sua capacità di promuovere la fotosintesi per unità di acqua traspirata, aumenta in modo significativo. Ciò accade sia per il favorevole condizionamento termico, sia per le migliorate condizioni di disponibilità idrica. Come si comprende, i vantaggi appena riferiti evidenziano una chiara interazione positiva (ovvero un effetto “sinergico” come più volte indicato) fra regime termico e regime idrico.

- Superati i freddi invernali, la raccolta dei turioni dovrà avvenire quanto più precocemente possibile, ciò per favorire l’offerta di un prodotto capace di vincere in tempestività la concorrenza di altri Paesi e d’intercettare un favorevole apprezzamento di mercato. La “forzatura” è, per l’appunto, quella tecnica agronomica che consente di indurre la pianta a produrre in anticipo nel periodo primaverile e, possibilmente, anche assai prima. Il sistema più comunemente adottato consiste nell’allestire un tunnel realizzato con un film plastico trasparente (ed un rapporto volume superficie di circa 2:1) Ciò consentirebbe un anticipo medio dell’entrata in produzione di circa 20-25 giorni rispetto alle condizioni da pieno campo. Nei nostri ambienti, però, è possibile produrre turioni anche durante l’inverno nel caso in cui si ricorra al **riscaldamento del suolo** con tubi in polietilene che, in fase di trapianto, siano stati collocati alla giusta profondità. Dato il notevole costo energetico dell’operazione (altamente compensato dall’incremento dei ricavi conseguenti alla precocità della produzione) è di chiara evidenza che, nella soluzione agrovoltica, ciò non rappresenterebbe un problema (essendo l’energia richiesta già disponibile direttamente alla fonte) ed in più quella consumata avrebbe un’evidente origine non fossile (ossia solare), condizione che non andrebbe ad appesantire il **bilancio emissivo** dell’intero processo produttivo. E’ comunque importante non eccedere nell’applicazione di questo metodo di forzatura, in particolare evitando che la temperatura superficiale del suolo superi il valore di 18 °C circa.
- In ultimo, nessuna rilevante interferenza negativa sarebbe da evidenziare, in conseguenza dell’allestimento agrovoltico, nei riguardi di **malattie crittogame ed attacchi patogeni/parassitari** in genere. Il regime termo-igrometrico dell’aria e degli strati più superficiali del suolo sono certamente in grado di condizionare la densità della popolazione patogena e, pertanto, elevare il rischio connesso ad un attacco da parte di questi microorganismi ostili alla coltura; tale rischio, però non subirebbe un significativo aggravio in conseguenza dell’applicazione del modello agrovoltico. Efficaci sistemi di controllo, riferibili alle tecniche più recenti sperimentate sull’asparago in ambito biologico, consentirebbero una gestione adeguata del problema.

Si riepilogano di seguito, schematicamente, i punti salienti della tecnica di coltivazione dell’asparago secondo criteri avanzati d’innovazione tecnologica:

- **Destagionalizzazione della produzione di asparago.** Accentuato anticipo della raccolta possibilmente già nel mese di gennaio (rispetto al periodo ordinario di raccolta nei mesi primaverili), unitamente all’inserimento di una possibilità aggiuntiva di raccolta nei mesi

autunnali, comunque garantendo una fase vegetativa della coltura sufficientemente lunga (circa 5 mesi, da aprile ad agosto) necessaria alla sintesi ed accumulo di riserve nel rizoma.

- **Valutazione della possibilità d’impiego di “tunnel” protettivi in bioplastica.** Al fine di ridurre drasticamente l’impiego della plastica in agricoltura, gli apprestamenti protettivi realizzati sulla coltura dell’asparago (che consistono in piccoli tunnel in grado di innalzare il regime termico dell’aria a ridosso del terreno) dovrebbero essere realizzati da materiale polimerico di origine biologica, completamente biodegradabile e compostabile. Queste proprietà permettono alla materia plastica impiegata in campo di essere completamente degradata *in situ* senza la necessità di essere recuperata a fine ciclo di coltivazione e di essere smaltita come rifiuto speciale agricolo secondo le modalità previste dalla normativa. Diversamente, questo materiale residuo (proprio perché biodegradabile e compostabile) può essere semplicemente disgregato meccanicamente al suolo dove, per intervento dei microrganismi, andrà incontro ad un processo di naturale degradazione. Oltre ai fondamentali risvolti di salvaguardia ambientale, questa pratica consente di conseguire un notevole risparmio di tempo ed evita di sostenere i costi di smaltimento del materiale plastico. Si è attualmente in fase di verifica riguardo alla disponibilità commerciale di materiale che presenti le suddette prerogative.
- **Gestione innovativa della fertilità del suolo.** Si conferma che l’indirizzo agronomico adottato sarà quello di aderire al regime di coltivazione secondo il **metodo biologico** anche detto “*organic farming*” (secondo il Reg. CE 834/2007). Alla luce di questa scelta, si propone l’impiego di sostanze e/o microrganismi noti come **biostimolanti** naturali delle piante, ovvero di prodotti in grado di migliorare l’efficienza d’uso degli elementi nutritivi, ridurre l’incidenza delle avversità abiotiche e migliorare la qualità delle produzioni, ottimizzando i processi metabolici delle piante. I cosiddetti biostimolanti includono sostanze naturali bioattive (sostanze umiche, idrolizzati proteici, estratti di alghe) così come microrganismi benefici del suolo tra cui i **funghi micorrizici arbuscolari** (FMA) e i batteri azoto fissatori.
- **Elettificazione di tutte le operazioni meccaniche e strumentali impiegate negli interventi di coltivazione.** L’ampia disponibilità di energia elettrica derivata dell’impianto fotovoltaico consente un’integrale transizione del parco macchine aziendali dall’impiego delle fonti fossili all’utilizzo di energia rinnovabile. Macchine motrici ed operatrici saranno quindi convertite all’elettrico, realizzando così una significativa contrazione dell’impronta carbonica della coltivazione dell’asparago.
- **Verifica della possibilità di automatizzare le operazioni colturali e, in particolare, la raccolta.** Applicando i principi dell’agricoltura di precisione alle tecnologie informatiche, al “*remote sensing*” ed ai sistemi di gestione automatizzata è possibile prefigurare un ampio spettro di servizi di supporto alle decisioni dell’agricoltore in grado di “comandare” in automatico lo svolgimento di numerosi interventi colturali (tramite l’impiego di idonei *software* gestionali). Primo fra questi l’irrigazione, tramite sistema di sub-irrigazione che consente di conseguire livelli molto elevati di efficienza distributiva dell’acqua. La modulazione “sito-specifica” dei fattori produttivi e dei mezzi di controllo consente un ottimo dosaggio ed un elevato risparmio, a vantaggio dell’ambiente e del bilancio colturale. Sono implementati sistemi di guida automatica (mediante GPS) per la corretta movimentazione dei mezzi elettrici, apparati sensoristici micrometeorologici, sistemi di elaborazione immagini per la valutazione del prodotto da raccogliere, impiego di mappe georeferenziate sulle caratteristiche chimico-fisiche dei suoli coltivati anche al fine di eseguire un “dosaggio variabile” nelle concimazioni e nel controllo di eventuali patogeni. In ultimo, la **raccolta**

**automatica di asparagi** sul campo di coltivazione richiede l'utilizzo di sofisticati sistemi di identificazione del turione pronto per il prelievo. Allo scopo, occorre mettere a punto un sistema di visione tridimensionale in grado di acquisire, nelle tre dimensioni dello spazio, la posizione del turione, valutando contestualmente il suo calibro, la sua altezza, la sua idoneità alla raccolta. La visione stereoscopica si basa sull'impiego di due o più telecamere montate su un mezzo mobile elettrico. Un *software*, appositamente sviluppato, utilizza algoritmi di intelligenza artificiale e viene addestrato mediante modelli di *deep learning* impiegando grandi set di dati ed architetture di reti neurali in grado di apprendere direttamente dai dati acquisiti sul campo. In tal modo si effettua il riconoscimento degli asparagi all'interno del quadro immagine 3D. Parametri configurati *ad hoc* consentono di definire le coordinate spaziali di posizionamento del turione e le specifiche condizioni di ciascuno di essi. Il sistema di taglio e raccolta provvede, in ultimo, a completare l'operazione.

- **Riconoscimento e certificazione ecologica di prodotto.** Oltre al marchio di riconoscimento di prodotto biologico (Reg. CE 834/2007) è opportuno procedere ad un accurato conteggio del risparmio energetico ed emissivo associato al nuovo regime di coltivazione dell'asparago, ciò anche al fine di attivare procedure di riconoscimento dei crediti di carbonio così acquisiti ed una certificazione del ridotto impatto ambientale del prodotto (per esempio mediante l'adozione del marchio europeo “**ecolabel**” (secondo il Reg. CE n. 66/2010).
- **Valorizzazione degli scarti di lavorazione secondo un approccio di “bioraffineria”.** Gli scarti della lavorazione dell'asparago sono rappresentati dalla parte basale dei turioni, quella che si ottiene a seguito del taglio a circa 13-15 cm dall'apice. Essi hanno una colorazione biancastra ed consistenza fibrosa, possono rappresentare fino al 20% della produzione totale. Questo scarto viene ordinariamente conferito, a titolo gratuito, alle aziende zootecniche per l'alimentazione del bestiame allevato. L'asparago rappresenta una buona fonte di fitochimici bioattivi con proprietà antiossidanti, antinfiammatorie e antitumorali quali polisaccaridi, saponine, fitosteroli, glutatione, carotenoidi, polifenoli e fibra alimentare. Considerando che molti di questi composti sono maggiormente presenti nella parte più fibrosa dei turioni è di indubbio interesse dare valore aggiunto ai sottoprodotti della lavorazione dei turioni mediante l'estrazione di uno o più di questi composti bioattivi.

Come si può notare, sussistono tutte le motivazioni tecniche, di ordine sia agronomico che economico, per consigliare questa particolare integrazione agrovoltica. Avendo assunto l'asparago come coltura di riferimento, il convincimento è che il sistema così ottimizzato possa offrire appieno tutti i suoi potenziali vantaggi.

## Conclusioni

In questo report, si mostra che l'agricoltura fotovoltaica (ossia il cosiddetto “agrovoltico”) può rappresentare una soluzione praticabile per allentare il conflitto, oggi ritenuto assai grave, conseguente alla realizzazione di impianti fotovoltaici in aree agricole. Tale conflitto nasce dal presupposto, del tutto condivisibile, di valorizzare il suolo agrario ai fini della produzione agro-alimentare che esso può fornire, evitando di snaturarne destinazione e vocazione. Tale importante destinazione agricola non verrebbe contraddetta, e tanto meno revocata, nel caso in cui **la produzione energetica da fonte rinnovabile si aggiungesse alla prima, quella alimentare, integrandosi ad essa e consentendo di fornire risultati produttivi ancora migliori.**

A tal fine, però, è necessario che **la proposta agrovoltica venga applicata nella pienezza integrale della sua concezione**, così come descritto in queste pagine. Sarebbe intollerabile che questa proposta, seria e tecnicamente ben calibrata, venisse semplicemente strumentalizzata come una sorta di “cavallo di troia” per forzare la mano ed aggirare la vigente normativa in materia ambientale e paesaggistica. Se ciò avvenisse, sarebbe grave ed avvierebbe una de-regolarizzazione foriera di ulteriore “saccheggio” a danno del territorio.

Oltre a promuovere un approccio integrato e multifunzionale, è possibile prevedere ulteriori vantaggi per le aziende agricole che, in virtù della generazione fotovoltaica, possono procedere a realizzare una conversione elettrica (da fonte rinnovabile) di tutte le operazioni aziendali che richiedono un dispendio energetico. Sarebbe una vera “transizione” ecologica verso una maggiore sostenibilità dell’agricoltura.

A questo aspetto si associa l’opportunità d’implementare un ampio ventaglio d’innovazioni agronomiche che riguardano la sostenibilità ecologica della gestione dei processi di coltivazione, regime biologico di coltivazione (“organic farming”) ed un set di applicazioni inquadrabili all’intersezione fra “precision farming” ed “internet of farming”. Come si comprende, questo modello ibrido di agricoltura diverrebbe quello più “permeabile” alle implementazioni tecnologiche riscontrabili sul fronte più avanzato dell’innovazione e del trasferimento tecnologico nel settore agricolo ed energetico insieme.

Ulteriori considerazioni favorevoli attengono a ragioni di ordine socio-economico. Questa proposta di creare un’armoniosa sinergia fra settore agrario ed industriale consentirebbe di restringere quella “forbice” molto ampia che attualmente distanzia il reddito agrario da quello relativo al settore industriale e, più in generale, lo sviluppo delle aree rurali da quello, ritenuto più avanzato, delle aree urbane. Rafforzerebbe le produzioni ortofrutticole nel ritagliarsi uno spazio competitivo sui mercati internazionali, creandosi le opportunità di un’offerta qualitativamente elevata e, per quanto possibile, destagionalizzata (“fuori stagione”), si genererebbe un flusso integrativo di reddito in grado di offrire un buon grado di resilienza ad aziende agricole spesso minacciate da mercati di sbocco commerciale contraddistinti da una forte instabilità dei prezzi.

In estrema sintesi, il giudizio espresso in merito a questa prospettiva d’innovazione in campo agricolo ed energetico è, nel complesso, positivo.

Il favore riguardo al sistema “agrovoltico” non può però prescindere dal considerare le condizioni territoriali al contorno di ogni impianto integrato, così come la necessità che tale modello sia implementato in tutte le sue peculiari componenti, non tralasciando alcun requisito specifico e verificando di volta in volta il complesso degli interventi migliorativi e di perfezionamento che potrebbero essere adottati e che, per l’appunto, attengono al contesto in cui ogni particolare progetto è inserito.

La strategia “agrovoltica si qualifica come una proposta di virtuosa integrazione “multifunzionale” in agricoltura. E’ questo, per l’appunto, il titolo che si è voluto assegnare al presente documento e che, “in pillole”, ne esprime appieno il favorevole giudizio.

### Riferimenti bibliografici

Amaducci, S., Yin, X., Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic Systems to Optimize Land Use for Electric Energy Production. In: Applied Energy 220, 2018, pp. 545-561.

## IL SISTEMA "AGROVOLTAICO": UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

- Aspromonte D. e A. Molocchi (2013a), Ecco il peso delle esternalità nell'economia italiana. Il contributo dell'analisi costi-benefici in chiave ambientale per migliorare il PIL. Nuova Energia, bimestrale dello sviluppo sostenibile, n. 5, 2013
- Barber, J., & Andersson, B. (1992). Too much of a good thing: light can be bad for photosynthesis. *Trends in biochemical sciences*, 17(2), 61-66.
- Bennamoun L. (2013). Integration of photovoltaic cells in solar drying systems. *Drying Technol*, 31(11), 1284-96.
- Campana PE, Leduc KM, Olsson A, Zhang J, Liu J, Kraxner F, et al. (2017). Suitable and optimal locations for implementing photovoltaic water pumping systems for grassland irrigation in China. *Appl Energy*, 185, 1879-89.
- Cantagallo, J. E., Medan, D., & Hall, A. J. (2004). Grain number in sunflower as affected by shading during floret growth, anthesis and grain setting. *Field crops research*, 85(2), 191-202.
- Carlos Campillo, Rafael Fortes and Maria del Henar Prieto (2012). Solar Radiation Effect on Crop Production, *Solar Radiation*, Prof. Elisha B. Babatunde (Ed.), ISBN: 978-953-51-0384-4, InTech.
- Cossu M, Murgia L, Ledda L, Deligios PA, Sirigu A, Chessa F, et al. (2014). Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity. *Appl Energy*, 133, 89-100.
- CREA (2020). L'agricoltura Italiana Conta 2019. Centro di ricerca Politiche e Bioeconomia.
- Cuce E, Harjunowibowo D, Cuce PM. (2016). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: a comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev.*, 64, 34-59.
- Dinesh, H. e Pearce, J.M. (2016). The Potential of Agrivoltaic Systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 299-308.
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., Ferard, Y. (2011a). Combining Solar Photovoltaic Panels and Food Crops for Optimizing Land Land Use: Towards New Agrivoltaic Schemes. *Renewable, Energy Journal* 36, 2011, p. 2725-2732 (Elsevier).
- Dupraz C, Talbot G, Marrou H, Wery J, Roux S, Liagre F, et al. (2013b). To mix or not to mix: evidences for the unexpected high productivity of new complex agrivoltaic and agroforestry systems. In: *Proceedings of the 5th world congress of conservation agriculture: resilient food systems for a changing world*
- ES (2019). Renewable energy report. Gli scenari future delle rinnovabili in Italia. Energy & Strategy Group, Politecnico di Milano.
- Goetzberger, A. and Zastrow, A. (1982). On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. In: *International Journal of Solar Energy* 1.1, p. 55-69
- Greer, D. H., & Weedon, M. M. (2012). Photosynthetic Light Responses in Relation to Leaf Temperature in Sun and Shade Leaves of Grapevines. In *VII International Symposium on Light in Horticultural Systems* 956, 149-156.
- Han C, Liu J, Liang H, Guo X, Li L. (2013). An innovative integrated system utilizing solar energy as power for the treatment of decentralized wastewater. *J Environ Sci*, 25(2), 274-9.

## IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”: UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

Hans Lambers F. Stuart Chapin III Thijs L. Pons (2008). *Plant Physiological Ecology*. Springer Science & Business Media, LLC. USA.

Leopold, A. C. (1964). *Plant growth and development*. Plant growth and development.

Li C, Wang H, Miao H, Ye B. (2017). The economic and social performance of integrated photovoltaic and agricultural greenhouses systems: case study in China. *Appl Energy*, 190, 204-

Majudmar D, Pasqualetti MJ. (2018). Dual use of agricultural land: introducing ‘agrivoltaics’ in Phoenix Metropolitan Statistical Area, USA. *Lands Urban Plan*, 170, 150-68.

Marrou, H., Dufour, L., Wery, J. (2013a). How Does a Shelter of Solar Panels Influence Water Flows in a Soil-Crop System? In: *European Journal of Agronomy* 50, 38-51.

Marrou, H., Guilioni, L, Dufour, L., Dupraz, C., Wery, J. (2013b). Microclimate under Agrivoltaic Systems: Is Crop Growth Rate Affected in the Partial Shade of Solar Panels? *Agriculture for Meteorology*, 177, 117-132.

Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., Dupraz, C. (2013c). Productivity and Radiation Use Efficiency of Lettuces Grown in the Parital Shade of Photovoltaic Panels. *European Journal of Agronomy* 44, 54-66.

Mead, R. and Willey, R. (1980). The Concept of ‘Land Equivalent Ratio’ and Advantages in Yields from Intercropping. In: *Experimental Agriculture* 16, 217-228.

Miskin et al. (2019). Sustainable co-production of food and solar power to relax land-use constraints. *Nature Sustainability*, 972, 972-980.

Mondino EB, Fabrizio E, Chiabrando R. (2015). Site selection of large ground-mounted photovoltaic plants: a GIS decision support system and an application to Italy. *Int J Green Energy*, 12(5), 515-525.

Nomisma (2015). *Ortofrutta 2015. Rapporto sulla competitività del settore ortofrutticolo nazionale*

Nonhebel S. (2005). Renewable energy and food supply: will there be enough land? *Renew Sustain Energy Rev*, 9(2), 191-201.

Praderio S, Perego A (2017) Photovoltaics and the agricultural landscape: the agrovoltaico concept. <http://www.remtec.energy/en/2017/08/28/photovoltaics-form-landscapes/>. Accessed 6 April 2020

Rathmann RG, Szklo A, Schaeffer R. (2007). Land use competition for production of food and liquid biofuels: an analysis of the arguments in the current debate. *Renew Energy*, 35(1), 14-22.

Rem Tec (2017) AGROVOLTAICO® TECHNOLOGY. <https://www.remtec.energy/en/agrovoltaico/>. Accessed 6 April 2020

Sacchelli, S., Garegnani, G., Grilli, G., Paletto, A., Zambelli, P. Ciolli, M., Vettorato, D. (2016). Tradeoff Between Photovoltaic Systems Installation and Agricultural Practices on Arable Lands: An Environmental and Socio-Economic Impact Analysis for Italy. In: *Land Use Policy* 56, 90-99.

Santangeli, A., Di Minin, E., Toivonen, T., Pogson, M., Hastings, A., Smith, P., Moilanen, A. (2016). Synergies and Trade-Offs between Renewable Energy Expansion and Biodiversity Conservation – A Cross-National Multi-Factor Analysis. In: *Global Change Biology Bioenergy* Vol. 8, Issue 6, pp.1191-1200.

## IL SISTEMA “AGROVOLTAICO”: UNA VIRTUOSA INTEGRAZIONE MULTIFUNZIONALE IN AGRICOLTURA

- Scognamiglio A. (2016). ‘Photovoltaic landscapes’: design and assessment. A critical review for a new transdisciplinary design vision. *Renew Sustain Energy Rev*, 55, 629-661.
- Sgroi F, Tudisca S, Di Trapani AM, Testa R, Squatrito R. (2014). Efficacy and efficiency of Italian energy policy: the case of PV systems in greenhouse farms. *Energies*, 7, 3985–4001.
- Tolomeo Progetto (2013). Le filiere agro alimentari tra innovazione e tradizione. Rapporto finale.
- Valle, B., Simonneau, T., Sourd, F., Pechier, P., Hamard, P., Frisson, T. (2017). Increasing the Total Productivity of a Land by Combining Mobile Photovoltaic Panels and Food Crops. In: *Applied Energy* 206, 1495-1507.
- Worku, W., Skjelvåg, A. O., & Gislerød, H. R. (2004). Responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) to photosynthetic irradiance levels during three phenological phases. *Agronomie*, 24(5), 267-274.
- Xue J. (2017). Photovoltaic agriculture - new opportunity for photovoltaic applications in China. *Renew Sustain Energy Rev*, 73, 1-9.
- Zanon B, Verones S. (2013). Climate change, urban energy and planning practices: Italian experiences of innovation in land management tools. *Land Use Policy*, 32, 343-55.

Come citare il lavoro:

Monteleone M., 2020. *Il sistema “agrovoltaco”: una virtuosa integrazione multifunzionale in agricoltura*. Position Report a cura del Gruppo di Ricerca “Star\*AgroEnergy” dell’Università di Foggia, Dipartimento di Scienze Agrarie, degli Alimenti e dell’Ambiente. Foggia.

**STAR\*AgroEnergy Research Unit**  
Università di Foggia  
www.star-agroenergy.eu  
prof. Massimo Monteleone  
via Napoli, 25 – 71121 Foggia  
tel. +39.0881.589223  
massimo.monteleone@unifg.it

**Università di Foggia**  
**Dipartimento di Scienze Agrarie,**  
**degli Alimenti e dell’Ambiente**  
Via Napoli 25 – 71121 Foggia  
Direttore: prof.sa Milena Sinigaglia  
Segreteria amministrativa  
tel. +39.0881.589216

**STAR\*Facility Centre**  
Zona Industriale di Foggia  
S.S.16 (Foggia-Bari) km 684,3  
<http://starfacilitycentre.unifg.it>  
dott. Matteo Francavilla  
tel. +39.0881.680195  
matteo.francavilla@unifg.it

